

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОУ ВПО «СИБИРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ»

ГЕО-СИБИРЬ-2007

Т. 4

**СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ,
МЕТРОЛОГИЯ, ТЕПЛОФИЗИКА, МИКРОТЕХНИКА**

Ч. 1

Сборник материалов
III Международного научного конгресса

Новосибирск
СГГА
2007

УДК 681.2:006:
С 26

Ответственные за выпуск:

координаторы направления «Специализированное приборостроение,
метрология, теплофизика, микротехника»

Кандидат технических наук, профессор, директор ИОиОТ СГГА *О.К. Ушаков*
Доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, директор
КТИ НП *Ю.В. Чугуй*

С 26 ГЕО-Сибирь-2007. Т. 4. Специализированное приборостроение,
метрология, теплофизика, микротехника. Ч. 1 : сб. матер. III Междунар. научн.
конгресса «ГЕО-Сибирь-2007», 25–27 апреля 2007 г., Новосибирск. –
Новосибирск: СГГА, 2007. – 260 с.

ISBN 978-5-87693-229-7

ISBN 978-5-87693-234-1 (т. 4, ч. 1)

В сборнике опубликованы материалы III Международного научного
конгресса «ГЕО-Сибирь-2007» направления «Специализированное
приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника».

Печатается по решению Редакционно-издательского совета СГГА

Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 681.2:006:

ISBN 978-5-87693-229-7

ISBN 978-5-87693-234-1 (т. 4, ч. 1)

© ГОУ ВПО «Сибирская государственная
геодезическая академия», 2007

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕМНЫХ ГОЛОГРАММНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Голограммные оптические элементы (ГОЭ) являются одним из практических применений нового раздела оптики – голографии, открытой Д. Габором в 1948 году. Объемные пропускающие ГОЭ записываются при интерференции двух когерентных волн в схемах, подобных схеме Д. Габора [1]. На рис. 1а представлена схема записи объемного осевого пропускающего ГОЭ расходящейся сферической опорной волной и сходящейся сферической объектной волной. На стадии восстановления при освещении этого ГОЭ сферической волной возникает сходящаяся восстановленная волна (рисунок 1б). Объемные отражающие ГОЭ впервые были получены Ю.Н. Денисюком [2] (рисунок 2 а, б). Отличительные особенности объемных ГОЭ, такие как, высокая дифракционная эффективность, наличие одного рабочего порядка дифракции, спектральная, угловая и пространственная селективности привлекли внимание исследователей [3]. Изучению оптических характеристик тонких и объемных ГОЭ посвящено множество работ, например [4–12]. При расчете объемных пропускающих ГОЭ используется линзовая модель [8–9], при расчете объемных отражающих ГОЭ – зеркальная модель. М.А. Ганом предложена составная модель локальных объемных решеток, позволяющая рассчитывать объемные ГОЭ с помощью компьютерных программ [8].

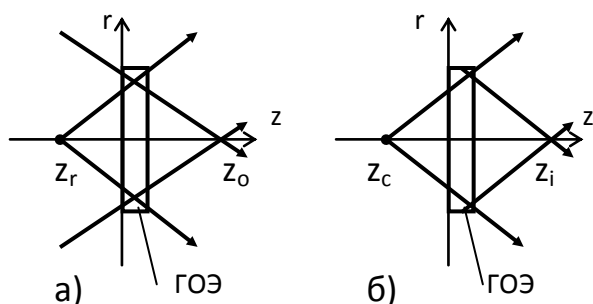


Рис. 1. Схема записи (а) и восстановления (б) пропускающего объемного ГОЭ

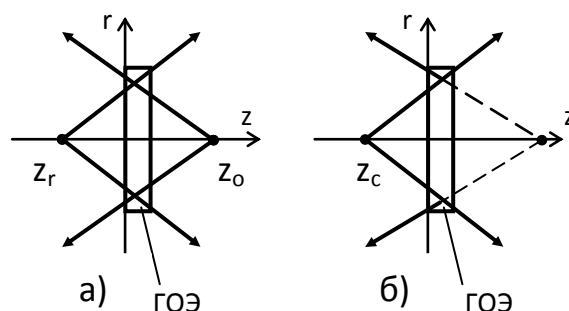


Рис. 2. Схема записи (а) и восстановления (б) отражающего объемного ГОЭ

Но такие особенности объемных ГОЭ, как существование одной оптимальной пары сопряженных плоскостей, отличия пространственной и угловой дисперсии по сравнению с тонкими ГОЭ не находят своего объяснения в существующих моделях. Целью настоящей работы является попытка объяснения этих особенностей объемных ГОЭ. В работе поставленная цель достигается на основе, предложенной авторами зеркально-линзовой модели объемного ГОЭ, зарегистрированного двумя сферическими волнами [13–15]*. В работе также представлены два примера практического применения объемных ГОЭ: голографический нивелир и голографический спектроуказатель. Мы

ограничимся в основном рассмотрением объемного осевого ГОЭ, который на стадии восстановления и записи окружен диэлектрической средой со средним показателем преломления равным среднему показателю преломления голографической среды. Это позволяет не учитывать преломление волн при записи и восстановлении на поверхностях голографической среды. Также будем считать, что длины волн λ_c , λ_o и средние показатели преломления n_c , n_o голографической среды на стадии восстановления и записи различаются.

Известны два основных метода расчета объемных ГОЭ: лучевой метод и метод характеристической функции [8]. Аналитические выражения зеркально-линзовой модели объемного ГОЭ (формула тонкой линзы, формула сферического зеркала, формула плоского зеркала) получаются из условия равенства нулю двух первых членов разложения характеристической функции $V(r,z) = S_1 r^2/2 - S_2 z r^2/2 + \dots$ [13-15]

$$\begin{aligned} S_1 &= n_c [1/z_c \pm 1/z_i - k\mu (1/z_r \pm 1/z_o)/m_r^2] = 0, \\ S_2 &= n_c [1/z_c^2 \pm 1/z_i^2 - k\mu (1/z_r^2 \pm 1/z_o^2)/m_r^2 m_z] = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\mu = n_o \lambda_c / n_c \lambda_o$ – отношение длин волн восстановления и записи в объеме голографической среды, k – порядок дифракции, m_r , m_z – коэффициенты усадок вдоль осей Oz и Ox , z_c , z_i , z_r , z_o – расстояния от центра системы координат до источников восстанавливающей, восстановленной, опорной и объектной волн, как показано на рис. 1 и 2. В выражениях системы (1) нижний знак минус соответствует объемным пропускающим ГОЭ, верхний знак плюс – объемным отражающим ГОЭ. Для объемного отражающего ГОЭ следует учитывать еще дополнительное условие, указывающее на его высокую спектральную селективность [10]: $k\mu = m_z$.

Для объемного пропускающего ГОЭ из системы (1) получаем [13, 14]

$$\begin{aligned} 1/z_c - 1/z_i &= 1/F_l, \\ 1/z_c + 1/z_i &= 1/F_m, \\ -z_c &= z_c' \end{aligned} \quad (2)$$

где F_l – фокусное расстояние пропускающего ГОЭ, F_m – фокусное расстояние модельного сферического зеркала, z_c' – координата зеркального изображения источника восстанавливающей волны.

Для объемного отражающего ГОЭ из системы (1) получаем [13,14]

$$\begin{aligned} 1/z_c + 1/z_i &= 1/F_m, \\ 1/z_c - 1/z_i &= 1/F_r, \\ -z_c &= z_c', \end{aligned} \quad (3)$$

где F_m – фокусное расстояние отражающего ГОЭ, F_r – фокусное расстояние модельной линзы. Кроме этого знак минус перед вторым членом разложения характеристической функции $V(r, z)$ означает зеркальное отображение всех расстояний до точечных источников, представленное третьим выражением в (2) и (3) [15].

Таким образом, соответствующая формулам (2) зеркально-линзовая модель объемного пропускающего ГОЭ представляет его одновременно в виде тонкой линзы и комбинации плоского и сферического зеркала, а формулам (3) модель объемного отражающего ГОЭ – одновременно в виде сферического зеркала и

комбинации тонкой линзы и плоского зеркала [15]. Эти модели являются развитием предложенной нами ранее зеркально-линзовой модели объемного ГОЭ для точек, расположенных на оптической оси [14]. Корешевым С.Н. и Ратушным В.П. [11]** предложена зеркально-линзовая модель для другого типа ГОЭ, а именно – для отражательных рельефно-фазовых ГОЭ, изготовленных на вогнутых отражающих поверхностях. Многофункциональность (полифункциональность) этой модели заключается, частности в том, что изображающие свойства рельефно-фазового отражательного ГОЭ объясняются как последовательное действие тонкой линзы и отражающей вогнутой поверхности. Предложенная Корешевым С.Н. и Ратушным В.П. [11] модель не применима к объемным ГОЭ, так как не учитывает объемность голографической среды, спектральную, угловую и пространственную селективности объемных ГОЭ.

Физическим обоснованием предложенной нами зеркально-линзовых моделей является тот факт, что на вогнутых плоскостях, перпендикулярных зарегистрированной локальной объемной пропускающей решетке, имеет место еще одна дифракция, как на отражающих поверхностях. Аналогичным образом, для локальной объемной отражающей решетки, на вогнутых поверхностях, перпендикулярных к этой отражающей решетке, имеет место еще одна дифракция как на пропускающей объемной решетке.

Следствия из зеркально-линзовых моделей объемного ГОЭ. Рассмотрим следствия из зеркально-линзовых моделей объемного пропускающего и отражающего ГОЭ.

1. Выше отмеченные особенности объемных ГОЭ, а именно, существование одной оптимальной пары сопряженных плоскостей, отличия пространственной и угловой дисперсии по сравнению с тонкими ГОЭ, являются простыми следствиями зеркально-линзовой модели. Так, выражения, позволяющие рассчитать положения сопряженных плоскостей для объемных пропускающего и отражающего ГОЭ, получаются при сложении и вычитании формул системы (2) и (3). Оптимальным положениям сопряженных плоскостей соответствует одно значение линейного коэффициента увеличения. Из-за спектральной селективности пространственная продольная дисперсия объемного осевого пропускающего ГОЭ в два раза меньше дисперсии записанного в той же схеме тонкого пропускающего ГОЭ [14]. Обратная угловая дисперсия объемного ГОЭ больше чем у тонкого ГОЭ.

2. Формулы (2) и (3) зеркально-линзовых моделей позволяют определить два фокусных расстояния, присущих объемным ГОЭ. Наличие двух фокусов приводит к значительному увеличению глубины резкости изображения. Присущие объемным ГОЭ угловая и пространственная селективности также являются причиной увеличения глубины резкости по сравнению с тонкой линзой и сферическим зеркалом.

3. Еще одним любопытным следствием зеркально-линзовой модели является новое простое правило графического определения положения оптимальных сопряженных плоскостей: из двух точек объема ГОЭ, симметрично расположенных относительно оптической оси Oz проводятся

прямые, проходящие для пропускающего ГОЭ из одной точки через фокус F_1 , а из другой точки через фокус F_m' , (для отражающего ГОЭ – из одной точки через фокус F_1' , из другой точки через фокус F_m). Точка пересечения этих прямых будет принадлежать плоскости предмета или плоскости изображения, перпендикулярных оптической оси. Если определено положение одной из плоскостей зеркально-линзовой модели (z_c – предметной плоскости или z_i – плоскости изображения), то положение сопряженной плоскости определяется по известным правилам построения изображений в тонкой линзе (для пропускающих ГОЭ) или сферическом зеркале (для отражающих ГОЭ) [14].

4. Зеркально-линзовая модель позволяет решить и обратную задачу – по заданной схеме восстановления объемного ГОЭ рассчитать оптимальную схему записи, в том числе для голографических сред с неплоскими поверхностями. Формулы для расчета положений источников опорной и объектной сферических волн получаются из условия равенства нулю двух первых членов разложения характеристической функции $V(r, z)$.

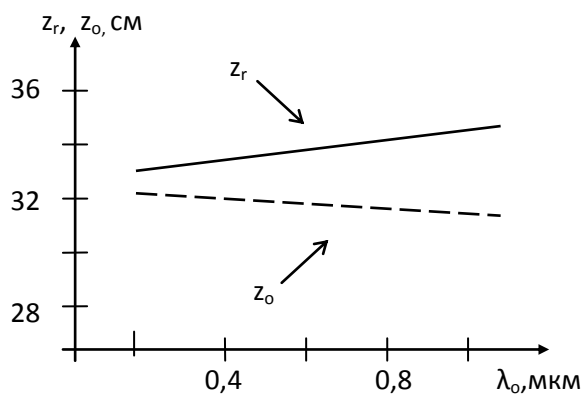


Рис. 3. Графики зависимости координат источников опорной z_r и объектной z_o волн от длины волны λ_o записи (фокусное расстояние $F = 0,2$ м, длина волны восстановления $\lambda_o = 10$ мкм)

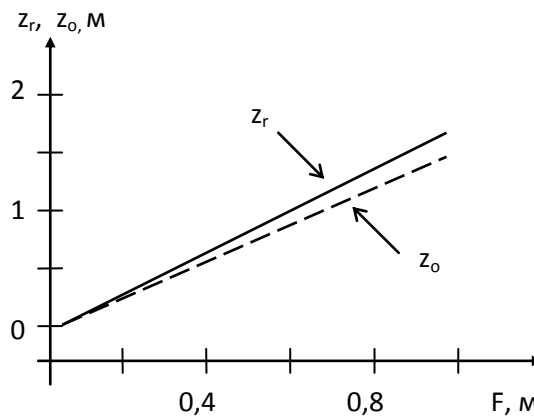


Рис. 4. Графики зависимости координат источников опорной z_r и объектной z_o волн от фокусного расстояния F

Полученные формулы (1) позволяют проанализировать зависимости положений источников сферических волн схемы записи, например, от длины волны записи (восстановления) или фокусного расстояния объемного ГОЭ. В качестве примеров, на рисунках 3, 4 представлены результаты расчета координат z_r , z_o источников опорной и объектной волн, указывающие на линейную зависимость от длины волны записи и от фокусного расстояния объемного ГОЭ.

5. Особой практической ценностью является возможность расчета рассеивающих двояковыпуклых объемных ГОЭ и фокусирующих двояковогнутых объемных ГОЭ, что невозможно для рефракционных линз [15].

Два примера практического применения объемного ГОЭ. В качестве примеров практического применения объемного ГОЭ, рассчитанных на основе

зеркально-линзовых моделей, рассмотрим два устройства: голографический нивелир и голографический спектроуказатель [16–19].

Голографический нивелир предназначен для измерения и контроля относительных высот, неровности поверхностей, задания линий горизонта и направлений [14]. Недостатками существующих оптических нивелиров являются маленькое поле зрения, получение перевернутого изображения объектов наблюдения, большие вес и габариты. К недостаткам лазерных нивелиров следует отнести большие неудобства при практической работе, связанные с поиском луча на фоне неба или на освещенной солнечным светом поверхности, ограниченность применения из-за требования к доступности места падения луча лазера.

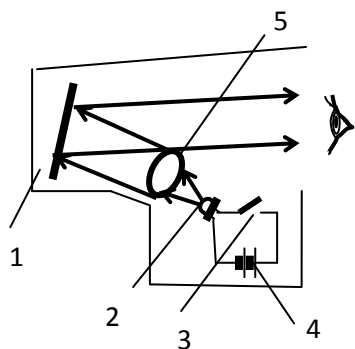


Рис. 5. Спортивно-охотничий голографический прицел «Галилей»:

1 – голограмма, 2 – светодиод и диафрагма с отверстием, 3 – выключатель, 4 – источник питания, 5 – объектив

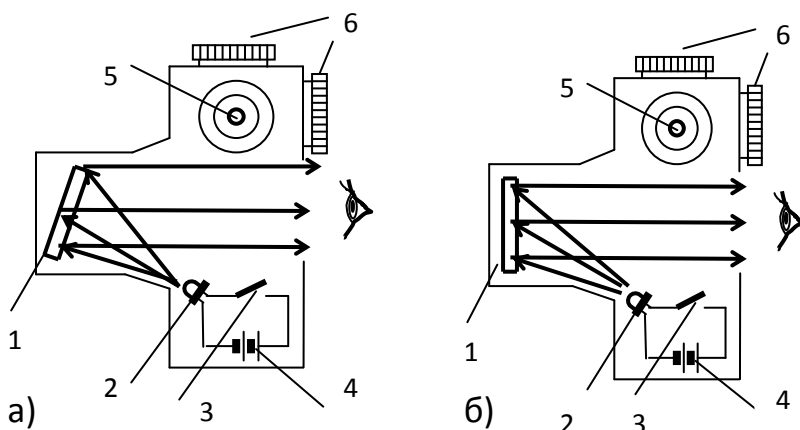


Рис. 6. Голографический коллиматорный нивелир (а) и голографический нивелир (б):

1 – внеосевой объемный ГОЭ, 2 – полупроводниковый лазер, 3 – выключатель, 4 – источник питания, 5 – уровень, 6 – система подстройки уровня

С целью устранения указанных недостатков Батомункуевым Ю.Ц. в 1995 году в СГГА был разработан голографический коллиматорный нивелир, представленный на рисунке 6а и состоящий из корпуса, оптической системы, электрической системы и уровня с системой подстройки. В оптической системе этого коллиматорного нивелира используется наклонный внеосевой объемный ГОЭ. На Международной конференции «Сферы применения CPS технологий» (Новосибирск, СГГА) в 1995 году было доложено о разработке этого нивелира [17]. Позже с целью устранения искажений изображения светящейся точки в поле зрения коллиматорного нивелира Батомункуевым Ю.Ц. и Мещеряковым Н.А. был предложен голографический нивелир, представленный на рисунке 6б, на основе оптимизированного внеосевого объемного ГОЭ [14]. Информационное сообщение об этом было сделано в 2003 году на Международной конференции «Современные проблемы геодезии и оптики» (Новосибирск, СГГА). Оптическая система голографического нивелира (рисунок 6б) существенно отличается от оптической системы спортивно-охотничьего голографического прицела «Галилей» [16], представленного на

рисунке 5 и разработанного в 1992 году в ЦКБ “Точприбор” под руководством Сидорова В.С., Мовшева А.К., Ямщикова Ю.И. и Шойдина С.А. (ведущий разработчик голографического прицела “Галилей” – Батомункуев Ю.Ц., конструкторы – Кузнецов А.А., Филатов В.Ю., руководитель конструкторского отдела Завадовский Г.П.). Существенным отличием является то, что в оптической схеме прицела “Галилей” используемая голограмма 1 представляет собой простую и широко известную толстую решетку, записанную в слое бихромированной желатины. На эту решетку направляется коллимированная объективом 5 волна от источника излучения 2 – маленького отверстия, освещаемого светодиодом. В отличие от этого оптическая система голографического нивелира не имеет коллимирующего объектива и коллимирование волнового фронта, идущего от источника излучения, осуществляется одним внеосевым объемным ГОЭ. Другим существенным отличием является то, что в качестве источника излучения в прицеле “Галилей” используется светодиод с диафрагмой 2, имеющей маленькое отверстие, а не полупроводниковый лазер, как в схеме голографического нивелира. Эти принципиальные отличия являются причинами существенных недостатков оптической системы прицела “Галилей”. А именно: искаженная светопередача окраски наблюдаемых объектов, из-за довольно низкой спектральной селективности используемой толстой решетки, что недопустимо для нивелиров.

Другим недостатком является возникновение ложного изображения светящейся прицельной марки при отражении от поверхности решетки. В оптической системе голографического нивелира эти недостатки отсутствуют. Основные технические характеристики голографического нивелира:

– Диапазон измерений	от 0,1 до 30 м,
– Линейное увеличение	1 [×] ,
– Угловой размер изображения источника света	±1 минута,
– Дифракционная эффективность ГОЭ, не менее	0,5,
– Длина волны источника света	655 нм,
– Диаметр рабочей области ГОЭ	10 мм,
– Толщина ГОЭ, не более	0,5 мм.

Голографический спектроуказатель предназначен для визуального экспресс обнаружения спектральных линий поглощения и излучения тел.

Существующие аналоги, например, спектроскопы обладают рядом недостатков. К недостаткам следует отнести низкое спектральное разрешение, ограниченное применением в качестве диспергирующих элементов призм, сложную оптическую систему, относительно большие габариты. Идея создания устройства для визуального экспресс обнаружения спектральных линий поглощения и излучения тел на основе объемной решетки была высказана Батомункуевым Ю.Ц., Шойдиным С.А. и Сухановым В.И. в 1991 году [18]. Это устройство, названное визуальным спектроуказателем, отличается от спектроскопа и стилоскопа отсутствием спектральной щели и селекцией одной длины волны при сканировании видимого спектра. Оптическая система

визуального спектроуказателя представлена на рис. 7 и включает в себя объемную голографическую решетку 1, отражающее зеркало 2 и источник излучения – лампочку 3.

К недостаткам этой оптической системы относится наличие источника излучения (лампочки), требующее электрического питания, а также невозможность количественной идентификации наблюдаемых спектральных линий без источника излучения (лампочки). С целью устранения указанных недостатков при наблюдении спектра светящихся объектов нами был разработан вариант конструктивной схемы голографического спектроуказателя на основе использования объемного ГОЭ [19], не требующий наличия лампочки. На рис. 8 представлен голографический спектроуказатель, включающий в себя корпус, оптическую систему. Существенными отличиями оптической системы голографического спектроуказателя от оптической системы визуального спектроуказателя является не только отсутствие электрической части, но и то, что измерительный канал, предназначенный для введения в поле зрения шкалы 4 определения длин волн, включает в себя линзу 3 (лупу). Эта линза 3 формирует изображение шкалы длин волн 4 на расстоянии наилучшего зрения – 250 мм от зрачка наблюдателя. Кроме этого в оптической системе голографического спектроуказателя в качестве диспергирующего элемента используется рассеивающий объемный ГОЭ 1, тогда как в оптической системе визуального спектроуказателя используется простая широко известная объемная решетка.

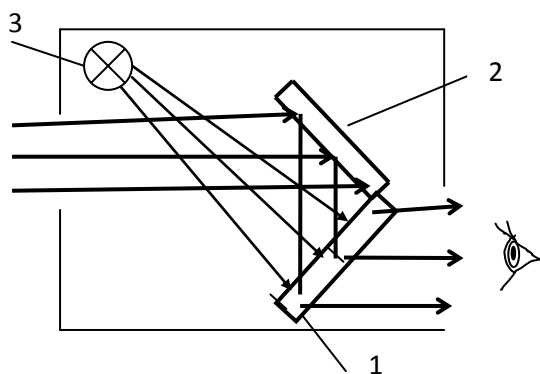


Рис. 7. Оптическая схема визуального спектроуказателя:

1 – объемная голографическая решетка, 2 – отражающее зеркало, 3 – источник света

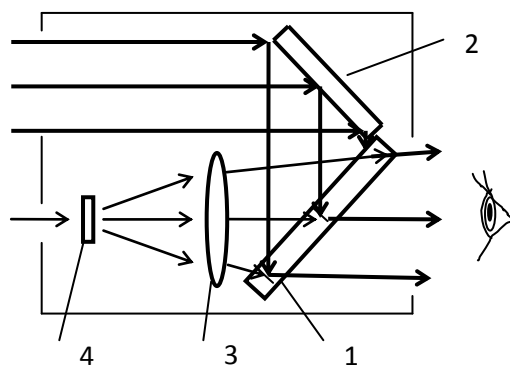


Рис. 8. Голографический спектроуказатель:

1 – объемный ГОЭ, 2 – зеркало, 3 – линза, 4 – шкала длин волн

Еще одним отличием является то, что изображение спектра в голографическом спектроуказателе формируется объемным ГОЭ на расстоянии 250 мм от зрачка наблюдателя на фоне изображения измерительной шкалы длин волн 4. В то время как в визуальном спектроуказателе изображение спектра получается на бесконечности. Основные технические характеристики голографического спектроуказателя:

– Диапазон длин волн	0,4 – 0,8 мкм,
– Угловая дисперсия	$9,6 \cdot 10^{-4}$ 1/нм,
– Линейная дисперсия	0,36 мм/нм,
– Спектральная селективность	0,2 нм,
– Дифракционная эффективность ГОЭ	до 0,6,
– Диаметр рабочей области ГОЭ	30 мм,
– Толщина ГОЭ, не менее	2 мм,

Таким образом, не только особенности дисперсии и оптимальное положение сопряженных плоскостей объемных ГОЭ находят свое объяснение в рамках зеркально-линзовых моделей, но и возникает целый ряд дополнительных особенностей как следствия зеркально-линзовых моделей. Следует отметить, что зеркально-линзовые модели позволяют разрабатывать объемные осевые ГОЭ с помощью самых простых компьютерных программ расчета оптических систем. Рассмотренные два примера практического применения рассчитанных объемных ГОЭ и разработанные на их основе голографический нивелир и голографический спектроуказатель указывают на возможность создания принципиально новых оптических приборов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gabor D. Microscopy by reconstructed wave – fronts // Proc. Roy. Soc. – 1949. –V. 197A, № 1051. – P. 454–487.
2. Денисюк Ю. Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения / Ю. Н. Денисюк // Оптика и спектроскопия – 1963. – Т. 15, № 4. – С. 522–532.
3. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография / Р. Кольер, К. Беркхарт, Л. Лин. – М.: Мир, 1973. – 686 с.
4. Meier R.W. Magnification and third-order aberration in holography // JOSA. – 1965. –V. 55. – P. 987.
5. Champagne E.B. Nonparaxial imaging, magnification and aberration properties in holography // JOSA. – 1967. – V. 57. – P. 51.
6. Мустафин К.С. Аберрации тонких голограмм, изготовленных на сферической подложке / К.С. Мустафин // Оптика и спектроскопия – 1974. – Т. 37. – С. 1158–1162.
7. Forshaw M.R.B. The imaging properties and aberrations of thick transmission holograms // Opt. Acta. –1973. – V. 20, № 9. – P. 669–686.
8. Ган М.А. Теория и методы расчета голограммных и киноформных оптических элементов / М. А. Ган. – Л.: ГОИ, 1984. – 140 с.
9. Sweatt W. C. Describing holographic optical elements as lenses //JOSA – 1977. – V.67, № 6. – P. 803–806.
10. Михайлов И.А. Геометрический анализ толстых голограмм / И.А. Михайлов // Оптика и спектроскопия. – 1985. – № 3. – С. 612–617.
11. Корешев С.Н. Полифункциональность рельефно-фазовых отражательных голограммных оптических элементов / С.Н. Корешев, В.П. Ратушный // Опт. журн. – 2001. – № 12. – С. 28–32.
12. Батомункуев Ю.Ц. Аберрации объемных голограмм / Ю.Ц. Батомункуев, Е.А. Сандер, С.А. Шойдин // Тез. всесоюз. семинара "Автоматизация проектирования опт. систем". – М., 1989. – С. 101–112.

13. Батомункуев Ю.Ц. Особенности расчета схем записи объемных осевых голографических оптических элементов с неизотропной усадкой / Ю.Ц. Батомункуев // *Автометрия* – 2002. – № 2. – С. 108–114.

14. Батомункуев Ю.Ц. Разработка и расчет объемных голографических оптических элементов / Ю.Ц. Батомункуев // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Новосибирск, 2003. – 184 с.

15. Батомункуев Ю.Ц. Зеркально-линзовые модели объемных осевых голограммных оптических элементов / Ю.Ц. Батомункуев // Материалы VII междунар. конф. "Актуальные проблемы электронного приборостроения" АПЭП-2004. – Новосиб., НГТУ, 2004. – Т. 6. – С. 222-225.

16. Спортивно-охотничий голографический прицел "Галилей". Техническое задание на разработку конструкции. ЦКБ "Точприбор" / Ю.Ц. Батомункуев, Г.П. Завадовский, А.А. Кузнецов, А.К. Мовшев, В.С. Сидоров, В.Ю. Филатов, С.А. Шойдин, Ю.И. Ямщиков. – Новосибирск, 1992. – 4 с.

17. Батомункуев Ю.Ц. О возможности применения коллиматорных оптических систем для решения задач геодезии / Ю.Ц. Батомункуев // Тез. докл. междунар. конф. "Сферы применения CPS технологий". – Новосибирск, 1995. – С. 34–35.

18. Батомункуев Ю.Ц. О возможности создания визуального спектроуказателя светящихся тел на основе объемной голографической решетки / Ю.Ц. Батомункуев, С.А. Шойдин, В.И. Суханов // Тез. докл. всесоюз. конф. "Измерения и контроль при автоматизации производственных процессов". – Барнаул, 1991. – С. 115–116.

19. Батомункуев Ю.Ц. Спектроуказатель на основе глубокообъемного голограммного оптического элемента / Ю.Ц. Батомункуев, Н.А. Мещеряков // Материалы VII междунар. конф. "Актуальные проблемы электронного приборостроения" АПЭП-2004 – Новосиб., НГТУ, 2004. – Т. 2. – С. 140-143.

* – статья [13] Батомункуева Ю. Ц. "Особенности расчета схем записи объемных осевых голографических оптических элементов с неизотропной усадкой" поступила в редакцию журнала «Автометрия» 30 марта 2001 года.

** – статья [11] Корешева С.Н., Ратушного В.П. "Полифункциональность рельефно-фазовых отражательных голограммных оптических элементов" поступила в редакцию журнала «Оптический журнал» 21 мая 2001 года.

© Ю.Ц. Батомункуев, Н.А. Мещеряков, 2007

КОНЦЕПЦИЯ И СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ СПЕЦИАЛЬНОСТИ «ОРГАНИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ» В СИБИРСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ АКАДЕМИИ

В 2007 году Институт оптики и оптических технологий Сибирской государственной геодезической академии (далее СГГА) начинает реализацию основной образовательной программы подготовки дипломированного специалиста по специальности «Организация и технология защиты информации» по направлению «Информационная безопасность». Необходимость лицензирования для СГГА указанной специальности Министерством образования и науки России обусловлена множеством факторов, которые возникли вследствие резкого возрастающего влияния информационно-коммуникационных технологий на формирование общества в XXI веке, в том числе проявляющихся на рынке труда Новосибирской области и Сибирского федерального округа, а также возможностями предоставления академией образовательных услуг для информационной сферы Сибири.

В настоящее время наблюдается повышение значимости разнообразной информации, в том числе и картографической, в России как для отдельного человека и коллектива, так для государства и общества в целом. С целью нормализации обстановки в области охраны носителей информации, должной защиты сведений, составляющих определенную тайну, и информационных процессов в Российской Федерации принято множество нормативно-правовых документов. Так, право на информацию (информационное право), как одно из основных прав и свобод человека, закреплено в статье 29 Конституции РФ. Правовая основа деятельности в области связи установлена Федеральным законом «О связи», а регулирование информационных отношений обеспечивается Федеральным законом «Об электронной цифровой подписи». Наиболее значимым стал Федеральный закон от 27 июля 2006 г. № 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации». В данном законе содержится и множество основополагающих понятий (например, информация, обладатель информации, доступ к информации, информационная технология, информационная система, информационно-телекоммуникационная сеть и оператор информационной системы) информационной сферы. Им также регулируются взаимосвязанные отношения, складывающиеся при:

1. Осуществлении права на поиск, получение, передачу, производство и распространение информации;
2. Применении информационных технологий;
3. Обеспечении защиты информации.

В данном законе сформулировано правило, в соответствии с которым федеральными законами устанавливаются условия отнесения информации к сведениям, составляющим ту или иную тайну. Это находит свое отражение в федеральных законах, в частности, таких как «О коммерческой тайне», «О персональных данных» и «О банках и банковской деятельности» (банковская

тайна). Следствием последнего федерального закона является Стандарт Банка России СТО БР ИББС-1.0-2006 «Обеспечение информационной безопасности организаций банковской системы Российской Федерации. Общие положения», который позволяет сформулировать современные требования к уровню знаний и умений специалистов по информационной безопасности.

Значимость существующих и создаваемых законодательных актов возрастает по мере развития электронного бизнеса, охватывающего в разных сочетаниях предприятия, которые производят продукцию и/или предоставляют разнообразные услуги, и потребителей. Благодаря нарождающейся информационно-сетевой экономике возрастает скорость реализации проектов различного назначения (например, связанных с созданием новых типов военной и гражданской техники, гражданского строительства, глобальных энергетических магистралей, транспортных инфраструктур), обращения денег (посредством электронных платежных систем) и возникают новые формы занятости (телетруд или телекомьютинг). Понимание того, что не существует принципиальной разницы между автоматизацией деятельности крупной корпорации и процессов в государстве привело к пересмотру классических моделей государственного управления и формированию моделей электронного правительства (электронного государства), базирующихся на использовании электронных информационных процессов и ресурсов для государственных и местных органов власти, населения, некоммерческих организаций и бизнеса. Основными принципами концепции организации электронного правительства считаются:

1. Открытость;
2. Обратная связь. Данный принцип позволяет отслеживать реакцию населения на деятельность органов власти;
3. «Принцип открытого окна».

Проекты создания и развития электронного правительства разрабатываются во многих странах, в том числе и в России (основой служит федеральная целевая программа «Электронная Россия на 2002–2010 гг.» (<http://www.e-rus.ru>)).

Под воздействием информационной революции Россия, как и другие страны, столкнулась с вызовами и угрозами в информационной сфере. Ответом на них стала Доктрина информационной безопасности России, утвержденная Указом Президента России 9 сентября 2000 г. Согласно доктрине информационная безопасность России – состояние защищенности ее национальных интересов в информационной сфере, определяющихся совокупностью сбалансированных интересов личности, общества и государства.

Проблемы, связанные с повышением информационной безопасности являются сложными, многоплановыми и взаимосвязанными. Учитывая развитие информационно-коммуникационных технологий, требуется постоянное приложение множества усилий по совершенствованию методов и средств, позволяющих достоверно оценивать угрозы безопасности информационной сфере и адекватно реагировать на них. Опасным источником

угроз социальных интересов человека является манипулирование его сознанием посредством создания индивидуального виртуального информационного пространства и технологий воздействия на психическую деятельность. В свете сказанного важным для обеспечения безопасности информационных процессов, информационных ресурсов и информационной экологии становится и повышение уровня образования пользователей в области информатики, повышения квалификации разработчиков, управляющего и обслуживающего персонала информационно-коммуникационных систем, в том числе ориентированных на Интернет с биометрическими технологиями пользовательской идентификации. Кстати, отечественными разработчиками создана биометрическая технология идентификации пользователя на базе его трехмерной фотографии (биометрический паспорт), которая была предложена Международному подкомитету по стандартизации в области биометрии (ISO/IEC JTC1/SC37 Biometrics) и поддержана всеми странами-участниками.

В настоящее время в Российской Федерации в основном подготовлена нормативно-правовая база, регулирующая вопросы информационной безопасности, и возмещения ущерба, причиненного организации. Имеются методики, реализация которых обеспечивает информационную безопасность на организационном уровне. Сейчас доступно для использования множество зарубежных и отечественных инженерно-технических средств распределенной и локальной комплексной защиты объектов информатизации. Успешная реализация в организациях разных форм собственности, на государственном и межгосударственном уровнях требований соответствующих федеральных законов, Указов Президента, Постановлений и Распоряжений Правительства Российской Федерации возможна при участии соответствующих специалистов. В связи с этим подготовка дипломированных специалистов данной категории представляется задачей актуальной, своевременной, отвечающей интересам экономики и государства в целом.

В настоящее время в СГГА имеются квалифицированные преподаватели и определенная лабораторная база, нужные для обучения правовому обеспечению, организации, управлению информационной безопасностью и эксплуатацией защищенных автоматизированных систем и сетей и средств обеспечения защиты информации на объектах информатизации. В частности, для этих целей частично могут быть привлечены ресурсы, обеспечивающие реализацию в течение продолжительного времени подготовки в разных институтах академии специалистов по специальности «Информационные системы и технологии» по направлению «Информационные системы», в рамках которой читается курс «Информационная безопасность и защита информации». Практически все дисциплины новой специальности предполагается проводить на кафедрах академии.

К началу нового учебного года планируется развертывание специализированной лаборатории, материальная база которой позволит проводить со студентами специальностей «Организация и технология защиты информации» и «Информационные системы и технологии» следующий комплекс лабораторных работ.

1. Защита помещений от утечки информации по акустическим и виброакустическим каналам.
2. Исследование характеристик и защита проводных линий связи.
3. Методы и средства защиты телефонных переговоров.
4. Исследование и защита ПЭМИН персональных компьютеров.
5. Защита акустической информации от средств негласной звукозаписи.
6. Защита акустической информации от средств мобильной связи.
7. Исследование систем радиомониторинга.
8. Исследование локаторов нелинейностей.

В рамках данной специальности предусмотрен ряд дисциплин специализации, среди них дисциплина «Технические средства охраны объектов». Она ориентирована на изучение студентами технических средств, используемых для охраны объектов и помещений (производственных и жилых), методик определения необходимого уровня физической безопасности объекта, принципов построения систем охраны с помощью разнообразных технических средств, основных параметров технических средств охраны.

Для обеспечения возможности приобретения студентами практических навыков по дисциплине «Технические средства охраны объектов» начата закупка аппаратных и программных средств охраны объектов разного назначения, в частности, приобретена система видеонаблюдения с необходимым программным обеспечением, устанавливаемом на персональном компьютере с монитором повышенной размерности.

В СГГА имеется возможность организации практик всех видов на базе академии и в филиалах кафедр академии, базирующихся на предприятиях, в учреждениях и организациях, расположенных как в Новосибирской области, так и в других субъектах Российской Федерации.

На наш взгляд, концепция реализации в СГГА учебного процесса по специальности «Организация и технология защиты информации» должна строиться на ключевых принципах системного и компетентностного подходов, а также на принципах системы менеджмента качества, определенных ГОСТ Р ИСО 9000-2001.

Известно, что системный подход является методологическим направлением создания, изучения и эксплуатации сложных объектов разной природы, именуемых системами.

Наиболее важными являются, пожалуй, следующие принципы системного подхода для реализации учебного процесса подготовки дипломированных специалистов:

1. Принцип конечной цели.
2. Принцип элементного (модульного) построения.
3. Принцип единства.
4. Принцип эмерджентности.
5. Принцип иерархии.
6. Принцип достаточного разнообразия.
7. Принцип обратной связи.
8. Принцип развития.

9. Принцип совместимости.
10. Принцип альтернативного принятия решения.
11. Принцип неопределенности.
12. Принцип разумной централизации и децентрализации.

Ныне под компетенцией понимается «способность применять знания, умения и личностные качества для успешной деятельности в определенной области». Различают компетенции общенаучные и специальные, социально-личностные и организационно-управленческие. Усвоенные обучаемым знания, умения и освоенные компетенции – результаты обучения. В связи со сказанным компетентностный подход в образовании ориентирован на будущие требования рынка труда. Об этом свидетельствуют и разрабатываемые в настоящее время федеральные государственные образовательные стандарты высшего профессионального образования по различным направлениям подготовки.

Основу стандартов на системы менеджмента качества составляют восемь принципов (ГОСТ Р ИСО 9000-2001):

1. Ориентация на потребителя. Так как деятельность организации зависит от своих потребителей, необходимо понимать их текущие и будущие потребности, выполнять их требования и стремиться превзойти их ожидания.

2. Лидерство руководителя. Руководители обеспечивают единство цели и направления деятельности организации. Им следует создавать и поддерживать внутреннюю среду, в которой работники могут быть полностью вовлечены в решение задач организации.

3. Вовлечение работников. Полное вовлечение работников всех уровней дает возможность организации с выгодой использовать их способности. В организации необходимо стимулировать лишь работников, улучшающих продукцию, процессы.

4. Процессный подход. Желаемый результат достигается эффективнее, когда деятельностью и соответствующими ресурсами управляют как процессом. В соответствии со стандартом ГОСТ Р ИСО 9000-2001 процесс – это совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих видов деятельности, преобразующих входы в выходы.

5. Системный подход к менеджменту. Выявление, понимание и менеджмент взаимосвязанных процессов как системы содействуют результативности и эффективности организации при достижении ее целей.

6. Постоянное улучшение. Постоянное улучшение деятельности организации в целом следует рассматривать как ее неизменную цель.

7. Принятие решений, основанное на фактах. Эффективные решения основываются на анализе данных и информации.

8. Взаимовыгодные отношения с поставщиками. Организация и ее поставщики взаимосвязаны и отношения взаимной выгоды повышают способность обеих сторон создавать ценности.

Стратегия развития специальности «Организация и технология защиты информации», позволяющая реализовать предложенную концепцию, связана с решением множества разнообразных по своей значимости задач. Первоочередными, на наш взгляд, являются следующие задачи.

1. Формирование современной учебно-методической, информационной и лабораторной базы по информационной безопасности и ее непрерывное поддержание на высоком уровне за счет:

- Приобретения постоянно обновляемого лицензионного программного обеспечения;

- Оснащения современными приборами, микроконтроллерами, средствами биометрической идентификации пользователей и другой необходимой аппаратурой;

- Формирования специализированной аудиовизуальной мультимедийной лаборатории, оснащенной интерактивной электронной доской;

- Подготовки и публикации традиционных и электронных лабораторных практикумов, учебных комплексов по дисциплинам, поддерживаемым созданной технической и программной базой;

- Приобретения обязательной учебной, справочной и научной литературы, журналов и информационных материалов в необходимом количестве;

- Организации доступа каждого студента к базам данных и библиотечным фондам;

- Разработки, изготовления и использования автоматизированных стендов, обеспечивающих подготовку и переподготовку специалистов как на площадях СГГА и их отделениях (Калининском и Заельцовском), так и в форме интернет-обучения;

- Краткосрочной взаимовыгодной аренды современного оборудования фирм и предприятий.

2. Организация учебного процесса на основе интеграции науки, образования и производства.

3. Кадровая политика:

- Создание благоприятных условий для работы студентов, аспирантов и молодых преподавателей;

- Привлечение по совместительству инженерно-преподавательского состава к занятиям по ключевым дисциплинам специальности;

- Поддержка подготовки лицензированных и сертифицированных педагогических кадров по информационной безопасности и охране объектов информатизации организаций и интеллектуальных зданий.

4. Мониторинг компетенций студентов в области информационной безопасности и охраны объектов. С этой целью необходимо создание комплекта контролирующих материалов для студентов.

5. Сотрудничество в области информационной безопасности:

- С кафедрами СГГА и других вузов;

- Институтами СО РАН;

- Структурами ИТ-парка города Новосибирска;

- Кадастровыми подразделениями мэрии города Новосибирска и областной администрации;

- Федеральными структурами Сибирского федерального округа (ФСТЭК, ФСБ и др.);
 - УМО высших учебных заведений Российской Федерации по образованию в области информационной безопасности;
 - Отечественными организациями различных форм собственности;
 - Зарубежными вузами и организациями.
6. Организация инженерных работ и научных исследований:
- Разработка и продвижение комплексных проектов по информационной безопасности;
 - Проведение научно-исследовательских работ по моделированию систем защиты информации и охраны территориально распределенных объектов информатизации организаций различных форм собственности с целью обеспечения повышения научного потенциала и значимости СГГА в Сибирском регионе.

© Г.А. Сырецкий, О.К. Ушаков, 2007

УДК 621.396

А.С. Толстиков

ФГУП СНИИМ, Новосибирск

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ КООРДИНАТНО-ВРЕМЕННЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ, ОСНОВАННЫЕ НА ПРИМЕНЕНИИ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Задачи координатно-временных определений, решаемые на основе применения спутниковых навигационных систем (СНС), можно разделить на задачи прямого назначения СНС и задачи, обеспечивающие функционирование самих СНС. Последние в основном направлены на формирование эфемеридно-временного обеспечения (ЭВО) СНС. В частности, это:

- Восстановление орбит навигационных спутников (НС) по результатам траекторных измерений для последующего прогнозирования движения орбитальной группировки НС;
- Оценивание параметров вращения Земли (ПВЗ) по данным измерений и последующее прогнозирование ПВЗ;
- Оценивание уходов шкал времени бортовых часов НС для расчета соответствующих частотно-временных поправок;
- Синхронизация пространственно разнесенных часов беззапросных измерительных станций, осуществляющих траекторные измерения по орбитальной группировке НС для целей ЭВО.

Как правило, к обеспечивающим задачам предъявляются более высокие требования точности в части траекторных измерений и требуется привлечение адекватных математических моделей процессов и объектов для высокоточного прогнозирования состояний отдельных сегментов СНС. Все это обеспечивает

точное решение задач прямого назначения СНС и увеличивает автономность функционирования спутникового сегмента СНС.

Решение перечисленных обеспечивающих задач сводится к статистическому оцениванию постоянных параметров или состояний процессов и объектов, функционально связанных с измеренными навигационными параметрами. С позиций анализа причинно-следственных связей, перечисленные задачи относятся к классу обратных задач некорректно поставленных по Адамару. Это обстоятельство заставляет:

- Использовать принципы регуляризации в применяемых методах и алгоритмах,
- Привлекать описание процессов и объектов в качестве дополнительных условий на выбор статистических решений.

Перечисленные выше задачи координатно-временных определений в отмеченных специфичных условиях предлагается решать на основе общей методологии, основная идея которой заключается в оценивании расширенного вектора состояния некоторого, подлежащего исследованию динамического объекта по результатам траекторных измерений.

Предполагается, что на объект действует группа возмущений, которые можно представить согласующими математическими моделями с неопределенными в общем случае параметрами. На результаты измерений, помимо информационных сигналов, действует группа факторов, порождающих дополнительные погрешности измерений. Действие указанных факторов также представляется согласующими математическими моделями с неопределенными параметрами.

В соответствии с предлагаемой методологией описание исследуемого динамического объекта дополняется уравнениями согласующих математических моделей, описывающих действующие на объект возмущения и уравнениями факторов, влияющих на результаты измерений. При этом неопределенные параметры влияющих факторов вводятся в состав расширенного вектора состояния исследуемого объекта. Этот расширенный вектор состояния оценивается по результатам измерений с помощью тех или иных алгоритмов оценивания.

В общем случае исследуемый динамический объект описывает обыкновенным дифференциальным уравнением

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{s}, \mathbf{w}, t), \quad \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0, \quad (1)$$

где $\mathbf{x} - n \times 1$ – вектор состояния объекта;

$\mathbf{f}() - n \times 1$ – известная гладкая вектор-функция, причем $\mathbf{f}(\mathbf{0}, \mathbf{0}, \mathbf{0}, t) = \mathbf{0}$;

$\mathbf{s} - m \times 1$ – вектор действующих на объект моделируемых возмущений, которые могут быть идентифицированы с помощью тех или иных согласующих математических моделей;

$\mathbf{w} - l \times 1$ – вектор возмущений случайной природы.

Считаем, что измерению доступен $k \times 1$ – мерный вектор $\mathbf{z}$, связанный с вектором состояния $\mathbf{x}$ объекта исследований (1) уравнением измерений

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{v}, t), \quad (2)$$

где $\mathbf{h}()$ – известная вектор-функция размерности $k \times 1$, причем $\mathbf{h}(\mathbf{0}, \mathbf{0}, \mathbf{0}, t)$;

$\mathbf{p} - q \times 1$ – мерный вектор моделируемых факторов, влияющих на точность измерений $\mathbf{z}$;

$\mathbf{v} - g \times 1$ – вектор немоделируемых погрешностей измерений случайной природы.

Моделируемые возмущения $\mathbf{S}$, действующие на объект и факторы $\mathbf{p}$, влияющие на точность измерений, могут быть идентифицированы с помощью тех или иных согласующих математических моделей.

Анализ действующих на объект возмущений $\mathbf{S}$ и факторов $\mathbf{p}$, влияющих на точность траекторных измерений, проведенный в рамках задач координатно-временных определений, позволил выделить два типа согласующих математических моделей:

– Статические модели в виде известных функциональных зависимостей и

$$\tilde{\mathbf{s}}(t) = \mathbf{F}_s(\boldsymbol{\alpha}, t) \quad \text{а),}$$

$$\tilde{\mathbf{p}}(t) = \mathbf{F}_p(\boldsymbol{\beta}, t) \quad \text{в);} \quad (3)$$

– Динамические модели, описываемые линейными дифференциальными уравнениями

$$\dot{\tilde{\mathbf{s}}}(t) = \mathbf{G}_s(\boldsymbol{\alpha}) \cdot \tilde{\mathbf{s}}(t) + \mathbf{B}_s(\boldsymbol{\alpha}) \cdot \xi_s(t), \tilde{\mathbf{s}}(t_0) = \tilde{\mathbf{s}}_0, \text{ а)}$$

$$\dot{\tilde{\mathbf{p}}}(t) = \mathbf{G}_p(\boldsymbol{\beta}) \cdot \tilde{\mathbf{p}}(t) + \mathbf{B}_p(\boldsymbol{\beta}) \cdot \xi_p(t), \tilde{\mathbf{p}}(t_0) = \tilde{\mathbf{p}}_0, \text{ в);} \quad (4)$$

где $\mathbf{F}_s(\boldsymbol{\alpha}, t)$, $\mathbf{F}_p(\boldsymbol{\beta}, t)$ – известные функции,

$\mathbf{G}_s(\boldsymbol{\alpha}), \mathbf{B}_s(\boldsymbol{\alpha})$, $\mathbf{G}_p(\boldsymbol{\beta}), \mathbf{B}_p(\boldsymbol{\beta})$ – известные матрицы, зависящие от векторов параметров $\boldsymbol{\alpha}$ и $\boldsymbol{\beta}$,

$\xi_s(t)$ и $\xi_p(t)$ – случайные процессы гауссовского типа с математическими ожиданиями $M[\xi_s(t)]$, $M[\xi_p(t)]$ и ограниченными ковариациями.

Для статических (3) и динамических (4) моделей при известных функциях $\mathbf{F}_s(\boldsymbol{\alpha}, t)$, $\mathbf{F}_p(\boldsymbol{\beta}, t)$ и известных структурах матриц $\mathbf{G}_s(\boldsymbol{\alpha}), \mathbf{B}_s(\boldsymbol{\alpha})$, $\mathbf{G}_p(\boldsymbol{\beta}), \mathbf{B}_p(\boldsymbol{\beta})$ в рассматриваемой задаче остаются неизвестными параметры $\boldsymbol{\alpha}$ и $\boldsymbol{\beta}$. Это

обстоятельство приводит к необходимости идентификации указанных параметров по измерениям $\mathbf{z}(t)$ одновременно с оцениванием состояний самого объекта.

В частности, зависимостями вида (3) описываются ионосферная и тропосферные задержки, радиационное давление на НС от солнечного излучения; возмущения от нецентральности гравитационного поля Земли, гравитационные воздействия Луны и Солнца, долговременные неустойчивости бортовых часов и часов приемной аппаратуры.

Дифференциальными уравнениями вида (4) описывается возмущенное движение НС по орбите, кратковременные неустойчивости бортовых часов и часов приемной аппаратуры, уходы бортовых шкал, движение высокودинамичных объектов, траектория которых восстанавливается по данным траекторных измерений.

Важной особенностью рассматриваемой задачи оценивания состояния является возможность введения в рассмотрение опорной траектории движения исследуемого объекта $\mathbf{x}_\delta$, полученной расчетным путем в соответствии с уравнением

$$\dot{\mathbf{x}}_\delta = \mathbf{f}(\mathbf{x}_\delta, \mathbf{s}_\delta, \mathbf{0}, t), \mathbf{x}_\delta(t_0) = \mathbf{x}_{\delta 0}. \quad (5)$$

В (5) $\mathbf{s}_\delta$ – некоторое опорное расчетное представление действующих на объект возмущений, рассчитываемое в соответствии с принятой математической моделью, в которой применены параметры первого приближения $\mathbf{a}_\delta$.

Для опорной траектории $\mathbf{x}_\delta$ рассчитывается в соответствии с уравнением

$$\mathbf{z}_\delta = \mathbf{h}(\mathbf{x}_\delta, \mathbf{p}_\delta, \mathbf{0}, t) \quad (6)$$

опорная компенсирующая поправка $\mathbf{z}_\delta$ к наблюдаемому сигналу $\mathbf{z}$. В (6) для влияющих факторов используется опорное расчетное представление $\mathbf{p}_\delta$, вычисляемое в соответствии с принятой согласующей математической моделью, в которой применены параметры первого приближения $\mathbf{b}_\delta$.

Наличие опорной траектории $\mathbf{x}_\delta$ и опорного сигнала $\mathbf{z}_\delta$ позволяет рассматривать относительное движение объекта $\Delta \mathbf{x} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_\delta$ вдоль опорной траектории $\mathbf{x}_\delta$, удовлетворяющие линеаризованному уравнению движения,

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_x \cdot \Delta \mathbf{x} + \mathbf{A}_s \cdot \Delta \mathbf{s} + \mathbf{B}_x \cdot \mathbf{w}, \Delta \mathbf{x}(t_0) = \Delta \mathbf{x}_0, \quad (7)$$

$$\Delta \mathbf{z} = C_x \cdot \Delta \mathbf{x} + C_s \cdot \Delta \mathbf{s} + C_p \cdot \Delta \mathbf{p} + D_z \cdot \mathbf{v}, \quad (8)$$

$$\text{где } A_x = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}_\delta}; A_s = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}_\delta} \frac{\partial \mathbf{x}_\delta}{\partial \mathbf{s}}; B_x = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{w}};$$

$$C_x = \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}_\delta}; C_s = \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}_\delta} \frac{\partial \mathbf{x}_\delta}{\partial \mathbf{s}}; C_p = \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{p}}; D_z = \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{v}};$$

матрицы частных производных. Разности

$$\Delta \mathbf{s} = \tilde{\mathbf{s}} - \mathbf{s}_\delta, \Delta \mathbf{p} = \tilde{\mathbf{p}} - \mathbf{p}_\delta$$

представляют собой смещения выходных координат принятых математических моделей, порожденные отлиааем опорных параметров от оптимальных

$$\Delta \mathbf{a} = \mathbf{a} - \mathbf{a}_\delta, \Delta \mathbf{\beta} = \mathbf{\beta} - \mathbf{\beta}_\delta.$$

Полученное линеаризованное уравнение измерений (8), связывающее наблюдаемый вектор $\Delta \mathbf{z} = \mathbf{z} - \mathbf{z}_\delta$ и подлежащие оцениванию векторы $\Delta \mathbf{x}, \Delta \mathbf{s}, \Delta \mathbf{p}$, может быть представлено в компактной форме

$$\Delta \mathbf{z} = C \cdot \mathbf{Y} + D \cdot \mathbf{v}, \quad (9)$$

где $\mathbf{Y}^T = [\Delta \mathbf{x}^T, \Delta \mathbf{s}^T, \Delta \mathbf{p}^T]$ расширенный вектор состояния, подлежащий оцениванию,

$$C = \begin{pmatrix} C_x & C_s & C_p \end{pmatrix} - \text{блочная матрица.}$$

Для решения задачи оптимального оценивания компонент $\Delta \mathbf{s}, \Delta \mathbf{p}$ расширенного вектора состояния $\mathbf{Y}$ линеаризованное уравнение движения объекта (7) должно быть дополнено уравнениями принятых согласующих математических моделей (4).

В результате описание объекта исследований с расширенным вектором состояния примет вид

$$\dot{\mathbf{Y}} = A \cdot \mathbf{Y} + B \cdot \mathbf{W}, \mathbf{Y}(t_0) = [\Delta \mathbf{x}_0^T, \Delta \mathbf{s}_0^T, \Delta \mathbf{p}_0^T] \quad (10)$$

где $A; B; \mathbf{W}$ – блочные матрицы.

Таким образом, рассматриваемые обеспечивающие задачи координатно-временных определений по результатам траекторных измерений сведены к оцениванию расширенного $(n + m + q) \times 1$ – мерного вектора $\mathbf{Y}$ линейного динамического объекта (10) по измерениям, представленным $k \times 1$ – мерным вектором измерений

$$\Delta \mathbf{z} = \mathbf{z} - \mathbf{z}_\delta.$$

Сама задача текущего оценивания вектора $\mathbf{Y}$ в отдельных редких случаях при $k \geq n + m + q$ может быть решена одномоментно на основе метода наименьших квадратов при условии, что ранг матрицы C не меньше, чем $n + m + q$ [1].

В специфичных условиях существования решения уравнения (10) при условии наблюдаемости объекта [2] задача оценивания вектора $\mathbf{Y}$ может быть сведена к оцениванию начальных условий $\mathbf{Y}(t_0)$ и последующему интегрированию уравнения (10) для получения оценки $\hat{\mathbf{Y}}$.

Трудоемкий в вычислительном отношении, но эффективный по точности метод «квазилинеаризации» [2] позволяет после 1-й – 2-х итераций использовать в качестве оценки вектора $\hat{\mathbf{Y}}$ рассчитанную опорную траекторию $\mathbf{Y}_\delta$.

При наличии достаточного объема априорной информации о вероятностных характеристиках действующих помех и возмущений достаточно эффективным для оценивания расширенного вектора состояния $\mathbf{Y}$ линейного динамического объекта (10) по измерениям $\Delta \mathbf{z} = \mathbf{z} - \mathbf{z}_\delta$ будет применение рекуррентных процедур оптимальной калмановской фильтрации [2].

В заключении отметим, методология решения задач координатно-временных определений путем введения неизвестных моделируемых параметров в разряд оцениваемых достаточно часто применяется в задачах восстановления текущих навигационных параметров КА в условиях действия возмущений и влияющих факторов [1]. Для этой методологии своего решения требуют вопросы принципиальной разрешимости самой задачи и исследования точности получаемых оценок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Уравнение и навигация искусственных спутников Земли на околокруговых орбитах / Решетнев М.Ф., Лебедев А.А., Бартенев В.А. и др. – М.: Машиностроение, 1988. – 336 с.
2. Идентификация систем уравнения / Сейдж Э.П., Мелса Д.Л. – М.: Наука, 1974. – 248 с.

© А.С. Толстиков, 2007

О СТРУКТУРЕ ВИЗУАЛЬНОГО ПРОСТРАНСТВА

Известно, что изображение окружающей среды, получаемое от камеры, снабженной оптическим объективом, не соответствует естественному зрительному восприятию той же среды человеком. Показано, что искажения масштабов предметов и глубины пространства могут достигать сотни процентов, как на малых, так и на больших расстояниях [1]. Ошибки происходят из-за того, что объектив камеры строит *двумерное* (2М) изображение с фиксированным фокусным расстоянием, в то время как зрительная сенсорная система создает *трехмерное* (3М) изображение, работая с переменным фокусным расстоянием [2]. При этом в сознании человека формируется визуальное пространство, внутренняя геометрия которого является гиперболической геометрией Лобачевского [3].

Визуальное пространство (ВП) может быть представлено как конечный результат ряда процессов: физических, физиологических, психофизических и когнитивных [3]. Процесс видения можно условно разделить на три этапа:

1. Сбор информации сенсорной подсистемой зрения;
2. Построение сенсорной модели;
3. Формирование собственно ВП.

На первом этапе путем сканирования пространства предметов остронаправленным взглядом [2], во-первых, строится 2М сетчаточный образ пространства. Во-вторых, оцениваются расстояния до предметов по признакам глубины – прямым и косвенным. Прямые признаки глубины стимулируют аккомодацию глаз, их конвергенцию и стереоскопическую диспаратность. К косвенным признакам относят: окклюзии; уменьшение размеров и смещение к горизонту предметов при их удалении; уменьшение контраста и градиента текстуры при увеличении расстояния; двигательный параллакс. Практика показывает, что сенсорная подсистема дает верную информацию о расстояниях до предметов, причем с необходимой для зрительной системы точностью.

На втором этапе построения ВП сетчаточный образ согласно психофизическому закону Эммерта испытывает «растяжение» по размеру и глубине, пропорционально воспринимаемым расстояниям до предметов. Как показано в [2,3] эти расстояния определяются оптической силой редуцированного аккомодирующего глаза, представленного в виде тонкой линзы

$$1/f = 1/r + 1/d, \quad (1)$$

где f – фокусное расстояние; r – расстояние до предмета; d – гиперфокальное расстояние, или «начало» бесконечности. Величина d – это личностная константа наблюдателя, варьируемая в пределах от 3 до 6 м. Если учесть фиксацию предметов в разных точках пространства, заданного в

полярной системе r, θ, φ с началом координат в центре проекции, то можно получить преобразование вида [3]

$$q = fm = \frac{rc}{r+d}, \theta_q = \theta, \varphi_q = \varphi, \quad (2)$$

где q – воспринимаемое расстояние; m – масштабный коэффициент; $c = dm$; θ_q, φ_q – угловые координаты. Итак, на втором этапе при помощи (2) строится пространственный образ окружающей среды, или проективная сенсорная модель.

В [2, 3] обнаружено совпадение сенсорной модели с моделью пространства Лобачевского по Клейну в определении плоскости, прямой и движений [4]. Тождественность моделей дает основание считать, что ВП имеет неевклидову метрику. Через изображение на модели оба пространства – Евклида и Лобачевского – оказываются взаимно-однозначно связанными. Таким образом, преобразование (2) переводит евклидово пространство в пространство модели Клейна. При $r \rightarrow \infty$ $q \rightarrow c$ и поэтому пространство на модели Клейна занимает внутренность шара с радиусом c .

От модели Клейна легко перейти к модели Пуанкаре с помощью стереографической проекции [4]. При этом возникает конформное отображение вида

$$p = \frac{2q}{1 + \sqrt{1 - (q/c)^2}}, \theta_p = \theta_q, \varphi_p = \varphi_q. \quad (3)$$

При $r \rightarrow \infty$, $q \rightarrow c$ $p \rightarrow 2c$ и, таким образом, пространство на модели Пуанкаре занимает внутренность шара с радиусом $2c$.

Наконец, от моделей Клейна и Пуанкаре можно перейти к гиперболическому пространству Лобачевского [3]

$$\rho = c \operatorname{Arth}(q/c) = 2c \operatorname{Arth}(p/2c) = \frac{c}{2} \ln \left(1 + 2 \frac{r}{d} \right), \theta_\rho = \theta_q = \theta_p = \theta, \varphi_\rho = \varphi_q = \varphi_p = \varphi. \quad (4)$$

Таким образом, на третьем этапе процесса видения формируется визуальное пространство, внутренняя геометрия которого является неевклидовой. Полная гауссова кривизна ВП постоянна и равна $K = 1/(ic)^2$, где ic – мнимый радиус. ВП – метрическое пространство, которое локально евклидово. Несмотря на «мнимость» координатных поверхностей, расстояние между двумя точками вдоль прямой, или геодезической является действительной величиной. Формулы (2, 3, 4) определяют расстояние до точки вдоль радиального направления от начала координат – оптического центра глаза. Этого достаточно для построения и исследования пространственного образа трехмерной сцены.

Дальнейшее уточнение рассмотренных моделей связано с проблемой «иллюзии Луны». Эта проблема занимает умы ученых более 20 веков и остается нерешенной до настоящего времени. В структуре изотропного ВП «бесконечно» удаленные объекты такие, как звезды, солнце и луна, располагаются на поверхности, близкой к предельной сфере, *орисфере*, а значит, по закону

Эммерта имеют размеры, независимые от возвышения над горизонтом. Но на деле это не так. Всем известно, что на восходе или закате луна и солнце больше, чем в средней части неба или в зените. В [3] отмечено, что возникает анизотропия ВП по углу возвышения, или широте θ , и это показано в экспериментах Кауфманов с искусственными лунами [5]. При $\theta = 45^\circ$ среднее расстояние до предельной поверхности равно $d = 3.65$ м, что в 1.5 раза меньше, чем при $\theta = 1.5^\circ$ ($d = 5.47$ м). К сожалению, по двум точкам Кауфманов невозможно определить достоверный вид предельной поверхности. Однако можно предположить, что – это не сфера, а равномерно сжатая по вертикали сфера, или сфероид.

В [6] рассмотрена модель анизотропного визуального пространства, занимающая внутреннюю область сфероида. Пусть в прямоугольной декартовой системе координат XYZ задан сжатый эллипсоид вращения (сфероид) каноническим уравнением вида

$$(x^2 + z^2)/a^2 + y^2/b^2 = 1, \quad (5)$$

где a – большая полуось; b – малая полуось. В полярной системе координат, начало которой совпадает с оптическим центром глаза, сфероид может быть задан гиперфокальным расстоянием d_θ , широтой θ и долготой φ

$$d_\theta = \frac{ab}{\sqrt{a^2 \sin^2 \theta + b^2 \cos^2 \theta}}, \quad \theta = \arctg\left(\frac{y}{\sqrt{x^2 + z^2}}\right), \quad \varphi = \arctg\left(\frac{z}{x}\right). \quad (6)$$

Отображение евклидовой точки r, θ, φ в область сфероиды запишем в виде

$$g = \frac{rd_\theta}{r + d_\theta}, \quad \theta_g = \theta, \quad \varphi_g = \varphi, \quad (7)$$

где g – радиальное расстояние от наблюдателя до изображения точки. Очевидно, что расстояние g не может превысить гиперфокальное расстояние d_θ , поскольку при $r \rightarrow \infty$ $g \rightarrow d_\theta$. Спроектируем все видимые точки евклидового пространства внутрь сфероиды (6) и получим, с одной стороны, изображение окружающей среды, а, с другой – анизотропную модель ВП, совпадающую с моделью гильбертова гиперболического пространства. Во всех горизонтальных гиперплоскостях, параллельных плоскости визирования $\theta_g = \theta = 0$, модель становится изотропной и совпадает с моделью Клейна для плоскостей Лобачевского. При надлежащем выборе аффинных координат $\chi = x/a$, $v = y/b$, $\zeta = z/a$ уравнение сфероиды (5) можно записать в виде $\chi^2 + v^2 + \zeta^2 = 1$. Тогда и в любом меридиональном сечении сфероиды эллипс можно рассматривать как единичную окружность в евклидовой метрике. Итак, с точностью до аффинного преобразования гильбертово пространство совпадает с пространством Лобачевского. Это означает, что наряду с проективной моделью согласно (7) можно построить и конформное отображение Пуанкаре вида

$$p = 2c \frac{g/d_\theta}{1 + \sqrt{1 - (g/d_\theta)^2}}, \quad \theta_p = \arctg\left(\frac{a}{b} \tg \theta\right), \quad \varphi_p = \varphi, \quad (8)$$

где $c > 0$ – радиус гауссовой кривизны, определенной выше.

На рис. показано проективное (а) и конформное (б) изображение глобальной структуры анизотропного пространства в меридиональном сечении.

Начало координат ассоциируется с расположением внутреннего «Я» наблюдателя, главная зрительная ось совпадает с координатной осью Z .

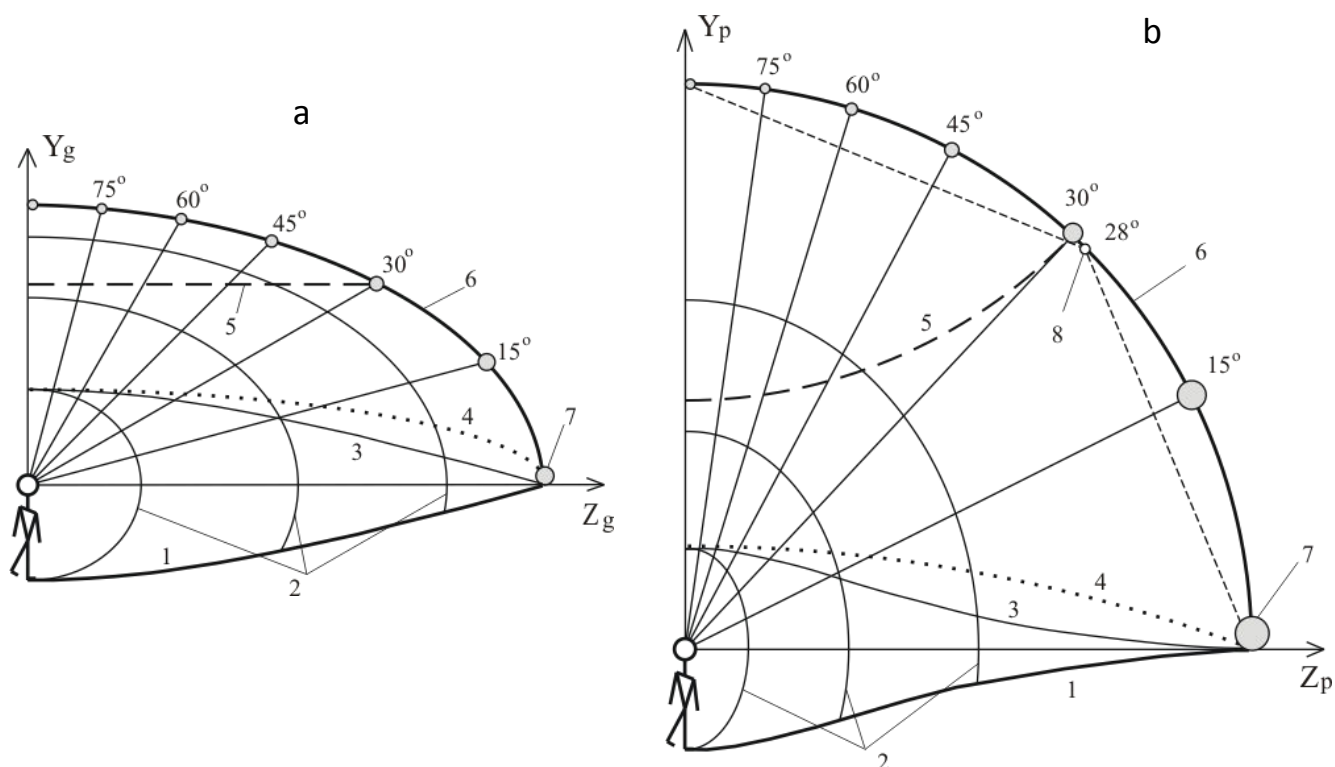


Рис.1 Анизотропное ВП: а – проективная модель; б – конформная модель:

- 1 – земля; 2 – окружности; 3 – евклидова параллель оси Z ; 4 – эквидистанта;
5 – геодезическая; 6 – небосвод; 7 – луна на закате; 8 – бисекция небосвода

Отличие визуального пространства в том, что в окрестности наблюдателя оно изоморфно и даже изометрично евклидовому пространству. Поэтому на малых расстояниях (до 2–4 м) предметы воспринимаются практически в натуральных размерах. На больших расстояниях (более 10 м) предметы в 2–4 раза больше «оптических». Если предметами являются луна или солнце, то их размер пропорционален гиперфокальному расстоянию d_θ . Из (6) относительное увеличение (по отношению к зениту) в сенсорной модели равно

$$V_\theta = \frac{d_\theta}{b} = \frac{1}{\sqrt{1 - \varepsilon^2 \cos^2 \theta}}, \quad (9)$$

где $\varepsilon = \sqrt{1 - b^2/a^2}$ – эксцентриситет сфероида. При конформном отображении возникает угловое увеличение, равное V_θ^2 [6]. Луна (солнце) на горизонте больше, чем в зените в 1.87–3.5 раза. В расчетах использовался сфероид с полуосями: $a = 2.927$ м и $b = 5.475$ м, которые получены по усредненным данным экспериментов Кауфманов [5].

Дальнейшее уточнение рассмотренных моделей связано, во-первых, с экспериментальным определением формы предельной поверхности ВП,

которая, в сущности, является личностной функцией наблюдателя. Во-вторых, требуется выявление особенностей бинокулярного зрения на расстояниях меньше 1 м, где проявляется эффект обратной перспективы.

В заключении необходимо отметить некоторые существенные, на наш взгляд, области приложения полученных знаний:

1. общая теория перспективы, как искусство изображения на плоскости трехмерного пространства, приближенного к естественному зрительному восприятию. Разработка групп линейных и нелинейных перспектив, в том числе для компьютерной графики и 3М дисплеев с ограниченной глубиной дисплейного пространства;

2. конвергенция технического и когнитивного зрения. Разработка систем когнитивного зрения в узком и широком смысле этого слова. Когнитивное зрение в узком смысле – это достоверное, естественное и комфортное зрительное восприятие для надежного распознавания визуальной обстановки человеком-оператором при решении задач визуального контроля и управления, в том числе дистанционного. Когнитивное зрение в широком смысле – это техническое зрительное восприятие и распознавание образов, обучение и встраивание в различные системы с искусственным интеллектом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ковалев А.М. Оценка искажений предметов при отображении перцептивного пространства на картинную плоскость / А.М. Ковалев // Автометрия. – 2004. – Т. 40. – № 6. – С. 87–100.
2. Ковалев А.М. О моделях визуального пространства / А.М. Ковалев // Оптика и спектроскопия. – 2006. – Т. 100. – № 1. – С. 134–141.
3. Ковалев А.М. Описание визуального пространства в моделях Клейна и Пуанкаре/ А.М. Ковалев // Автометрия. – 2006. – Т. 42. – № 4. – С. 57–66.
4. Клейн Ф. Неевклидова геометрия / Ф. Клейн. – М.;Л.: ОНТИ, 1936.
5. Kaufman L., Kaufman J.H. Explanation the moon illusion // Proceedings of the National academy of Sciences of the USA. 2000. 97, № 1. – С. 500–505.
6. Ковалев А.М. Об анизотропной модели визуального пространства/ А.М. Ковалев // Автометрия. – 2006. – Т. 42. – № 6. – С. 53–62.

© А.М. Ковалев, 2007

УДК 621.397: 621.391.8

В.В. Малинин, З.М. Цетиногова

СГГА, Новосибирск

Г.Н. Попов, Г.А. Моисеенко

ФГУП «ЦКБ "Точприбор"», Новосибирск

В.В. Моисеенко

ИВМиМГ СО РАН, Новосибирск

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ПРИБОРОВ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ

Приборы ночного видения (ПНВ) можно разделить на группы:

- *Пассивные ПНВ* обнаружения, наведения и прицеливания, основанные на регистрации собственного или отраженного излучения на фоне местности при естественной ночной освещенности (ЕНО);
- *Активно-непрерывные ПНВ* обнаружения и распознавания с использованием непрерывной подсветки объекта наблюдения специальным источником излучения (например, лазером). Применение полупроводниковых излучателей в качестве источников подсветки для ПНВ существенно улучшает их способность наблюдения в условиях слабой освещенности;
- *Активно-импульсные ПНВ* с использованием импульсного метода наблюдения специальным источником излучения (например, лазером). Он сводится к импульсной подсветке объектов наблюдения излучением лазерного осветителя. При этом синхронно управляется (сорбируется) затвор импульсного электронно-оптического преобразователя (ЭОП), установленного в приемной части прибора.

Задача доклада состоит в том, чтобы дать принципы метода математического описания ПНВ и компьютерной оценки дальности распознавания объекта наблюдения, а также показать перспективу его развития.

Базовая функциональная схема ПНВ приведена на рис. 1. С точки зрения преобразования информации целесообразно рассматривать пять составляющих ПНВ: внешние условия; входной объектив ОС-1; ЭОП; телевизионный тракт (ТВТ); излучатель. Перечень параметров этих составляющих, учитываемых при расчете дальности распознавания, приведен в табл. 1. Методы измерения некоторых параметров описаны в ГОСТ [11].

При расчете значения дальности распознавания в пассивном режиме используется итеративный метод вычислений. На k -м шаге используется значение дальности и значения промежуточных вычислений, рассчитанные на $(k-1)$ -м шаге. Итерации выполняются до достижения заданного значения допустимой погрешности Δ_L (рис. 2). Если это условие не выполняется, то пересчитываются следующие коэффициенты: прозрачности атмосферы τ_a , яркости дымки k_d , яркости атмосферы k_a , потери контраста в системе k_n . На нулевой итерации принимается, что $\tau_a, k_d, k_a = 1$. На следующих итерациях эти коэффициенты вычисляются по формулам, которые здесь не приводятся для экономии места.

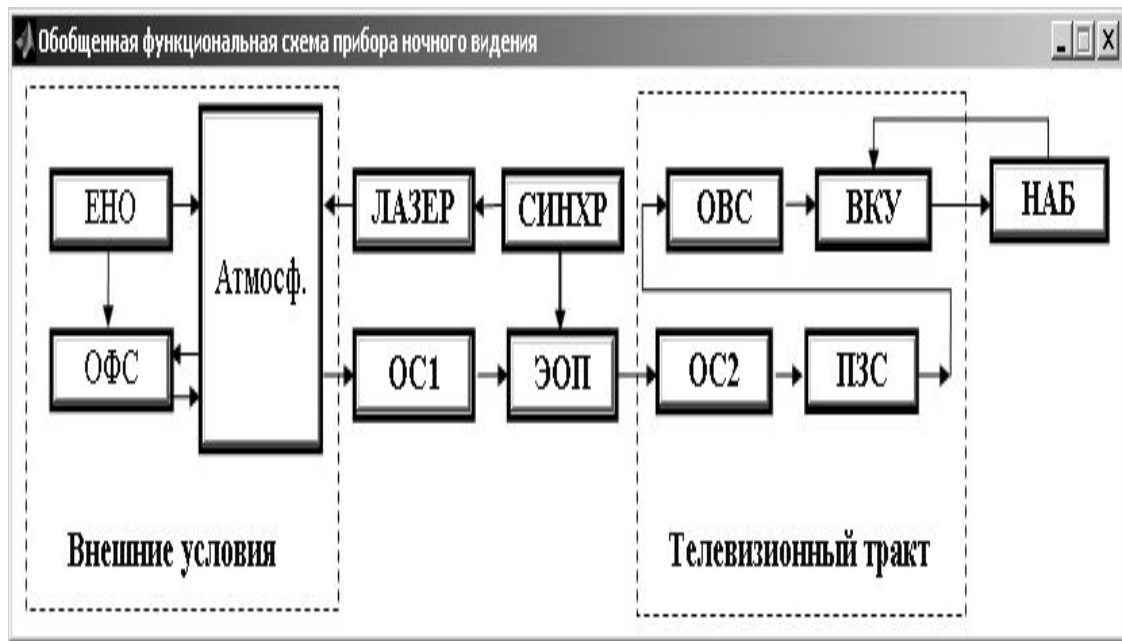


Рис. 1. Функциональная схема ПНВ

В активно-импульсном режиме в исходных данных задается ряд значений требуемой дальности распознавания с определенным шагом. Итеративные вычисления выполняются до достижения заданного значения допустимой погрешности Δ_L , равной относительной разности значений расчетной и требуемой дальности распознавания.

Метод расчета дальности распознавания основан на определении разрешающей способности ПНВ, включая канал обработки информации, через воспринимаемый уровень отношения сигнал/шум (ОСШ). При выводе формул для расчета дальности распознавания цели использовались результаты, приведенные в работах [2...7].

Укрупненная схема алгоритма приведена на рис. 2. Алгоритмы выполнения расчетов и обработки результатов полигонных испытаний защищены свидетельствами [8, 9, 10]. По ходу вычислений могут выдаваться результаты в контрольных точках согласно формулам (1...5).

Рассмотрим основные расчетные соотношения.

Дальность распознавания цели:

$$L_P = \frac{a}{\alpha_\Sigma}, \quad (1)$$

где a – эквивалентный размер цели, м;

α_Σ – суммарное предельное угловое разрешение системы «ПНВ-глаз»;

$$\alpha_\Sigma = (\alpha_{СТР}^2 + \alpha_{ПОР\ ПРИВ}^2 + \alpha_{ЭЛ}^2)^{1/2}, \quad (2)$$

где $\alpha_{СТР}^2$ – предельное угловое разрешение (рад), обусловленное погрешностями узлов прибора (объектив, ЭОП, ТВТ);

$\alpha_{ПОР\ ПРИВ}^2$ – предельное угловое разрешение ТВТ (рад) при заданной вероятности зрительного восприятия порога разрешения объекта;

$\alpha_{ЭЛ}^2$ – предельное угловое разрешение (рад), обусловленное флуктуациями потока фотонов.

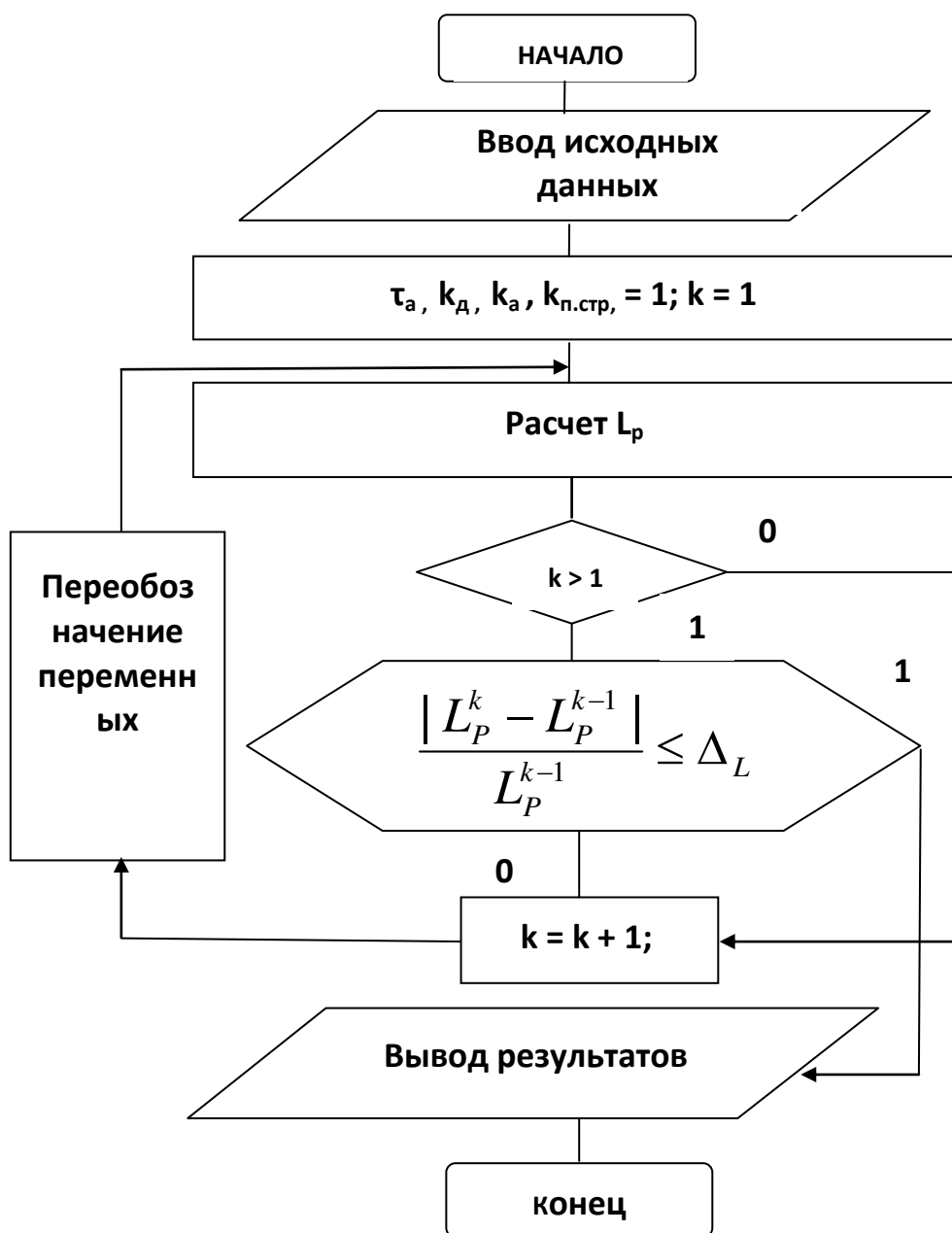


Рис. 2. Укрупненная схема алгоритма вычисления дальности распознавания ПНВ

Ниже приведены формулы для $\alpha_{СТР}^2$, $\alpha_{ПОР ПРИВ}^2$ и $\alpha_{ЭЛ}^2$ (3, 4, 5):

$$\alpha_{СТР}^2 = \frac{0.25}{\Gamma_{Э}^2 \cdot f_{ОБ}^2} \cdot \left(\frac{\Gamma_{Э}^2}{N_{ОБ ПРИВ}^2} + \frac{1}{N_{ЭОП}^2} + \frac{1}{N_{ОП ПРИВ}^2} + \frac{1}{N_{ТВТ}^2} \right). \quad (3)$$

$$\alpha_{ПОР ПРИВ}^2 = \frac{\left[(N_{ТВТ} \cdot f_{ОП})^{-1} \cdot |K_{И ОП}|^{\gamma} \right]^2}{\Gamma_{\Sigma}^2}, \quad (4)$$

где $K_{И ОП}$ – контраст изображения, воспринимаемого ТВТ. Значение вероятности определяется значением показателя степени γ при $|K_{И ОП}|$ [6];

$$\alpha_{эл}^2 = \frac{16 \cdot M_a^2 \cdot e_3 \cdot (2 - K_{об.ф}) \cdot (1 + x_1) \cdot F_3 \cdot k_a \cdot \Gamma_\Sigma^2}{\pi \cdot K_{об.ф}^2 \cdot \rho_\phi \cdot E \cdot \varphi_3 \cdot \tau_a \cdot \tau_{об} \cdot d_{ф.к}^2 \cdot (\Theta_{ЭОП} + \Theta_{ТВ}) \cdot O^2 \cdot \eta \cdot 10^{-6}}, \quad (5)$$

где F_3 – коэффициент засветок;

x_1 – коэффициент, учитывающий влияние термоэмиссии. Остальные обозначения описаны в табл. 1.

Коэффициент контраста объект/фон $K_{об.ф}$ определяется для данного типа приемника с учетом спектральных коэффициентов яркости объекта и фона и относительной плотности излучения источника подсветки.

Различение объекта возможно, если с заданной вероятностью на минимальном размере по критерию Джонсона разрешается 8...12 пар линий штриховой пространственной миры, эквивалентной объекту наблюдения.

Рассмотренный выше алгоритм вычисления основных параметров ПНВ сначала был реализован, совершенствовался и успешно эксплуатировался в течение ряда лет в среде СУБД «Clipper». В развитие этой модели предлагается новая версия, разработанная в среде MATLAB.

Вид главной панели пользовательского интерфейса показан на рис. 3.

Рис. 3. Панель управления процессом моделирования ПНВ

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кощавцев Н.Ф. Определение вероятности распознавания объектов наблюдения / Н.Ф. Кощавцев, С.С. Романов, Д.С. Соколов // Труды Московский энергет. ин-т. 1973. – Вып. 167.
2. Гаврилов В.А. Видимость в атмосфере. / В.А. Гаврилов. – Л.: Гидрометиздат, 1966.
3. Куклев С.В. Электронно-оптические преобразователи / С.В. Куклев, Д.С. Соколов, И.Н. Зайдель. – М., 2004.
4. Изнар А.Я. Электронно-оптические приборы / А.Я. Изнар. – М.: Машиностроение, 1977.

5. Карасик В.Е. Лазерные системы видения / В.Е. Карасик, В.М. Орлов В.М. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.
6. Мешков В.В. Основы светотехники. Ч. 2. Физиологическая оптика и колориметрия / В.В. Мешков. – М.: Госэнергоиздат, 1961. – 416 с.
7. Мешков В.В. Основы светотехники / Ч. 2. Физиологическая оптика и колориметрия / В.В. Мешков, А.Б. Матвеев. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
8. Моисеенко Г.А. Расчет основных характеристик оптико-электронных приборов. Пакет прикладных программ / Г.А. Моисеенко, А.В. Андреев, А.С. Кандауров. – Свидетельство № 2003610053 по заявке № 2002611870 от 04.01.2003.
9. Моисеенко Г.А. Обработка результатов полигонных испытаний. Пакет прикладных программ / Г.А. Моисеенко, А.В. Андреев, А.С. Кандауров. – Свидетельство № 2004610314 по заявке № 2003612513 от 28.01.2004.
10. Кандауров А.С. Расчет основных параметров оптико-электронных приборов с ТВ-каналом (ППП «Импульс-ТВ») / А.С. Кандауров, Г.А. Моисеенко. – Свидетельство № 2006613057 по заявке № 2006612299 с приоритетом от 01.09.2006.
11. ГОСТ 21815.19-90 / Преобразователи электронно-оптические. Методы измерения энергетических и оптических параметров. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 16 с.

© В.В. Малинин, З.М. Цепиногова, Г.Н. Попов, Г.А. Моисеенко, В.В. Моисеенко, 2007

УДК 621.384.3

В.С. Гуля

ФГУП «ЦКБ "Точприбор"», Новосибирск

УНИФИЦИРОВАННЫЙ МОДУЛЬ ОБРАБОТКИ ВИДЕОСИГНАЛА ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ПРИБОРОВ НАБЛЮДЕНИЯ

Основными параметрами тепловизионных приборов (ТпВП) наблюдения являются дальности обнаружения, классификации и распознавания цели, которые, прежде всего, зависят от температурной чувствительности и пространственного разрешения прибора, а также от качества полученного изображения. В свою очередь, качество изображения зависит от динамического диапазона, контраста, яркости, разрешающей способности, отношения сигнал/шум и способности отображать уровни температуры деталей объекта наблюдения. В настоящее время наилучшими параметрами для приборов наблюдения обладают ТпВП с фотоприемным устройством (ФПУ) на основе одной или нескольких линеек чувствительных фотоэлементов. Формирование изображения в подобных ТпВП осуществляется механическим сканирующим устройством. Наибольшее распространение получили зонное сканирование с помощью многогранной призмы и сканирование колеблющимся зеркалом. Полученный видеосигнал перед выводом его на экран устройства отображения информации (УОИ) необходимо преобразовать и обработать в соответствии с принципами построения телевизионных систем. При этом изображение на экране УОИ может быть улучшено применением методов цифровой фильтрации шума, повышения четкости изображения, увеличения динамического диапазона и т. д. Для реализации необходимых алгоритмов преобразования и обработки сигнала ТпВП был разработан унифицированный

модуль обработки видеосигнала (МОВ), который может быть использован в составе различных оптико-электронных средств наблюдения.

МОВ представляет собой специализированный вычислитель с конвейерной обработкой данных (рис.). Обязательным набором устройств обработки являются: плата аналого-цифрового преобразователя (АЦП), плата контроллера (ПК) и плата цифроаналогового преобразователя (ЦАП). Для расширения вычислительных возможностей МОВ предназначены платы расширения (ПР). Количество плат расширения зависит от количества и сложности применяемых алгоритмов обработки. Все платы МОВ и плата вторичного источника питания устанавливаются на плате трассировки. Плата трассировки имеет несколько сквозных шин и шины для последовательного соединения между собой устройств, необходимых для конвейерной передачи данных от входа к выходу МОВ. Такая организация позволяет осуществлять всю обработку видеосигнала в реальном масштабе времени в течение нескольких периодов тактовой частоты. Основой всех устройств обработки являются программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) с высокой степенью интеграции. Каждая плата имеет от двух до четырех банков 12-разрядной оперативной памяти (ОЗУ), объем которой достаточен для записи кадра телевизионного изображения.

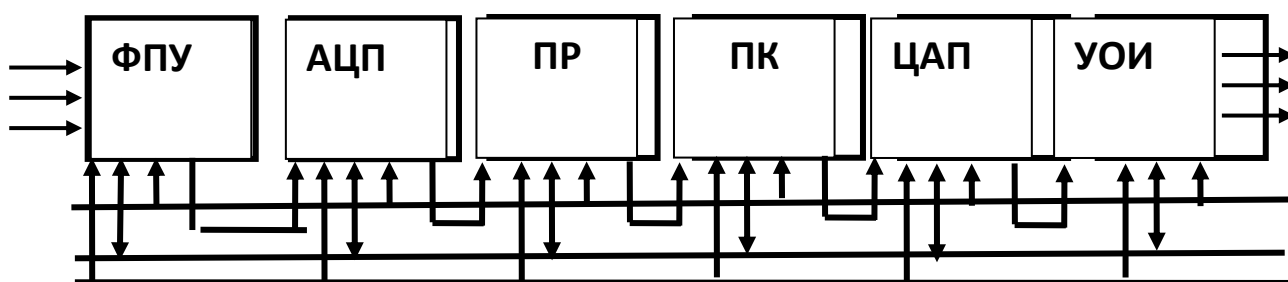


Рис. Функциональная схема модуля обработки видеосигнала

Основной функцией устройств, расположенных на плате АЦП, является преобразование входных аналоговых сигналов в 12-разрядный цифровой параллельный код и реализация некоторых функций обработки. Кроме того, здесь вырабатываются сигналы, необходимые для нормальной работы устройств, входящих в состав приемного устройства: модуля сканирующего устройства, коммутатора каналов ФПУ, модулей охлаждения эталонных излучателей, и т. д. Плата имеет четыре аналоговых дифференциальных входа, предназначенных для подключения ФПУ, имеющего до четырех линеек фоточувствительных элементов (например, ФПУ с организацией 4×288 элементов) или для подключения телевизионных устройств (например, дневной и ночной видеокамер).

На плате ЦАП расположены устройства, необходимые для преобразования цифрового сигнала в аналоговую форму. Кроме того, здесь формируется визирная сетка и служебная информация, которые затем замешиваются в выходной видеосигнал. Выходной сигнал формируется в виде полного видеосигнала по ГОСТ 7845-92.

На ПК находятся устройства, необходимые для управления режимами работы ТпВП, настройки прибора, диагностики и связи с внешним оборудованием. В своем составе контроллер имеет FLASH-память, энергонезависимую память, оперативную память, два интерфейса RS-232, четыре интерфейса RS-422, восьмиканальный АЦП и другие интерфейсные устройства. Через один из интерфейсов RS-232 подключаются пульт управления прибором, на котором расположены все органы управления ТпВП. Через интерфейсы RS-422 можно обмениваться информацией с внешними устройствами, например с дальномером. Устройства МОВ обмениваются данными с контроллером по шине управления. Все настроечные параметры хранятся в постоянном запоминающем устройстве контроллера. В момент включения прибора эти параметры перезаписываются в регистры соответствующих устройств.

Плата расширения служит для расширения вычислительных возможностей МОВ. В своем составе она имеет четыре банка кадровой памяти, FLASH-память, энергонезависимую память, интерфейсы RS-232 и RS-422.

Все устройства, входящие в МОВ, имеют в своем составе регистры управления. Значения этих регистров определяют режимы работы соответствующих устройств. Регистры могут быть настроечные и оперативные. Значения оперативных регистров задаются с пульта управления ТпВП, а значения настроечных регистров определяются во время настройки прибора на предприятии и хранятся в постоянном запоминающем устройстве контроллера МОВ. Настройка прибора производится с внешнего компьютера, который соединяется с контроллером с помощью последовательного интерфейса RS-232. Для настройки ТпВП разработана программа настройки, работающая под управлением операционной системы Windows.

Программа настройки, предназначенная для ТпВП с зонным сканированием, выполняет следующие функции:

– запись-считывание регистров и памяти МОВ (значения регистров и данных отображаются в десятичной, двоичной или шестнадцатеричной системе);

- Сдвиг тактовых импульсов;
- Сдвиг импульса привязки;
- Установку ширины импульса привязки;
- Сдвиг импульса выравнивания чувствительности ФПУ;
- Установку ширины импульса выравнивания;
- Сдвиг импульса синхронизации сканера;
- Сдвиг линеек ФПУ относительно друг друга;
- Установку степени временной фильтрации;
- Установку степени пространственной фильтрации;
- Установку степени апертурной коррекции;
- Выверку марки;
- Установку яркости марки;
- Установку масштаба изображения;

- Проверку отображения дальности и угла места цели на экране УОИ;
- Считывание любых строк и столбцов из любого ОЗУ и отображение их графиков в режиме «электронного осциллографа» на экране монитора компьютера; имеется возможность хранения осциллограмм в виде файлов;
- Считывание диаграммы яркостей и гистограммы амплитудной коррекции и отображение их графиков на экране монитора компьютера с возможностью их хранения в виде файлов;
- Считывание изображения из ОЗУ и хранение в виде файлов;
- Диагностику всех устройств и ОЗУ;
- Запись в ОЗУ тестовой таблицы;
- Считывание состояния регистров в начале загрузки и использование их в качестве исходных, установку регистров по умолчанию, запись и считывание их из файла.

При добавлении новых устройств в МОВ добавляются и новые функции в программу настройки.

В заключение следует отметить, что описанный выше модуль успешно прошел испытания в составе ТпВП наблюдения.

© В.С. Гугля, 2007

УДК 621.383: 52

Г.А. Бадалян

ФГУП «ЦКБ "Точприбор"», Новосибирск

В.В. Малинин

СГГА, Новосибирск

СОВМЕСТНАЯ НАСТРОЙКА ТЕЛЕСКОПА И ФПМ ПЗС

В последние годы стали появляться статьи по настройке работы современных телескопов [1–3], причем в любительских телескопах тоже используются передовые достижения техники [4, 5].

В докладе обобщается опыт совместной настройки телескопа и ФПМ ПЗС. Настройка касается телескопов с экваториальными монтировками (подвесками). Оптическая схема телескопа роли не играет. Это может быть рефрактор, рефлектор или катадиоптрическая схема.

Юстировка полярной оси обеспечивает съемку без «смаза» звезды. Даже если используется автосопровождение, то большой дрейф вызывает потребность в большем количестве коррекций и потенциально снижает точность сопровождения. Наконец, при больших размерах кадра ФПМ ПЗС и низком склонении разворот поля становится существенным фактором.

Согласование полярной оси с осью мира очень важно для формирования устойчивого изображения с помощью ФПМ ПЗС при длительных экспозициях. Для экваториальных монтировок, оснащенных искателями полюса, эта операция обычно не вызывает больших затруднений. Однако подобные искатели вошли в практику телескопостроения сравнительно недавно.

Юстировка дрейфа используется много лет и может дать чрезвычайно точные результаты юстировки полярной оси. К сожалению, этот способ требует очень много времени, так как периодически нужно наблюдать дрейф звезды. Процесс можно существенно ускорить, используя ПЗС камеру, так как можно легко вычислить центр тяжести изображения звезды. В [3] предлагается такая процедура юстировки дрейфа из 14 пунктов.

Формирование полярных изображений. Используя программу планетария, создать карту области вокруг полюса (северного или южного). Убедиться в том, что положение полюса отмечено на карте. Затем выполнить грубую регулировку оси и сделать снимок полюса ПЗС камерой с экспозицией в 60 с. В середине экспозиции повернуть телескоп вокруг полярной оси, насколько это будет возможно. Повернуть его нужно достаточно быстро, например, за 30 с. Будет создано изображение с ясно видимыми звездами, плюс набор почти круговых дуг, с центром на положении полюса телескопа. Теперь можно легко видеть различие в положении между полярной осью телескопа и правильным местоположением полюса. Фактически, можно измерить это расстояние, используя информационное окно, и получить очень точный результат. Теперь нужно подправить монтировку на это расстояние. Для этого нужно установить быстрый биннинговый режим экспозиции и наблюдать движение звезд после регулировки. После одной или двух итераций можно добиться чрезвычайно точной регулировки полярной оси.

Фокусировка может быть затруднена, потому что нельзя смотреть «сквозь» ПЗС-камеру. Вместо этого приходится рассматривать изображение на компьютерном экране. Хотя некоторые ПЗС-камеры способны обновлять экран много раз в секунду, но это – скорее исключение, чем правило. При низких уровнях освещенности требуемая длительность экспозиции часто велика. Даже если наблюдается яркая цель, но для снижения уровня шумов используется медленно действующая схема оцифровки; в других случаях просто время скачивания большого объема данных в компьютер требует много времени.

Когда экран обновляется только несколько раз в минуту, становится чрезвычайно трудно подобрать способ фокусировки. Можно предложить два способа увеличения скорости обновления. Первый – биннинг. Он хорош для грубой фокусировки, но потеря разрешения затрудняет точную фокусировку. Вторым методом – формирование подкадра. Он требует, чтобы пользователь выбрал маленькую область матрицы и считывал только эту область. Это также ускоряет скорость передачи данных в компьютер, но уменьшает область обзора. Несмотря на их недостатки, эти методы существенны для эффективной фокусировки.

Чтобы ускорить процесс фокусировки, полезно, чтобы фокус был, приблизительно, правильным до начала процесса. Полезен окуляр «для фокусировки» с ПЗС-камерой. Сначала тщательно сфокусировать камеру, используя стандартные средства. Затем, не изменяя установку фокуса на телескопе, удалить камеру и заменить ее окуляром. В зависимости от типа окуляра может понадобиться переходное кольцо. Не изменяя установку фокуса, поворачивать окуляр до тех пор, пока не установится фокус. После этого

пометить точку лучшего фокуса на барабане окуляра. Лучше всего использовать маленькое металлическое кольцо с защелками, которое может быть застопорено в нужном месте. Следующий раз, когда понадобится сфокусировать, сначала нужно использовать этот специальный окуляр и визуально настроить фокус. После этого понадобится только маленькая подгонка.

Ручная фокусировка утомительна и отнимает много времени при съемке ПЗС-камерой. Современные способы автофокусировки могут надежнее и лучше ручной, но для этого требуется цифровой фокусатор.

Наведение ПЗС-камеры на фокус может быть затруднено, поскольку опять-таки нет средства для наблюдения «сквозь» камеру. Таблица фокусировки может оказаться очень полезным инструментом для наведения. Как только камера сфокусирована, установить таблицу фокусировки так, чтобы снять очень короткое по длительности биннинговое изображение. После этого можно быстро переключаться назад и вперед между таблицей фокусировки и таблицей экспонирования, которая обычно настроена на съемку с длительной экспозицией и высоким разрешением. Хотя кадр фокусировки снят с очень короткой экспозицией, использование биннинга повышает отношение сигнал-шум и делает возможным видеть слабо светящиеся объекты. Это позволяет легко снять быстрый снимок для использования при наведении.

Автосопровождение. При съемке с длительными экспозициями на астрономических телескопах требуется сопровождение, чтобы компенсировать влияние вращения Земли. Типовые монтировки астрономических телескопов не достаточно точны для съемки при длительных экспозициях без какого-либо сопровождения.

ПЗС-камера, установленная на телескопе, может использоваться в качестве автогида при условии наличия на монтировке приводов с обратной связью. При этом требования к выставлению полярной оси экваториальных монтировок существенно снижаются. В ряде случаев этот метод пригоден и для азимутальных монтировок, не оборудованных программируемыми системами наведения и слежения. На точность слежения окажут влияние быстродействие привода, качество ФПМ ПЗС и склонение объекта наблюдения.

Калибровка автогида. Поместить яркую звезду в поле зрения камеры автогида ближе к центру. Выбрать экспозицию, используя таблицу гида в режиме выбора экспозиции; звезда гидирования будет выбрана автоматически или можно выбрать звезду щелчком мыши. Сделать серию из пяти полнокадровых экспозиций, перемещая монтировку после каждой экспозиции. Это позволит определить, как быстро монтировка перемещается в каждом направлении. Движение между последовательными экспозициями происходит в направлениях $+X$, $-X$, $+Y$, $-Y$. Звезда должна перемещаться, как минимум, на пять пикселей между каждой экспозицией для точного измерения, но лучше больше.

Может произойти сбой в калибровке, если в кадре появится другая звезда. Чтобы минимизировать этот риск, всегда используется звезда с яркостью, наиболее подобной той яркости, которая измерена в первом изображении. Если звезда не перемещается достаточно далеко или перемещается слишком далеко

(то есть звезда выходит за пределы поля зрения), длительность команд калибровочных движений нужно отрегулировать. Более продолжительное время калибровки увеличит продвижение звезды; менее продолжительное время уменьшит продвижение. Типичные значения находятся в пределах от пяти до десяти секунд. Это зависит от скорости корректировки, фокусного расстояния и размера ячейки.

Калибровка может оказаться неточной, например, из-за значительного мертвого хода. Нужно экспериментировать, чтобы определить наилучшие установки для конкретного телескопа. Обычно, значение скорости движения звезды для каждой оси устанавливается одинаковым. Кнопки скорости по осям X и Y позволяют вводить значения кажущейся скорости движения звезды в процессе корректировки гидирования в пиксел/с. Например, если звезда перемещается со скоростью 3 пиксел/с, то и скорость гидирования устанавливается 3 пиксел/с. Число может быть отрицательным, если положительная корректировка вызывает отрицательное движение.

Мертвый ход и статическое трение. Мертвый ход может происходить, когда направление движения по оси меняется на обратное. Телескоп немедленно не может начать перемещаться в обратном направлении, даже если двигатель поворачивается в обратном направлении. Обычно, причина состоит в холостом ходе из-за люфта привода. Мертвый ход является проблемой только для оси склонения, потому что часовая ось всегда движется вперед из-за слежения за звездами. Мертвый ход можно компенсировать с помощью программного обеспечения. Если двигатель затрачивает 1,2 с на один оборот, то программное обеспечение могло бы автоматически добавлять 1 с времени на работу двигателя всякий раз, когда направление меняется.

Статическое трение возникает, когда два объекта находятся в контакте и в покое или перемещаются очень медленно относительно друг друга. Динамическое трение возникает, когда два объекта находятся в движении. Статическое трение всегда больше динамического трения. Поэтому, когда объект начинает перемещаться, то коэффициент трения может изменяться очень быстро.

Проблема залипания может быть сложной механической задачей, она эффективно не может быть решена с помощью программного обеспечения. Если происходит плохое гидирование по склонению, и не удастся решить эту проблему путем настройки калибровки или агрессивности, значит, возникла проблема залипания. Одно решение состоит в том, чтобы обратить внимание на средний дрейф по склонению, и отключить корректировку в этом направлении. Гид должен быть способен только подтолкнуть против среднего дрейфа.

Компенсация склонения. Это может быть легко замечено, потому что ПолярнКогда телескоп направлен в область полюса, то видимое движение звезд, замедляется. ая звезда почти неподвижна. К сожалению, это изменение скорости затрагивает калибровку автогида. Если калибровка выполнена на экваторе, то в полярной области автогид будет компенсировать слишком медленно в прямом восхождении. Если калибровка выполнена около полюса, то на экваторе автогид нужно перерегулировать.

Очевидный путь преодоления этой проблемы состоит в том, чтобы повторно калибровать перед каждой экспозицией. Но это отнимет много времени и чаще всего не нужно. Если калибровка выполняется первый раз, то нужно ориентироваться на звезду, близкую к экватору. Используя программное обеспечение, ввести склонение калибровочной звезды. Наводить телескоп на различные области на небе, заносить новые значения склонения, соответствующие новому положению телескопа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Куимов К.В. Определение положения астрономического объекта по наблюдениям с прибором зарядовой связи [Электронный ресурс] / К.В. Куимов, В.Р. Амирханян, А.Ю. Соколова. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://heritage.sai.msu.ru>.
2. Astrophotography & CCD Imaging [Электронный ресурс] – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://skyandtelescope.com/howto/imaging/>.
3. Telescope Control [Электронный ресурс] – Электрон. дан. – Режим доступа: http://www.cyanogen.com/products/maxim_features_tele.htm.
4. Сикорук Л.Л. Телескопы для любителей астрономии / Л.Л. Сикорук. – М.: Наука, 1990.
5. Телескоп ТАЛ-1М (Мицар-М). Руководство по эксплуатации. Новосибирск: НПЗ им. В.И. Ленина, 1997.

© Г.А. Бадалян, В.В. Малинин, 2007

УДК 555.411

Е.В. Сысоев

КТИ НП СО РАН, Новосибирск

ЧАСТИЧНОЕ СКАНИРОВАНИЕ КОРРЕЛОГРАММ В ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ БЕЛОГО СВЕТА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТЕЙ С НАНОМЕТРОВЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Сканирующие интерферометры частично-когерентного света широко используются для бесконтактных измерений микрорельефа поверхностей [1, 2]. Методика измерений основана на регистрации и анализе набора интерферограмм, полученных в процессе сканирования измеряемой поверхности вдоль оптической оси z интерферометра [3]. Сканирование с шагом несколько десятков нанометров осуществляется перемещением объекта [4], либо путем перемещения всего интерферометра или его части [5]. По набору интерферограмм для каждой точки измеряемой поверхности находится коррелограмма $I(z)$, представляющая собой зависимость интенсивности светового потока от координаты сканирования z [6]. Нахождение максимума коррелограммы, соответствующего нулевой разности хода световых волн, рассеянных сопряженными участками поверхностей в опорном и измерительном плечах интерферометра, определяет абсолютное осевое положение участка измеряемой поверхности [7].

Диапазон сканирования определяется длиной когерентности используемого источника света и может составлять десятки микрон. Для

обеспечения высокой точности измерений в этом случае необходимо дополнительно контролировать процесс сканирования также с высокой точностью, что ведет к усложнению конструкции интерферометра. В данной работе исследован метод измерения микрорельефа, основанный на регистрации относительного набега фазы коррелограмм между соседними участками измеряемой поверхности. В используемом интерферометре период коррелограмм составляет половину периода эффективной длины волны используемого света $\bar{\lambda}$, поэтому локальный перепад измеряемого микрорельефа не должен превышать $\pm \bar{\lambda}/4$, что составляет $\approx 150 \div 200$ нм. Для поверхностей с плавным изменением высоты микрорельефа результаты измерений будут однозначными.

Интерференция пучков опорного и измерительного плеч интерферометра происходит в том случае, когда разность их оптических длин хода не превышает длины когерентности l_c используемого источника света; при этом общее изменение микрорельефа измеряемой поверхности не должно превышать l_c , что составляет $\approx 10 \div 50$ мкм, в зависимости от используемого источника света. Задачи такого типа возникают при измерениях толщины напыленных тонких пленок, микрорельефа микрооптики, глубины механических дефектов поверхностей, шероховатости и т.д. Преимущество данного метода состоит в том, что для измерения микрорельефа поверхности сканирование коррелограмм можно осуществлять в диапазоне долей мкм. В связи с этим процесс сканирования можно осуществлять посредством перемещения опорного зеркала интерферометра, что существенно упрощает конструкцию измерительной системы в целом. Для экспериментальных исследований метода была собрана установка, показанная на рис. 1.

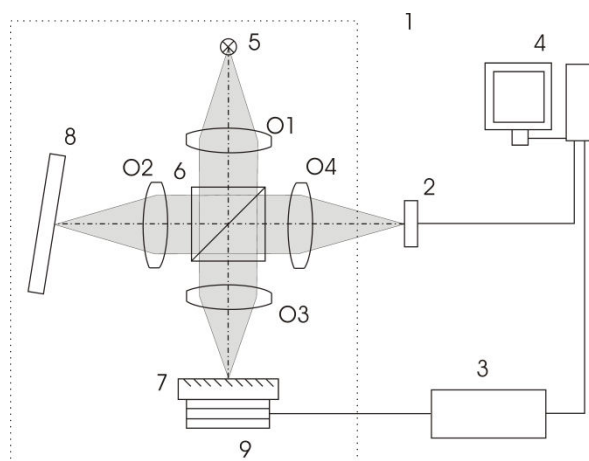


Рис. 1

Она включает в себя интерферометр Линника 1, ПЗС-камеру 2, контроллер управления пьезокерамикой 3 и компьютер 4. Интерферометр Линника состоит из источника частично-когерентного света 5, светоделительного кубика 6, опорного зеркала 7, объективов O1-O4 и измеряемого объекта 8. В экспериментах опорное зеркало интерферометра, установленное на

пьезокерамику, перемещалось дискретно с шагом $\Delta z \approx 4,2$ нм. Учитывая, что $z_k = k\Delta z$, для дискретных значений z_k интенсивность света, регистрируемую в каждом j -ом пикселе i -ой строки, можно записать в виде:

$$I_{ij}(z_k) = I_{ij}^0(1 + A_{ij}(z_k) \cdot \cos(4\pi(z_{ij}^0 - z_k)/\bar{\lambda} + \phi_{ij})), \quad (1)$$

где $k \in (0, 1 \dots K)$, K – максимальное количество шагов, $K\Delta z \ll l_c$, т. е. диапазон перемещения опорного зеркала интерферометра был значительно меньше длины когерентности l_c используемого источника света, $\bar{\lambda}$ – эффективная длина волны, ϕ_{ij} – начальная фаза коррелограмм. Для каждого пикселя регистрировались фрагменты коррелограмм $I_{ij}^f(z_k)$, описываемые общей функцией (1). С учетом рассеивающих свойств измеряемой поверхности функцию (1), для каждого (i, j) , можно записать как:

$$I_{ij}(z_k) = a_{ij} \cdot I_{ij}^f(z_k) + b_{ij}, \quad (2)$$

где a_{ij} и b_{ij} определяется, рассеивающими свойствами измеряемой поверхности и фоновой засветкой ПЗС матрицы. На рис. 2 показаны графики фрагментов коррелограмм для двух произвольно выбранных пикселей.

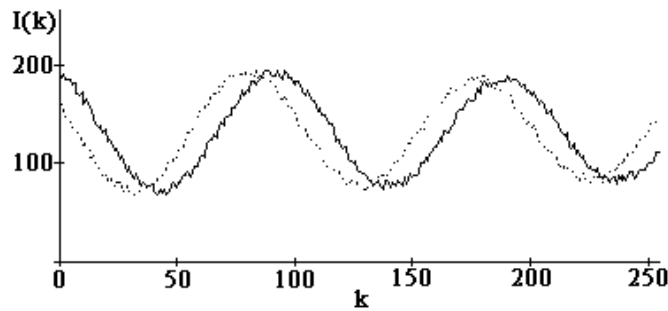


Рис. 2

Сдвиг Δk по номеру шага сканирования k между коррелограммами, определяется изменением высоты микрорельефа Δh между участками поверхности, проецируемыми на эти пиксели:

$$\Delta h = \Delta k \cdot \Delta z. \quad (3)$$

Коррелограммы для двух произвольно выбранных пикселей (l, m) и (n, q) с учетом уравнения (2) можно записать:

$$\left. \begin{aligned} I_{lm}(z_k) &= a_{lm} \cdot I_{lm}^f(z_k) + b_{lm} \\ I_{nq}(z_k) &= a_{nq} \cdot I_{nq}^f(z_k) + b_{nq} \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

Тогда, с учетом шума в коррелограммах:

$$I_{lm}^f(z_k) \approx a'_{nq} \cdot I_{nq}^f(z_k + \Delta k_{nq} \cdot \Delta z) + b'_{nq}, \quad (5)$$

Задача нахождения сдвига Δk_{nq} между коррелограммами решалась численно методом последовательных приближений с использованием

минимизации среднеквадратичного отклонения фрагментов двух коррелограмм $I_{lm}^f(z_k)$ и $I_{nq}^f(z_k)$ в области их пересечения по z_k .

Для решения этой задачи была введена непрерывная интерполирующая переменная ξ . Величина $\Delta\xi_{lm}$ находилась методом подгонки сравниваемых коррелограмм по параметрам $\Delta\xi_{nq}, a'_{nq}, b'_{nq}$. По $\Delta\xi_{nq}$ рассчитывается осевое изменение высоты профиля поверхности

$$\Delta h_{nq} = \Delta\xi_{nq} \cdot \Delta z, \quad (7)$$

между участками поверхности, отображаемыми на эти пиксели.

Моделировалось влияние фазового шума на погрешность $\delta(\Delta h_{nq})$ определения величины Δh_{nq} . На рис. 3 показан пример зависимости $\delta(\Delta h_{lm})$ от $V_{n/s}$.

Видно, что при $V_{n/s} < 0,05$, разрешение по высоте измеряемого профиля может быть лучше 1 нм. В экспериментах интерференция регистрировалась 8-разрядной видеокамерой с размером ПЗС-матрицы 576 строк по 740 пикселей. В качестве объектов измерений использовались стеклянные пластинки с напылением пленки хрома, часть которого была удалена до подложки жидкостным травлением. В экспериментах измерялась высота ступеньки пленки хрома на стеклянной подложке и глубина канавки, вытравленной в пленке хрома. Результаты измерений приведены на рис. 4, 5. Показана ступенька пленки хрома на стеклянной подложке и канавка, вытравленная в пленке хрома.

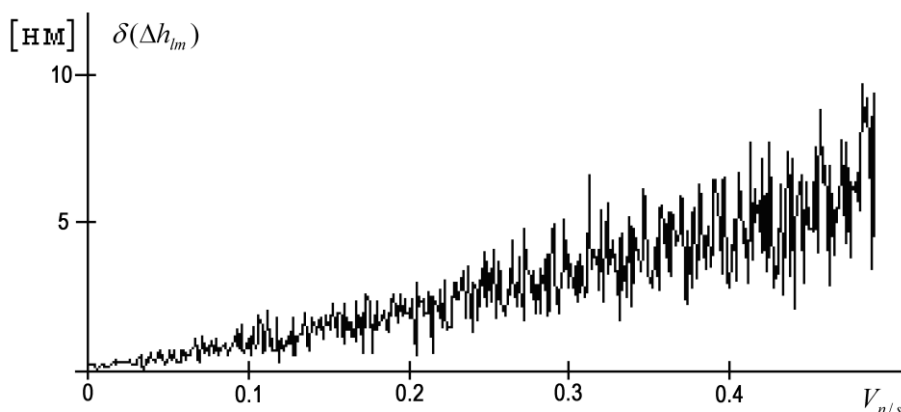


Рис. 3

а)

б)

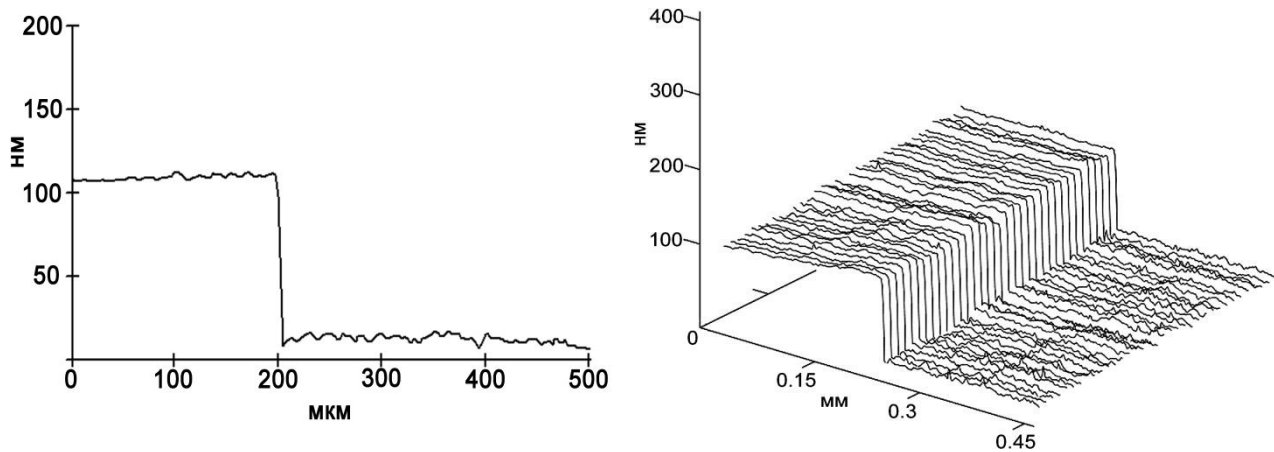


Рис. 4

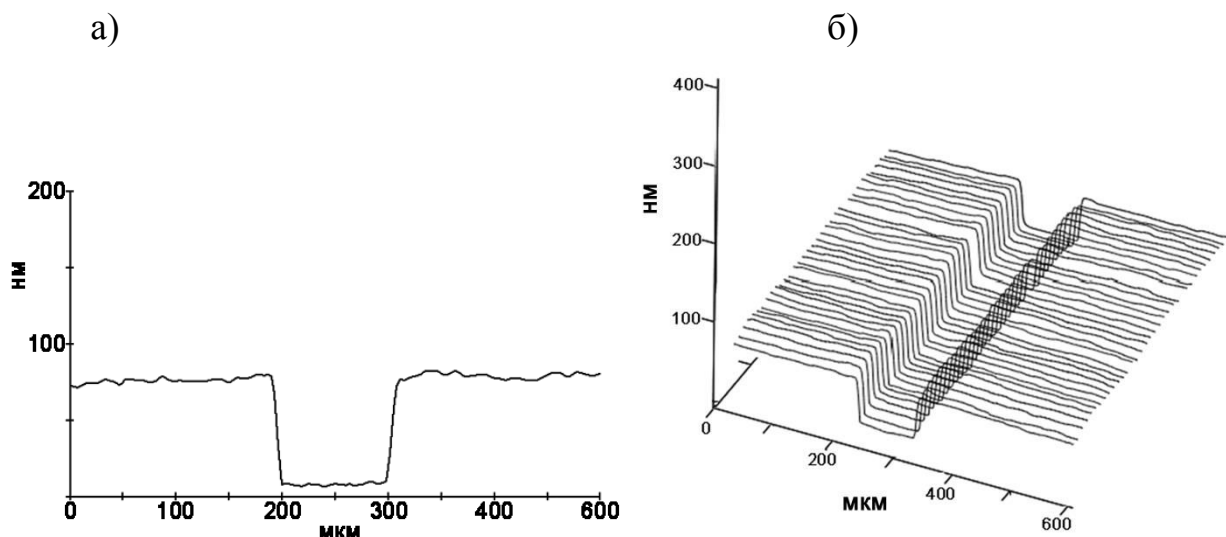


Рис. 5

Таким образом, в работе показано, что сканирование коррелограмм можно производить перемещением опорного зеркала интерферометра вдоль оси его опорного плеча в диапазоне менее 1 мкм.

Моделирование влияния амплитуды шума на погрешность измерения профиля поверхности показало, что при уровне шума до 5 % от уровня сигнала регистрируемых коррелограмм вертикальное разрешение предложенного метода может составлять менее 1 нм.

Предложенный метод применим для решения задач, когда измеряемый объект имеет общие изменения профиля поверхности в пределах длины когерентности и локальные перепады высоты профиля, не превышающие четверти эффективной длины волны используемого источника света. Для поверхностей с известными свойствами (например, пилообразный микрорельеф дифракционных оптических элементов) диапазон измерений может быть

расширен за счет устранения (алгоритмическими методами) неоднозначностей на крутых перепадах микрорельефа.

Результаты данной работы могут быть использованы при проектировании высокоразрешающих систем измерений микрорельефа поверхностей в нанометровом диапазоне разрешений, а также систем контроля качества поверхностей изделий в промышленном производстве.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. De Groot P., Biegen J., Clack J. et al. Optical interferometry for measurement of the geometric dimensions of industrial parts // Appl. Opt. – 2002. – № 19. – P. 3853–3860.
2. Davidson M., Kaufman K., Mazor I. The coherence probe microscope // Solid State Technol. – 1987. – № 30. – P. 57–59.
3. De Groot P., De Lega X. C., Kramer J., Turzhitsky M. Determination of fringe order in white-light interference microscopy // Appl. Opt. – 2002. – № 22. – P. 4571–4578.
4. Fleischer M., Windecker R., Tiziani H.J. Fast algorithms for data reduction in modern optical three-dimensional profile measurement system with MMX technology // App. Opt. – 2000. – № 8. – P. 1290–1297.
5. Kino G.S., Chim S.S.C. Mirau correlation microscope // Appl. Opt. – 1990. – № 29. – P. 3775–3738.
6. Harasaki A., Schmit J., Wiant J.C. Improved vertical-scanning interferometry // Appl. Opt. – 2000. – № 13. – P. 2107–2114.
7. Deck L., De Groot P. High-speed noncontact profiler based on scanning white-light interferometry // App. Opt. – 1994. – № 31. – P. 7334–7338.

© Е.В. Сысоев, 2007

УДК 621.397: 621.391.8

И.А. Вишневкова, Е.В. Грицкевич, В.В. Малинин,

А.В. Фалеев, З.М. Цепиногова

СГГА, Новосибирск

ПРЕДПОСЫЛКИ К ОПТИМИЗАЦИИ ОЭП НАБЛЮДЕНИЯ

Постановка задачи

Классическая постановка задачи оптимизации состоит в следующем: разработать математическую модель объекта оптимизации, на основе этой модели разработать целевую функцию, одним из известных методов (например, градиентным) найти такие значения параметров объекта оптимизации, при которых выполняется условие оптимума. Сравнительно легкой быстро таким методом можно оптимизировать объекты с несложной и статической структурой. Однако ОЭП наблюдения является сложным объектом, работа которого нелинейно зависит от большого количества внутренних и внешних параметров. Поэтому здесь рассмотрены некоторые предпосылки к оптимизации ОЭП наблюдения.

1. Критерии оптимизации оптико-электронных приборов наблюдения и ориентации

Прибор ночного видения

Главный критерий оптимизации – вероятность различения глазом изображения объекта на заданном уровне дешифрации последнего (обнаружение или распознавание). Поэтому дальность действия, выбранная в качестве оценочного критерия, будет определяться относительно заданного значения вероятности решения наблюдательной задачи. Это не исключает возможность оценки эффективности различных вариантов систем непосредственно по значению вероятности при условии неизменности расстояния до объекта.

Для многозвенных систем в качестве основной проектной процедуры, выполняемой с помощью вычислительной модели, целесообразно использовать анализ системы методом имитационного моделирования.

Взаимодействие моделей звеньев между собой реализуется путем передачи от одного программного модуля к другому параметров сигнала, характеризующих информационное и физическое состояние тракта. Совокупность этих параметров называется *вектором фазовых переменных* (ВФП). Состав компонент вектора выбирается, во-первых, исходя из необходимости вычисления расчетного критерия, а, во-вторых, с целью обеспечения возможности оценки вклада каждого звена в качество выводимой информации. В этой связи в вектор включены: частота основной гармонической составляющей полезного сигнала (пространственная или временная), уровни сигналов от объекта и фона, коэффициент модуляции полезного сигнала, отношение полезного сигнала к шуму. Под полезным сигналом здесь и далее будет пониматься разность между уровнями сигналов от объекта и фона. Сначала ВФП генерируется модулем объектно-фоновой ситуации, а затем моделируется процесс последовательного преобразования фазовых переменных каждым звеном прибора.

Наборы входных и выходных параметров всех модулей одинаковы. Это позволяет применить единый методологический подход к построению математической модели каждого звена и определить набор требуемых для всех модулей алгоритмов. Математическая модель должна представлять собой ненормированную передаточную функцию реализуемого звена и включать следующие процедуры: моделирование процессов преобразования уровней сигналов с входа на выход с учетом частотной характеристики звена (ЧКХ и АЧХ), пересчет отношения полезного сигнала к шуму с входа на выход с учетом собственных шумов звена, преобразование частоты полезного сигнала.

Оптико-электронный блок системы ориентации по звездному полю

Главный критерий оптимизации – достоверность распознавания объектов наблюдения. Для выполнения этого критерия нужно подобрать соответствующие значения таких параметров прибора, как угол поля зрения, диаметр входного зрачка и фокусное расстояние, в зависимости от угловой погрешности системы ориентации, выбранного алгоритма опознавания и выбранной матрицы ПЗС.

Требования к прибору. Угловая погрешность прибора должна быть достаточной для того, чтобы идентифицировать каждое угловое расстояние между звездами как уникальное. Диаметр входного зрачка должен обеспечить регистрацию звезд заданной звездной величины. Угол поля зрения должен обеспечить одновременную регистрацию необходимого количества звезд, используемых для опознавания.

Первый этап оптимизации. На основании численных экспериментов с каталогом звездного неба строится зависимость *угловой погрешности* системы ориентации от величины видимого блеска звезд, фиксируемых прибором. При этом можно выбрать такую звездную величину, при которой погрешность не больше допустимой, либо так изменить параметры прибора, чтобы при заданной звездной величине погрешность не превышала допустимую. То есть на первом этапе вычисляется величина видимого блеска звезд, используемых для опознавания.

Второй этап оптимизации. На основе численных экспериментов с каталогом звездного неба строится зависимость *диаметра входного зрачка* прибора от видимого блеска звезд, используемых для опознавания, и их спектрального класса. Другими словами: выполняется габаритно-энергетический расчет ОЭП системы ориентации, исходя из условия регистрации звезд заданной звездной величины.

Третий этап оптимизации. Для работы алгоритма опознавания требуется, что бы в поле зрения прибора попало необходимое для опознавания количество звезд. Причем разные алгоритмы используют для опознавания разное количество звезд, но всегда большее или равное 3. На основе численных экспериментов с каталогом звездного неба строится зависимость минимально допустимого *угла поля зрения* от количества звезд, используемых для опознавания.

Четвертый этап оптимизации. По угловой погрешности прибора и размерам ячейки ФПМ рассчитывается *фокусное расстояние*. Поскольку геометрические размеры ячейки ФПМ должны соответствовать линейной погрешности прибора в плоскости наилучшего видения, то фокусное расстояние будет оптимальным.

2. Обобщенный метод проектирования функциональной схемы ОЭП наблюдения

Для разработки схемы алгоритма проектирования ОЭП наблюдения предлагается использовать две таблицы кодов.

В таблице «ОЭП наблюдения» приведен перечень всевозможных параметров объекта наблюдения, метеорологической обстановки, объектно-фоновой обстановки, функций ОЭП наблюдения, которые могут использоваться в техническом задании на проектирование ОЭП наблюдения.

В таблице «Структура ОЭП наблюдения» приведен перечень всевозможных узлов, входящих в состав ОЭП наблюдения, с их параметрами.

В каждой таблице каждой строке соответствует код, который используется в схеме алгоритма. В основу схемы алгоритма проектирования ОЭП

наблюдения заложен условный оператор if (код строки табл. 1) then (код строки табл. 2) else (переход к следующей строке табл. 1).

Этот оператор повторяется столько раз, сколько строк содержится в табл. 1. Наполнение оператора является результатом экспертных оценок. В итоге получается набор узлов функциональной схемы, соответствующий ТЗ. В принципе, можно разработать программу автоматического построения функциональной схемы.

Таблица 1		Таблица 2	
Параметры ТЗ на разработку ОЭП	Код	Узлы ОЭП и их параметры	Код
Объект наблюдения	1	Объектив приемный дневной	T01
Одиночный	101	Фокусное расстояние	T0101
Групповой	102	Относительное отверстие	T0102
и так далее		Объектив приемный ночной	T02
Метеорологическая обстановка	2	и так далее	
День ясный солнечный	201		
День пасмурный	202		
и так далее			

3. Простая математическая модель ФПМ ПЗС

Математическая модель ФПМ ПЗС устанавливает количественные зависимости между внутренними параметрами матрицы, входным оптическим сигналом и выходным электрическим сигналом. При этом учитываются факторы снижения коэффициента модуляции на выходе матрицы по сравнению с входом. Рассмотрим соотношения, учитывающие эти факторы.

Если рассматривать видеосигнал на выходе ФПМ ПЗС, то контраст формируемого изображения можно характеризовать коэффициентом модуляции K_m :

$$K_m = (U_{\max} - U_{\min}) / (U_{\max} + U_{\min}),$$

где $U_{\max}$, $U_{\min}$ максимальное и минимальное значения выходного сигнала.

Ниже рекуррентно находятся значения $U_{\max}$ и $U_{\min}$ с учетом различных факторов так, что в последнем выражении учитываются все рассматриваемые здесь факторы.

Спектральный фактор состоит в несоответствии между спектральными характеристиками источника, приёмника и глаза и учитывается в следующих формулах:

$$U_{\min 1} = (E_{\min} * S_{\Sigma} * K_{\text{пр}} * K_{\text{гэ}}) / (K_{\text{пэ}} * K_{\text{гр}});$$

$$U_{\max 1} = (E_{\max} * S_{\Sigma} * K_{\text{пр}} * K_{\text{гэ}}) / (K_{\text{пэ}} * K_{\text{гр}}),$$

где $U_{\min 1}$, $U_{\max 1}$ – максимальное и минимальное значения выходного сигнала с учетом спектрального фактора; $E_{\min}$, $E_{\max}$ – максимальное и минимальное значения освещенности ФПМ, S_{Σ} – интегральная эталонная чувствительность, В/лк; $K_{\text{пэ}}$ – коэффициент использования приёмником эталонного источника; $K_{\text{пр}}$ – коэффициент использования приёмником рабочего

источника; $K_{гэ}$ – коэффициент использования глазом эталонного источника; $K_{гр}$ – коэффициент использования глазом рабочего источника.

Геометрический фактор состоит в том, что элементы матрицы имеют конечные размеры. Они не могут обнаруживать колебания входной освещенности при высоких пространственных частотах. Если на один элемент попадает несколько штрихов, то сигналы от всех штрихов интегрируются, и результирующий сигнал будет соответствовать средней освещенности элемента. Геометрический фактор T_g рассчитывается следующим образом:

$$T_g = \sin(\pi * V_m * A_v) / (\pi * V_m * A_v),$$

где V_m – пространственная частота; A_v – размер фоточувствительной площадки ФПМ по вертикали. Здесь рассматривается случай, когда штрихи испытательной миры расположены поперёк фоточувствительной площадки.

Тогда:

$$U_{min2} = (U_{max1} * (1 - T_g) + U_{min1} * (1 + T_g)) / 2;$$

$$U_{max2} = (U_{max1} * (1 + T_g) + U_{min1} * (1 - T_g)) / 2,$$

где U_{min2} , U_{max2} – максимальное и минимальное значения выходного сигнала с учетом геометрического фактора.

Термогенерация приводит к формированию на выходе матрицы темнового сигнала. Если закрыть объектив видеокамеры чёрной крышкой, на выходе камеры всё равно можно обнаружить темновой сигнал в виде шума. Количество темновых зарядов N_{tt} определяется так:

$$N_{tt} = (J_t * T_n * A_v * A_g * 10^{-8}) / Q_{эл},$$

где J_t – плотность темнового тока; T_n – время накопления; A_v , A_g – размеры фоточувствительной площадки ФПМ по вертикали и горизонтали. $Q_{эл}$ – заряд электрона ($1.6 * 10^{-18} К$).

Тогда:

$$U_{min3} = U_{min2} + U_t;$$

$$U_{max3} = U_{max2} + U_t,$$

где U_t – темновое напряжение при комнатной температуре; $U_t = N_{tt} * K$, K – коэффициент преобразования зарядов в напряжение.

Диффузионный фактор состоит в том, что часть зарядов диффундирует, т. е. теряется из одного пакета и добавляется в другой пакет либо рекомбинируется. Диффузионный фактор T_n находится так:

$$T_n = \exp(-N_n * \varepsilon * (1 - \cos(2 * K_1))) ,$$

где $N_n = 1.5 * M_v * N_{ф}$; $N_{ф}$ – количество фаз; $K_1 = \pi * N_n * A_v$; ε – эффективность переноса. Тогда:

$$U_{min4} = (U_{max3} * (1 - T_n) + U_{min3} * (1 + T_n)) / 2;$$

$$U_{max4} = (U_{max3} * (1 + T_n) + U_{min3} * (1 - T_n)) / 2.$$

В результате коэффициент модуляции K_m с учетом влияния всех рассмотренных факторов находится так:

$$K_m = (U_{max4} - U_{min4}) / (U_{max4} + U_{min4}),$$

Разработанная модель позволяет сравнительно быстро оценивать контраст формируемого изображения и находить зависимости контраста от значения заданного параметра в заданном диапазоне.

Закключение

Рассмотренные предпосылки дают представление о сложности решения задачи оптимизации ОЭП наблюдения. Решение этой задачи потребует еще немало усилий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Малинин В.В. Методика имитационного компьютерного моделирования опτικο-электронных приборов наблюдения / В.В. Малинин // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы 7-й междунар. конф. АПЭП-2004. – Новосибирск: Изд. НГТУ, 2004. – Т. 6.
2. Малинин В.В., Математическое обеспечение системы ориентации КЛА по звездному полю / В.В. Малинин, А.В. Фалеев // Спутниковые системы связи и навигации. Тр. междунар. научно-техн. конф., 30 сент. 3 окт. 1997. Т. 1. – Красноярск: КГТУ. 1997.
3. Selected Papers on CCD and CMOS Imagers / Moon Gi Kang, Editor / SPIE Milestone Series MS177. – Bellingham: SPIE Press, 2003.

© И.А. Вишкова, Е.В. Грицкевич, В.В. Малинин,
А.В. Фалеев, З.М. Цетиногова, 2007

ДИФРАКЦИОННЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР

Разработан специальный дифракционный интерферометр с совмещенными ветвями, обеспечивающий чувствительность к изменению показателя преломления (Δn) $\sim 10^{-3}$ для образцов толщиной ~ 100 мкм.

Введение. Для высокоточного определения величины и расположения неоднородностей оптической толщины в прозрачных средах, таких как голографические фотополимерные материалы (ГФПМ), газодинамические струи, пламена, кристаллы, используемые в качестве активной среды в твердотельных лазерах, обычно применяются интерференционные методы. Постоянно существует необходимость в интерферометрах, которые были бы просты в изготовлении и одновременно устойчивы к внешним возмущениям, таким как вибрации, изменение температуры окружающей среды и др. Такие свойства присущи дифракционным интерферометрам с совмещенными ветвями и общим ходом интерферирующих пучков [1], в которых рекомбинация пучков осуществляется без дополнительных оптических компонентов.

Целью настоящей работы является создание методик и экспериментальной установки для изучения динамики фотопревращения ГФПМ спектрофотометрическим и интерферометрическим методами. Для визуального наблюдения и измерения изменения показателя преломления в ГФПМ в процессе экспонирования построен дифракционный интерферометр (ДИ) френелевского типа с совмещенными ветвями на основе зонных пластинок (ЗП).

Анализ оптической схемы дифракционного интерферометра. Интерферометр, подобный интерферометру Тальбота [1], образован двумя дополнительными ЗП.

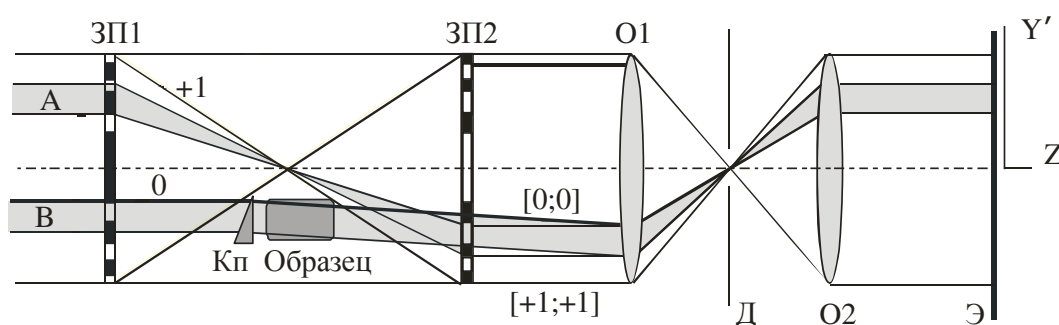


Рис. 1. Ход лучей через дифракционный интерферометр

Принципиальная оптическая схема ДИ и ход лучей изображены на рис. 1. Зонные пластинки ЗП1 и ЗП2 расположены конфокально. Схема освещается коллимированным лазерным пучком. Плоская монохроматическая световая волна после прохождения двух зонных пластинок образует множество пучков, обозначенных как $[m;n]$, т. е. пучок, попавший в m -й порядок первой ЗП и n -й

порядок второй. Рабочими порядками в интерферометре являются $[0; 0]$ и $[+1; +1]$. Их дифракционные эффективности (η_0^2 и η_1^2) составляют соответственно 6,25 % и 1,027 %. То есть почти 93 % света после второй ЗП уходит в паразитные порядки. Для их устранения в схему включен узел фильтрации, представляющий собой два конфокально расположенных объектива О1 и О2, в фокальной плоскости О1 расположена диафрагма Д. Диафрагма пропускает лишь пучки рабочих порядков, которые фокусируются в плоскости Д, и на экране Э в плоскости регистрации наблюдается чисто двухлучевая интерференция. Объектив О2 позволяет увеличить интерференционную картину на экране, если его фокусное расстояние больше, чем у объектива О1. Качество интерференционной картины определяется узлом фильтрации, основным элементом которого является диафрагма. Легко показать, что радиус диафрагмы r_D должен удовлетворять условию $\alpha F < r_D < \frac{dF}{f}$, где α – максимальный

угол, на который падающий луч отклоняется после образца, F – фокусное расстояние объектива О1, $2d$ – рабочий диаметр ЗП2, f – фокусное расстояние первого порядка дифракции ЗП.

Пучок А является опорным, пучок В – измерительным и несёт информацию обо всех неоднородностях образца. Пройдя сквозь образец, пучок В претерпевает дополнительный набег фазы $\delta = k(n - 1)L$, где k – волновое число, L – толщина образца, $n = n_0 + \Delta n$ – показатель преломления, Δn – неоднородности показателя преломления образца. Если L считать неизменной, то внося постоянные величины в δ_0 , получаем $\delta = \delta_0 + kL\Delta n$.

Измерить величину изменений оптической толщины образца возможно по сдвигу интерференционных полос, которые легко получить, сдвигая ЗП2 вдоль оси Y, что эквивалентно расположению перед образцом клиновидной пластины Кп, как показано на рис 1. Часть пучка $[0;0]$, прошедшая через клиновидную пластину, отклонится на угол $\alpha = \alpha_0(n_0 - 1)$, где α_0 – угол клина, n_0 – показатель преломления вещества, из которого сделан клин. Пучок $[+1; +1]$ остаётся параллелен оси и в отсутствие образца в плоскости экрана Э наблюдаются полосы от интерференции двух плоских волн. При внесении образца в интерферометр полосы смещаются. Ограничение на угол клина α_0 определяется выражением: $\alpha_0 < \frac{r_D}{F(n_0 - 1)}$. При $F = 75$ мм, $r_D = 0,2$ мм, $n_0 = 1,5$ находим $\alpha_0 < 5 \cdot 10^{-3}$

рад. При таком ограничении на угол клина на участке апертуры образца шириной 10 мм может поместиться до 160 полос, т. е. метод позволяет получать полосы шириной 60 мкм и более.

Важной характеристикой интерференционной картины является её контрастность. В случае низкой контрастности схема оказывается малочувствительной к изменениям оптической толщины объекта. Легко показать, что с учётом величины дифракционной эффективности ЗП и частичных отражений от граней образца контрастность картины составляет $K \approx 0,719$ (образец – из кварца, $n = 1,54$) и $K \approx 0,755$ (образец – кристалл калий-гадолиниевый вольфрамат, $n = 2$).

Экспериментальная установка. Для изучения динамики фотопревращения ГФПМ создана комплексная экспериментальная установка путём введения в оптическую схему ДИ дополнительной ветви, позволяющей отслеживать изменение оптической плотности вещества спектрофотометрическим методом.

Интерференционная ветвь экспериментальной установки состоит из He-Ne лазера ($\lambda = 0,6328$ мкм), коллиматора, блока зонных пластинок, узла фильтрации и экрана, за которым помещается цифровой фотоаппарат. Амплитудные линейные зонные пластинки рассчитаны на длину волны 0,6328 мкм и имеют фокусное расстояние первого порядка дифракции $f = 300$ мм. Зонные пластинки крепятся таким образом, чтобы дифракционные структуры на них были обращены друг к другу. Размер диафрагмы r_D равен 0,2 мм, фокусные расстояния объективов узла фильтрации O1 и O2 равны 75 мм. В плоскости регистрации помещается вращающийся экран из полупрозрачной бумаги и цифровой фотоаппарат *Canon PowerShot A80*. Образец помещается в измерительный пучок $[0; 0]$ интерферометра так, чтобы опорный пучок $[+1; +1]$ проходил, не задевая его.

Оптическая ось спектрофотометрической ветви пересекает ось ДИ под прямым углом. Для измерения спектра и интенсивности засвечивающего излучения используется спектрофотометр Avantes с высокостабильным широкополосным источником излучения.

Исследуемые образцы [2] представляли собой нанесённые на стеклянные подложки плёнки поливинилацетата с растворёнными в нём синтезированными красителями барбитурового ряда двух типов: (I) – 5-[5-(1,3-диметил-2,4,6-триоксо-тетрагидро-пиримидин-5-илиден)-пента-1,3-диенил]-1,3-диэтил-6 оксо-2-тиоксо-1,2,3,6-тетрагидро-пиримидин-4-олят тетрабутиламмония; (II) – 5-[5-(1,3-диметил-2,4,6-триоксо-тетрагидро-пиримидин-5-илиден)-пента-1,3-диенил]-1,3-диметил-2,6-диоксо-1,2,3,6-тетрагидро-пиримидин-4-олят тетрабутиламмония.

Измерения спектрофотометрическим методом. В первой фазе эксперимента для каждого образца измеряется спектр поглощения и определяется рабочая длина волны излучения, на которой поглощение максимально. Интенсивность падающего света составляла 0,2 мВт/см². Вторая часть эксперимента представляет собой непрерывное освещение образца светом рабочей длины волны с одновременным периодическим измерением спектра поглощения образца через равные временные интервалы δt . На рис. 2 показана динамика изменения спектра поглощения красителя (I) со временем t , D – оптическая

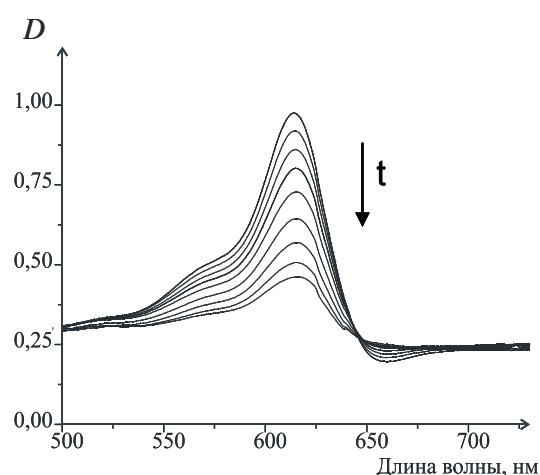


Рис. 2. Динамика изменения спектра поглощения красителя

плотность. Спектрофотометрическим методом показано, что скорости фотопревращения исследованных красителей (I) и (II) в процессе обесцвечивания близки по величине и составляют около $0,1 \text{ мин}^{-1}$.

Измерения интерферометрическим методом. Одновременно с измерениями спектрофотометрическим методом через временной интервал $\delta t = 30 \text{ с}$ фиксировались интерферограммы образцов. На рис. 3 показана серия интерферограмм, полученных при экспонировании образца с красителем (I). Временной интервал между приведёнными снимками составляет 60 с, т. е. интерферограммы показаны через одну.

С течением времени в области, соответствующей засвечиваемому участку образца, заметны существенные изменения. Кроме сдвига полос наблюдается качественное изменение картины: становится чётко видна граница засвечиваемого пятна, со временем пятно просветляется, что объясняется уменьшением оптической плотности образца.

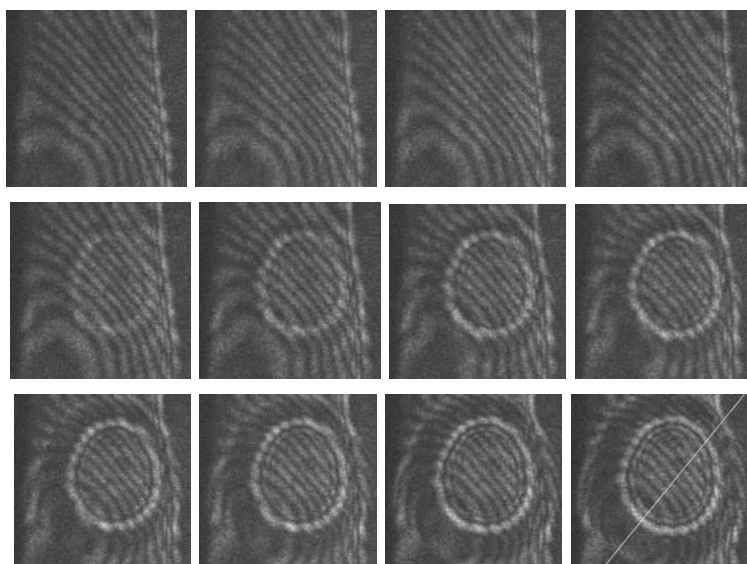


Рис. 3. Интерферограммы, полученные при экспонировании образца с красителем (I)

Для обработки интерферограмм разработана специальная программа. Программа позволяет строить график распределения яркости интерференционной картины вдоль любой прямой линии на интерферограмме (направление выбирается перпендикулярно направлению полос, как показано на последней интерферограмме, рис. 3), вычисления выполняются для одной полосы, расположенной примерно в центре пятна, где картина наиболее однородна. Из построенных графиков вычисляются координаты максимума этой полосы на каждой интерферограмме и рассчитывается величина изменения показателя преломления. Основным источником погрешности в схеме являются неточности в изготовлении ЗП и настройки схемы, вследствие чего интерференционные полосы могут быть искривлены даже в отсутствие образца. Легко показать, что ошибка определения оптической толщины образца прямо пропорциональна отношению ошибки определения координаты

экстремума к ширине полосы, которая зависит как от искривления интерференционной полосы, так и от собственно ошибки измерения координаты экстремума. Проведём оценку для заведомо значительных погрешностей. Если средняя неточность определения координаты экстремума – около 10% от ширины полосы, то ошибка составит $\sim 0,1\lambda$ (соответствует погрешности измерений показателя преломления $\sim 10^{-3}$ при $L \sim 100 \lambda$).

На рис. 4 показаны графики полученных зависимостей Δn от времени для исследованных красителей (I) и (II). В отличие от зависимости изменения относительной оптической плотности от времени, на данных графиках имеет место так называемый индукционный период, обусловленный инерционностью процесса фотополимеризации. Длительность данного периода составляет около 3 мин для красителя (I) и около 1,5 мин для красителя (II). Затем наблюдается быстрое изменение показателя преломления Δn . График на данном периоде можно аппроксимировать прямой, тангенс угла наклона которой будет характеризовать скорость фотополимеризации. Вычисленные скорости для красителей (I) и (II) составляют $0,031 \text{ с}^{-1}$ и $0,047 \text{ с}^{-1}$ соответственно. Длительность периода быстрого роста Δn составляет около 12 мин для красителя (I) и около 8 мин для красителя (II). Далее рост Δn замедляется и наступает насыщение.

Интерферометрическим методом показано, что у красителя (II) индукционный период короче, чем у красителя (I) в 2 раза, а скорость фотополимеризации выше в 1,5 раза. Насыщение красителя (II) наступает в 1,5 раза быстрее.

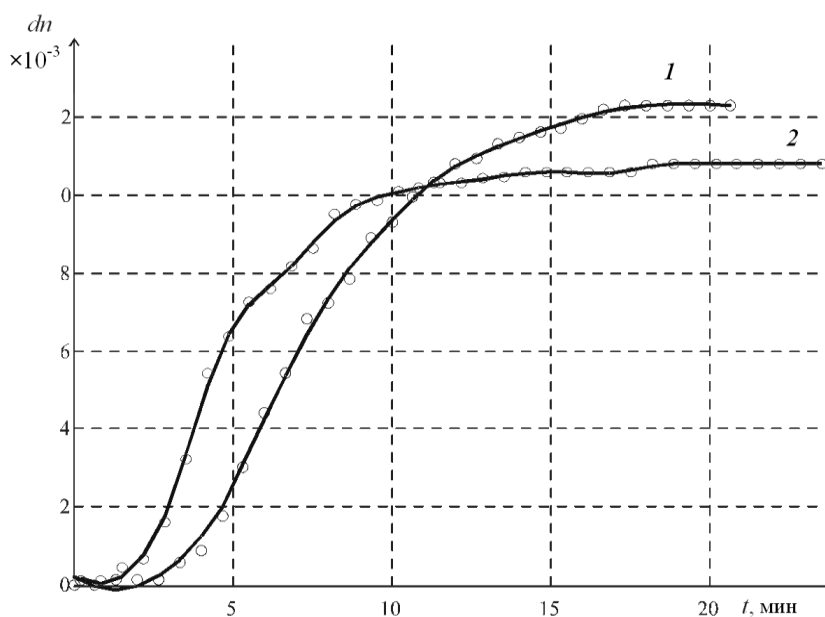


Рис. 4. График зависимости изменения показателя преломления Δn от времени для красителя (I) – кривая 1, для красителя (II) –

Выводы

На основе дифракционного интерферометра создана методика измерения показателя преломления при фотополимеризации органических голографических материалов в сочетании с измерением эволюции спектров поглощения образца. Показана достаточная чувствительность

интерференционной схемы ($\sim 10^{-3}$) для измерения фотоиндуцированных превращений в ГФПМ толщиной ~ 100 мкм. Измерены значения Δn в ГФПМ на основе двух новых красителей сенсibilизаторов – производных барбитуровой и тиобарбитуровой кислот. Проведено сопоставление динамики изменения Δn и оптической плотности в максимуме поглощения красителя в ходе экспонирования образца. Показано, что динамические кривые имеют различный характер. Созданная экспериментальная установка позволяет решать задачи измерения фотоиндуцированных изменений показателя преломления, возникающие при разработке новых регистрирующих сред.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дифракционные интерферометры на основе зонных пластинок. Ч. 1 / И.Г. Пальчикова, С.Л. Микерин, Т.В. Шевцова и др. // Компьютерная оптика: – М.: МЦНТИ, 2004. – Вып. 26. – С. 27–36.
2. Голографические фотополимерные материалы / В.В. Шелковников, Т.Н. Герасимова, В.А. Лоскутов и др. // Наука производству. – 2004. – №5. – С.2–6.

© И.Г. Пальчикова, В.И. Ковалевский, В.В. Шелковников, 2007

УДК 535.232.61: 621.383.522
В.А. Лабусов, Д.О. Селюнин
ИАиЭ СО РАН, Новосибирск
Р.Г. Галлямов
НГУ, Новосибирск
И.А. Зарубин
НГТУ, Новосибирск

КВАНТОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЛИНЕЙНЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ДЕТЕКТОРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ В СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ 180–800 НМ

В области атомно-эмиссионного спектрального анализа в настоящее время широко используется средство измерения интенсивности спектральных линий – анализаторы многоканальные атомно-эмиссионного спектра (анализаторы МАЭС), имеющие в своем составе линейки фотодиодов [1, 2]. Одним из параметров линеек, кардинальным образом влияющим на пределы обнаружения элементов, является квантовая эффективность (КЭ), равная отношению числа зарегистрированных фотоэлектронов к числу падающих на фотоячейку фотонов. Для минимизации влияния разброса КЭ фотодиодов линейки на метрологические характеристики анализаторов МАЭС необходимо знать значения и разброс КЭ во всем рабочем спектральном диапазоне (160–1100 нм).

Для измерения КЭ авторами была создана автоматизированная установка, получена расчетная формула и разработана программа управления процессом измерения. Способ определения КЭ линейки фотодиодов основан на сравнении выходных сигналов её фотоячеек с выходным сигналом калиброванного фотодиода (КФ) с известной КЭ. КЭ линейки определялась по формуле

$$\eta = kN\eta_k / U_k,$$

где η – КЭ исследуемой линейки фотодиодов, N – выходной сигнал с линейки фотодиодов, U_k – выходной сигнал с калиброванного фотодиода, η_k – КЭ калиброванного фотодиода, коэффициент k определяется параметрами линейки фотодиодов и КФ.

Схема установки показана на рис. 1. Осветительная система состояла из двух источников излучения: для области спектра 180–470 нм – лампа ДДС-30, а для 400–800 нм – галогенная лампа накаливания. Двойное разложение излучения в спектр в монохроматоре использовалось для снижения интенсивности рассеянного излучения в коротковолновой области. Он наполнялся очищенным азотом для исключения поглощения излучения в области 180–200 нм воздухом. Фотодиод AXUV-100G был прокалиброван Национальным Институтом Стандартизации и Технологии США. Изменение длины волны и перенаправление монохроматического излучения между КФ и линейкой фотодиодов осуществлялось шаговым приводом. Время измерения КЭ одной линейки фотодиодов составляло 12 мин.



Рис. 1. Схема измерительной установки

С помощью установки были получены экспериментальные значения КЭ для многих линеек фотодиодов типа БЛПП-369 в диапазоне 180–800 нм. Измерялись значения и степень разброса КЭ разных фотоячеек внутри одной линейки и между линейками. Сравнивались между собой линейки из разных партий, изготовленные при разных технологических маршрутах.

Для примера на рис. 2 показаны типичный график зависимости квантовой эффективности от длины волны излучения для линеек БЛПП-369 (легирующая примесь – мышьяк, покровная пленка – слой SiO_2 толщиной 1000 Å), а также график КЭ линейки фотодиодов, в покрытии которой имеется слой нитрида кремния. Видно, что при использовании в покрытии фотодиодов нитрида кремния КЭ резко уменьшается в коротковолновой области спектра.

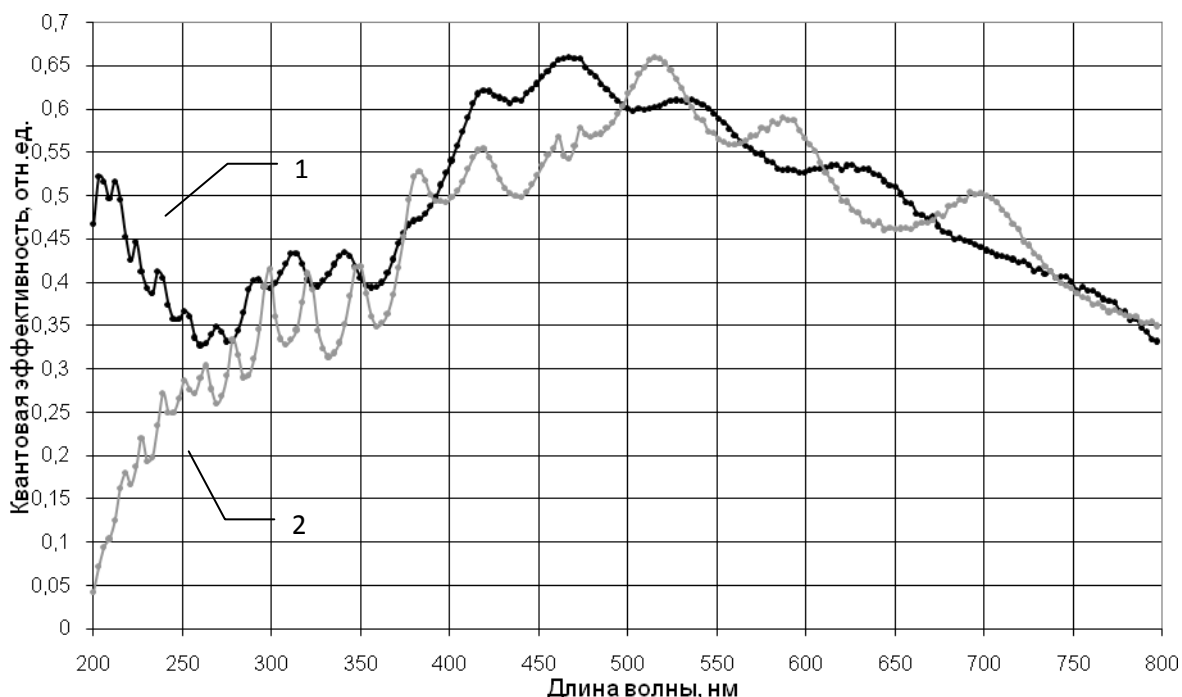


Рис. 2. Графики зависимости квантовой эффективности от длины волны излучения для линеек БЛПП-369 с различными покровными пленками:

1 – один слой SiO_2 , толщина – 1000 Å; 2 – три слоя: SiO_2 , толщина – 1000 Å;

Si_3N_4 , толщина – 1350 Å; SiO_2 , толщина – 0,5 ÷ 1,0 мкм

На рис. 3 представлены графики КЭ линеек с разными легирующими элементами. Видно, что линейки, в которых фотоячейки легированы мышьяком, обладают более высокой КЭ в коротковолновой области спектра.

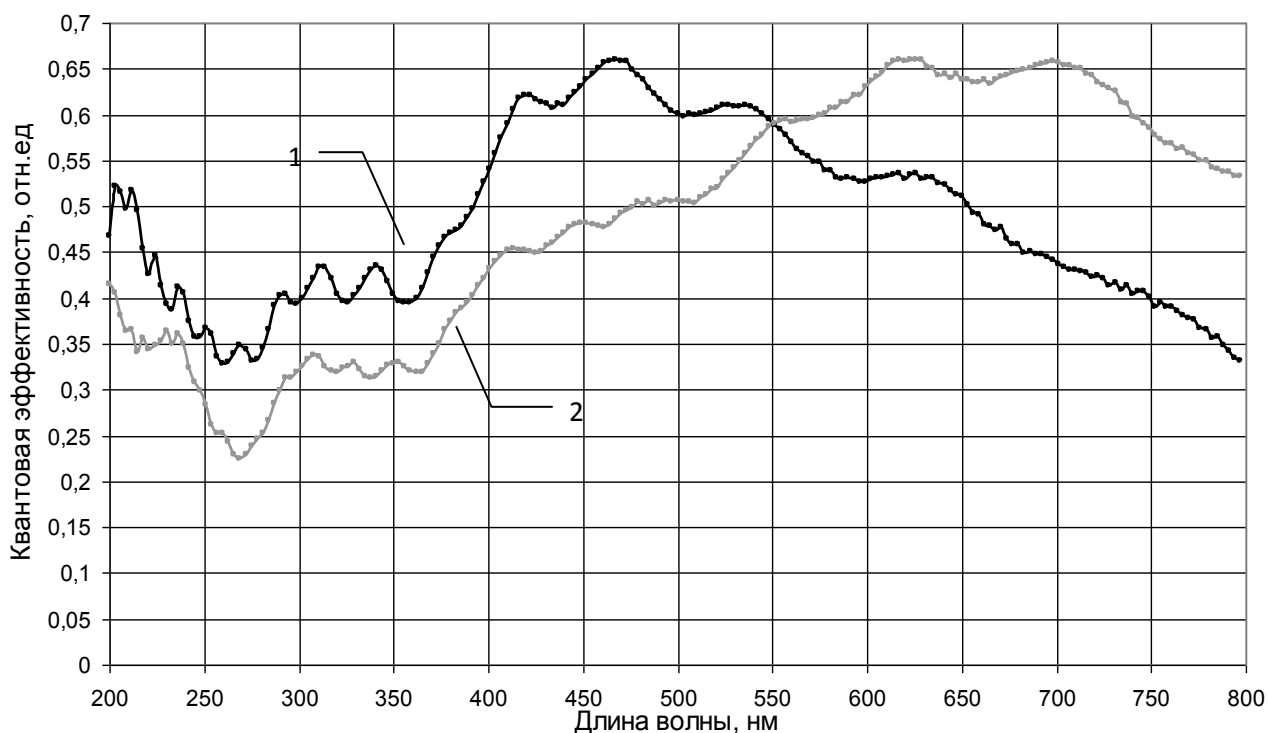


Рис. 3. Зависимость квантовой эффективности от длины волны излучения для линеек БЛПП-369 с разными легирующими элементами
1 – мышьяком; 2 – фосфором

Для сравнения были проведены измерения КЭ нескольких образцов ПЗС-линеек фирмы SONY. На рис. 4 представлены графики КЭ ПЗС-линеек ILX-526 с покрытием и без покрытия люминофором, а также типичный график КЭ линейки БЛПП-369. Нанесение люминофорного покрытия повышает КЭ ПЗС-линеек в коротковолновой области, однако даже с люминофорным покрытием КЭ ПЗС-линеек в области 180 – 360 нм в два раза ниже КЭ линеек БЛПП-369.

При нанесении люминофора амплитуда колебаний значений КЭ значительно уменьшается, поскольку её величина обратно пропорциональна среде, с которой граничит покровный слой ПЗС-линейки. Без люминофорного покрытия этой средой является воздух, при нанесении люминофора этой средой становится собственно люминофор, показатель преломления которого больше показателя преломления воздуха.

В результате проведенной работы удалось экспериментально подтвердить, что путем легирования поверхности полупроводника мышьяком и использования защитных пленок из двуокиси кремния КЭ детекторов существенно повышается (в сравнении с легированием фосфором и защитной

пленкой из нитрида кремния) в области 180–400 нм и достигает значений 30–50 % и более.

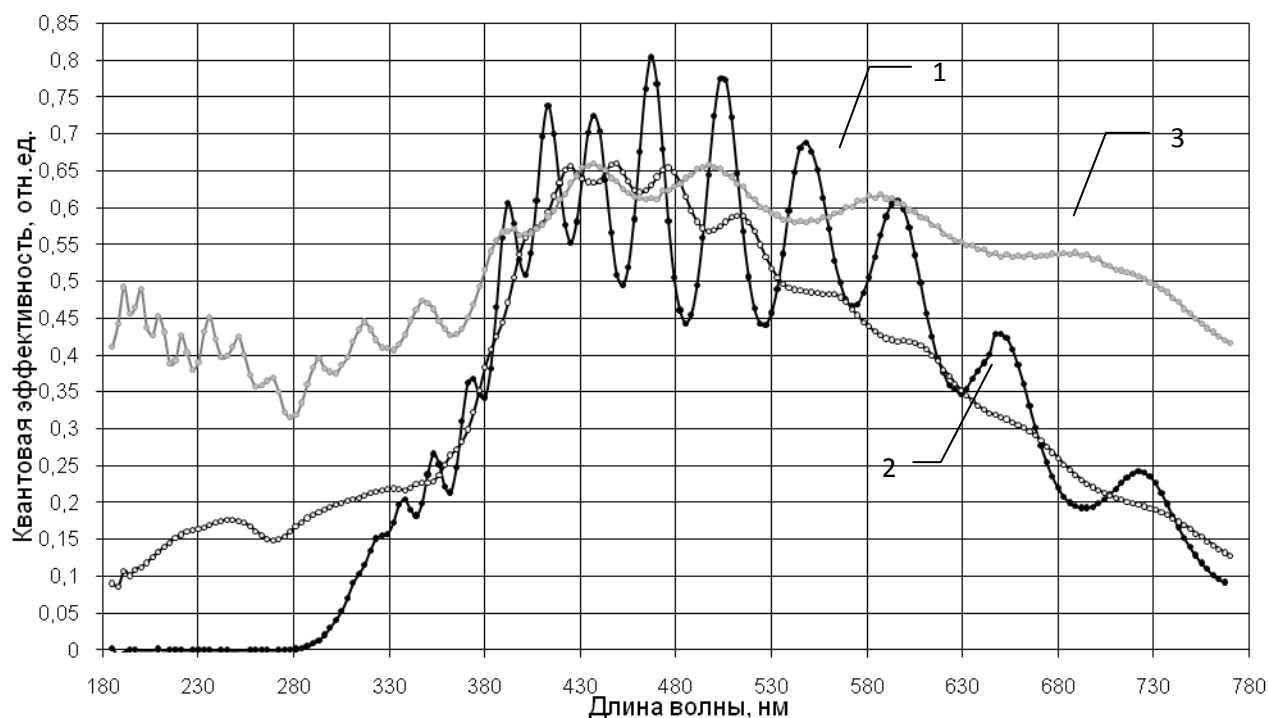


Рис. 4. Зависимость квантовой эффективности от длины волны излучения для ПЗС-линеек ILX-526 (1 – без люминофора в покрытии, 2– с люминофором в покрытии) и линейки фотодиодов БЛПП-369(3)

Разброс значений КЭ фотоячеек одной линейки фотодиодов БЛПП-369 составляет не более 10 %, в то время как для линеек из разных партий он достигает 30 %. ПЗС-линейки без люминофорного покрытия нечувствительны к излучению с длинами волн 180–280 нм, нанесение люминофорного покрытия делает возможным использование ПЗС-линеек в этом спектральном интервале, однако их КЭ меньше КЭ линеек фотодиодов более чем в два раза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анализаторы МАЭС и их использование в качестве систем регистрации и обработки атомно-эмиссионных спектров/ В.А. Лабусов, В.И. Попов, А.Н. Путьмаков и др. //Аналитика и контроль. – 2005.– Т. 9. – № 2. – С. 110–115.
2. Многоэлементные твердотельные детекторы излучения большого размера для атомно-эмиссионного спектрального анализа / В.А. Лабусов, В.И. Попов, А.В. Бехтерев и др. // Аналитика и контроль. – 2005. –Т. 9. – № 2. – С. 104–109.

© В.А. Лабусов, Д.О. Селюнин, Р.Г. Галлямов, И.А. Зарубин, 2007

КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ НАБЛЮДЕНИЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Потребность вооруженных сил в современных оптико-электронных средствах разведки и наблюдения высока, особенно остро ощущается потребность во круглосуточных оптико-электронных средствах позволяющих вести разведку, как днем, так и ночью. Наиболее эффективны для ведения круглосуточной разведки многоканальные оптико-электронные системы (МОЭС). Каждый канал МОЭС работает в собственном спектральном диапазоне, расширение же спектрального диапазона разведки влечет за собой повышение информативности получаемых разведданных.

Каждый канал МОЭС имеет свои ограничения в работе, накладываемые внешними условиями: уровнем освещенности, влажностью воздуха, задымленностью атмосферы и т.д. Синтез изображения позволяет в МОЭС преодолеть эти ограничения, что дает возможность вести непрерывную разведку даже в сложных условиях, подтверждая тем самым целесообразность применения МОЭС.

Обоснование состава каналов МОЭС

На эффективность применения оптико-электронных средств особое влияние оказывают три основных фактора: параметры атмосферы, освещенность и параметры цели.

Основной целью построения многоканальных оптико-электронных средств является:

- Всесуточная работа в сложных погодных условиях;
- Повышение информативности.

Параметры атмосферы и освещенность в основном определяют дальности работы оптико-электронных средств. Параметры цели определяют информативность разведки. В тепловизионном диапазоне свыше 3 мкм температурный контраст цели с фоном цели, так же определяет дальность работы оптико-электронных средств.

На рис. 1 приведен пример картины пропускания атмосферы в части ИК диапазона, которая в основном определяется поглощением излучения газовой средой. На примере этой картины можно убедиться в том, что эффективность работы ОЭС напрямую зависит от его спектрального диапазона и, следовательно, максимум эффективности работы ОЭС можно добиться только в полосах «прозрачности» атмосферы.

При этом стоит отметить, что в различных диапазонах спектра основные потери, связанные с поглощением определяются различными составами газовых сред и примесей. Так если в диапазоне 1÷2 мкм коэффициент пропускания определяется в основном величиной концентрации углекислого газа (CO₂), то в диапазонах 3÷5, 8÷12 мкм основные потери происходят из-за

поглощения излучения водяными парами (H_2O) и гораздо менее зависят от концентрации остальных примесей.

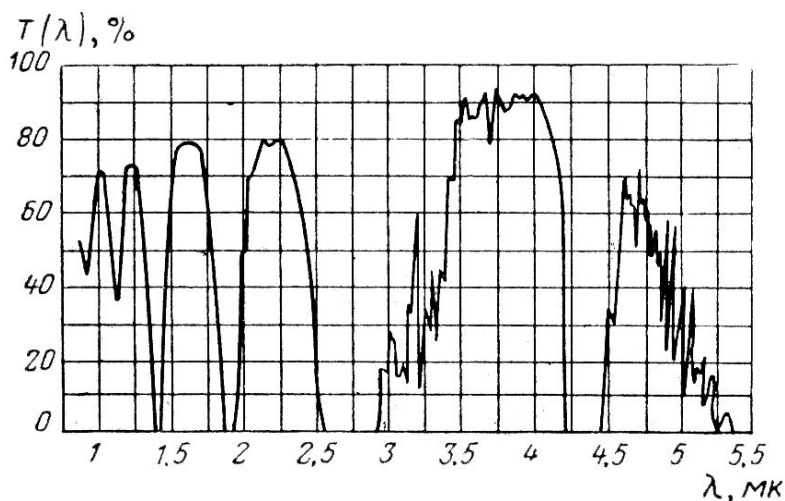


Рис. 1. Картина пропускания атмосферы в части ИК диапазона

Освещенность объекта излучением атмосферы, определяет уровень интенсивности отраженного излучения от объекта фиксируемого ОЭС. Уровень освещенности определяет эффективность работы ОЭС УФ, видимого и ближнего ИК диапазона, но не влияет на эффективность работы ОЭС тепловизионного диапазона, где определяющую роль играет собственное тепловое излучение объекта. Таким образом, ОЭС тепловизионного диапазона обладают возможностью круглосуточной работы, но более низкой информативностью, чем видимого и ближнего ИК диапазона.

Применяя оптико-электронные каналы, работающие в разных спектральных диапазонах, мы можем добиться непрерывной круглосуточной работы в самых различных погодных условиях.

Вторая задача – повышение информативности – решается путем синтеза изображения нескольких оптико-электронных каналов.

Изображение от каждого из каналов, работающих в своем спектральном диапазоне, обладает индивидуальными особенностями и характерными признаками.

Характерными отличительными признаками ОЭС УФ, видимого и ближнего ИК диапазона являются различные значения контраста объекта с фоном, которые зависят от отлученности объекта и коэффициента спектральной яркости объекта и фона в рабочих диапазонах длин волн ОЭС.

Контраст между различными объектами разведки и фоном в различных диапазонах длин волн существенно отличается.

Характерными признаками ОЭС тепловизионного диапазона является тепловая отметка объекта на тепловом фоне местности. При этом в спектральном диапазоне 3÷5 мкм по сравнению со спектральным диапазоном 8÷12 мкм хорошо видны более нагретые тела. Это является следствием закона Планка. На рис.2 представлен графический вид формулы Планка излучения нагретых тел для различных температур. Работа одновременно в двух

тепловизионных диапазонах $3 \div 5$ и $8 \div 14$ мкм позволит регистрировать излучение объектов в более широком динамическом диапазоне температур.

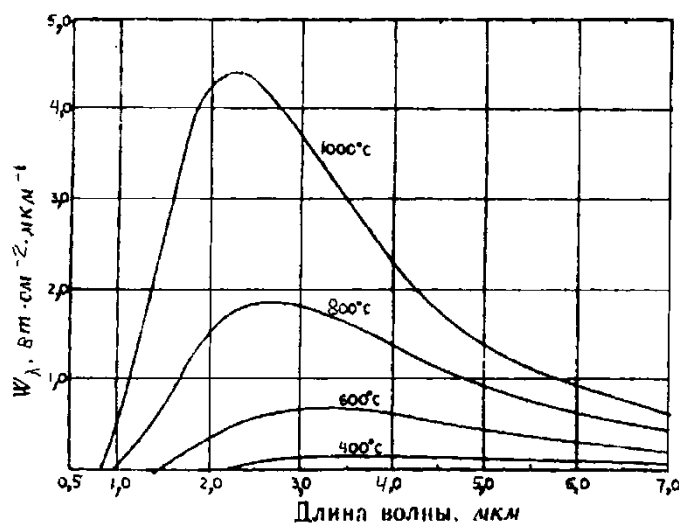


Рис. 2. Кривые планка

Одновременное использование двух спектральных диапазонов ($3 \dots 5$ и $8 \dots 13$ мкм) в ОЭС, предназначенной для обнаружения и распознавания на пестром фоне целей типа “танк”, существенно увеличивает вероятность правильного обнаружения целей (на $5 \dots 7\%$), по сравнению с той же вероятностью при использовании одного канала.

Наблюдениями психофизиологов установлено, что человек при опознавании образов пользуется, главным образом, принципом предпочтительности тех или иных признаков. С этой целью он производит сопоставление объектов одного класса, выделяя их общность и отбирая разделяющие признаки.

Особенностью психофизиологических процессов восприятия зрительной (оптической) информации у высших животных и человека является декорреляция изображений в пространстве и времени в целях устранения статистических избыточных связей соседних элементов изображения и последовательных кадров уже в системе первичной обработки информации. Это позволяет использовать только наиболее информативные признаки распознаваемых образов и наиболее экономно закодировать информацию для передачи ее в систему вторичной обработки – в мозг.

Таким образом, синтезируя в едином изображении отличительные признаки изображения различных каналов и акцентируя на них внимание возможно резко повысить информативность изображения и эффективность ведения разведки, и чем большее число отличительных признаков будет получено в процессе разведки, тем более информативной будет синтезированное изображение. Таким образом, чем больше оптико-электронных каналов различного диапазона будет задействовано для видения разведки, тем эффективней процесс разведки.

МОЭС может иметь в своем составе следующие приемные каналы:

- Тепловизионный канал, работающий в спектральном диапазоне $8\div 14$ мкм;
- Тепловизионный канал, работающий в спектральном диапазоне $3\div 5$ мкм;
- Ночной телевизионный канал на базе ЭОП. Оснащенный лазерным излучателем подсветки ночной канал может работать в активно-импульсном режиме, а также производить обнаружение оптико-электронных средств (ОЭС) на основе эффекта световозвращения;
- Дневной телевизионный канал на базе высокочувствительной цифровой телевизионной матрицы;
- Лазерный дальномер с длиной волны излучения 1,54 мкм;
- Телевизионный канал УФ диапазона на базе «солнечно-слепого» ЭОП работающего днем в пассивном режиме, а ночью, при комплектации МОЭС лазерным излучателем подсветки в УФ спектре, в активном режиме. Телевизионный канал УФ диапазона предназначен для обнаружения замаскированных объектов по разности коэффициентов спектральной яркости объектов и фонов;
- ИК канал ближнего диапазона $1,1\div 2,5$ мкм на основе охлаждаемой матрицы InSb формата 320×240 , предназначенный для обнаружения замаскированных объектов по разности коэффициентов спектральной яркости объектов и фонов.

Модульный принцип построения конструкции

Исходя из области применения, предназначения, дальности действия и климатических условий эксплуатации, к МОЭС предъявляются различные тактико-технические требования (ТТТ). ТТТ накладывают требования к конструкции и элементной базе, что обуславливает возникновение большого количества вариантов МОЭС, вследствие чего, так же возрастают необходимые ассигнования для удовлетворения потребностей в МОЭС различных силовых структур и родов войск.

Выходом из создавшегося положения является разработка модульной многоканальной оптико-электронной системы разведки, наблюдения и прицеливания широкого применения: наземного, воздушного, морского.

Таким образом, по сравнению с концепцией индивидуальной разработки приборов под определенные задачи и условия эксплуатации концепция построения «универсального» назначения более эффективна.

Принцип построения модульной МОЭС заключается в следующем:

- МОЭС состоит из модулей приемных каналов, модулей излучателей, универсального модуля обработки и управления, модуля видеосмотрового устройства (ВСУ), а так же может включать в себя датчики неоптического типа. Предполагаемое количество каналов 7;
- Основой МОЭС является универсальный модуль обработки и управления, выполняющий функции обработки, синтеза и комплексирования данных от приемных каналов, генерации служебной информации, вывода комплексированного изображения на ВСУ и управления работой МОЭС;

- МОЭС обладает свойствами мультизадачности, имеет возможность приема и обработки данных от различного числа каналов и выдачу соответствующих сигналов управления модулями (в том числе гиостабилизированной платформой) в реальном времени. Мультизадачность реализуется аппаратно и задается программно в зависимости от состава МОЭС;
- Каждый модуль приемного канала совместно с модулем обработки и управления и модулем ВСУ является полноценным наблюдательным прибором;
- Комбинация приемных модулей и модулей излучателей дает возможность получать различные варианты МОЭС для решения задач разведки, наблюдения и прицеливания;
- Приемные модули конструктивно стыкуются друг с другом. В варианте, показанном на рис.1, имеет место объединение ночного ТВ канала, дневного ТВ канала и приемного канала дальномера на основе совмещения оптических осей;
- Модули приемного канала строятся на основе модулей объективов с разными фокусными расстояниями и модулей приемников с различными ТХ. Взаимная комбинация этих модулей позволяет добиваться необходимых ТТХ и стоимости приемного канала. Предполагается использовать модульный ряд объективов с фокусными расстояниями от 25 до 500 мм;
- Потребитель может при необходимости изменять состав каналов;
- Модули каналов МОЭС в основном варианте имеют каркасную основу. МОЭС может устанавливаться в разные корпуса и на различные посадочные места в зависимости от состава и конструктивных особенностей применения;
- В зависимости от количества каналов, ТТХ МОЭС может являться носимым или транспортируемым прибором. Условиями эксплуатации и разрешающей способности приемных каналов определяется тип модуля ВСУ;
- Транспортируемые МОЭС могут устанавливаться на гиостабилизированную платформу.

© Г.Н. Попов, Н.Н. Мордвин, 2007

УДК 621.791.72

А.Г. Верхогляд

КТИ НП СО РАН, Новосибирск

ЛАЗЕРНОЕ МИКРОПРОФИЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ

Развитие средств связи и глобальных навигационных систем требует разработки технологии создания большеразмерных (диаметром в несколько метров) прочных антенн с заданной диаграммой направленности. Одной из наиболее перспективных технологий синтеза таких антенн является технология нанесения на заранее сформированную поверхность из углепластика тонкой металлической пленки с последующим ее удалением в соответствии с заранее рассчитанной конфигурацией. Эта технология требует прецизионной (для антенн миллиметрового диапазона сформированная картина должна отличаться

от расчетной не более чем на несколько десятков мкм по всему полю антенны) аппаратуры для удаления металлической пленки в соответствии с рассчитанной топологией. Одной из возможностей формирования заданной топологии является использование многокоординатного лазерного технологического комплекса (ЛТК), оснащенного мощным импульсным лазером [1]. В ходе выполнения данной работы ставилась задача разработать и изготовить прецизионный многофункциональный лазерный комплекс для обработки трехмерных изделий произвольной формы и технологический лазер для реализации процесса абляции (испарения без перевода в жидкую фазу). Виды выполняемых комплексом технологических операций: резка изделий из металлов толщиной до 6 мм, сварка металлических изделий толщиной до 2 мм и микропрофилирование поверхности с использованием процесса абляции. Размер обрабатываемых изделий может достигать 3 000 × 3 000 × 600 мм, при характерном размере единичного элемента микропрофиля не более 0,5 × 0,5 мм и отклонении положения синтезированного элемента от заданного менее 20 мкм в любой обрабатываемой точке.

Размер пятна лазерного излучения на поверхности обрабатываемого изделия выбирался равным размеру минимального элемента рассчитываемой топологии профиля поверхности. Пятно на обрабатываемой поверхности имело форму квадрата со стороной 0,5 мм. Исходя из того, что пленка металла по всей площади пятна должна полностью испаряться в результате воздействия одного импульса, можно найти нижнюю границу значения энергии лазерного импульса:

$$W_{\text{имп.}} \geq S_0 \times L_{\text{пл.}} \times \rho \times (C_p \times \Delta T + r_p + q_p) / (1 - R),$$

где S_0 – площадь лазерного луча на обрабатываемой поверхности, $L_{\text{пл.}}$ – толщина испаряемого материала, ρ – плотность материала, R – коэффициент отражения обрабатываемой поверхности, ΔT – изменение температуры испаряемого материала (фактически температура кипения испаряемой пленки), C_p , r_p , q_p – удельная теплоемкость, удельная теплота парообразования и удельная теплота плавления материала пленки соответственно. Величина R меняется в процессе взаимодействия материала с лазерным излучением, и при проведении оценок была принята равной 0,8. Выбрав в качестве материала Al и подставив соответствующие значения величин, получим: $W_{\text{имп.}} \geq 15$ мДж. Длительность импульса определялась из условия равенства толщины нагреваемого материала, за время действия импульса и толщины пленки на поверхности подложки. Характерное значение коэффициента поглощения излучения для металлических пленок $\delta \geq 10^5$ см⁻¹. При толщине испаряемой пленки L даже в несколько микрометров выполняется условие прогрева материала пленки вследствие действия механизма термодиффузии. В этом случае толщина прогрева металла $L_T = (\chi \tau_{\text{и}})^{1/2}$, где χ – коэффициент температуропроводности материала пленки, $\tau_{\text{и}}$ – длительность лазерного импульса [2]. Подставив соответствующие значения величин для алюминия из этого равенства можно найти значение длительности лазерного импульса, $\tau_{\text{и}} \sim 10^{-8}$ с. Из вышеприведенных качественных оценок и были определены длительность, энергия и мощность единичного лазерного импульса. Частота следования лазерных импульсов должна обеспечивать достаточную производительность (обработка детали за одну или две смены)

ЛТК. В результате были сформулированы следующие требования к технологическому лазеру:

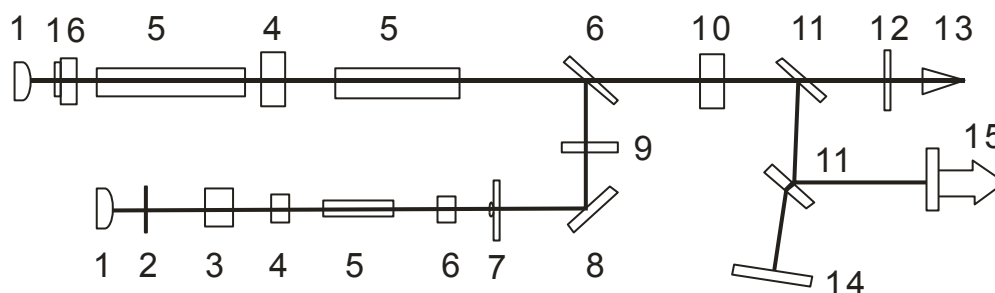
длина волны излучения	0,532 мкм (вторая гармоника) или 1,064 мкм;
режим работы	импульсно-периодический;
частота повторения импульсов	300 Гц;
длительность единичного импульса	10 нс;
средняя мощность излучения (на длине волны 0,532 мкм)	10 Вт;
модовый состав излучения	основная мода TEM_{00} .

При разработке конструкции излучателя были рассмотрены и экспериментально опробованы несколько схем излучателей. Одна из них – схема с поляризационно-замкнутым резонатором. Данная схема нечувствительна к вызванному теплом двулучепреломлению, так как деполяризованное излучение в стержне не выбрасывается из резонатора из-за пространственного разделения ортогонально поляризованных компонентов благодаря поляризаторам. Также исследовалась оптическая схема с поляризационно-связанным резонатором. Основным недостатком этих схем была низкая стабильность параметров единичного импульса (нестабильность параметров достигала 20 %).

В результате исследований была выбрана оптическая схема лазерного излучателя, представленная на рис. 1.

Излучатель построен по схеме «задающий генератор (ЗГ) – усилитель (УС)». Эта схема позволила вписаться в заданные габариты. Резонатор ЗГ образован выпуклым зеркалом 1 (радиус кривизны 1,5 м) и профильным (гауссовым) зеркалом 7 с коэффициентом отражения 50 % в центре зеркала. Модуляция добротности ЗГ осуществляется электрооптическим затвором (ЭОЗ) из кристалла DKDP, помещенного в герметичную кювету с просветленными окнами, и тонкопленочного поляризатора 6, установленного под углом Брюстера ($\sim 56^\circ$) к падающему излучению; при этом поляризатор пропускает только «Р» поляризацию излучения (поляризацию перпендикулярную к плоскости рисунка). ЭОЗ работает по четвертьволновой схеме на сброс напряжения. 90-градусный вращатель поляризации 4 из оптически активного кварца частично устраняет термически наведенное двулучепреломление в ЭОЗ и активном элементе 5 или компенсирует одно другим. Активный элемент 5 (как в ЗГ, так и в УС) представляет собой кристалл АИГ:Nd³⁺ размером $\varnothing 4 \times 65$ мм с просветленными на длине волны 1,064 мкм торцами. Накачка активных элементов осуществляется лампами ИНП4-5/60. Селекция поперечных мод в ЗГ осуществляется диафрагмой 2 диаметром 2,5 мм и профильным выходным зеркалом 7. Излучение ЗГ с вертикальной поляризацией с помощью плоского зеркала 8, плосковогнутой линзы 9 с радиусом кривизны 200 мм и пленочного поляризатора 6 заводится в усилитель, состоящий из двух активных элементов 5, между которыми находится 90-градусный вращатель поляризации 4, выполняющий ту же роль, что и в ЗГ (т. е. термически наведенное двулучепреломление одного стержня УС компенсируется таким же двулучепреломлением другого стержня УС). Отрицательная линза 9 и возвратное плотное выпуклое зеркало 1 с радиусом кривизны отражающей поверхности 1 м позволяют частично компенсировать термически наведенную положительную

линзу активных элементов усилителя. Четвертьволновая пластинка 16 после двух проходов излучения через нее (к плотному зеркалу 1 и обратно) поворачивает поляризацию излучения на 90° , что позволяет излучению после второго прохода по УС пройти через поляризатор 6 и поступить излучение в кристалл КТР размером $6 \times 6 \times 14$ мм, в котором происходит преобразование излучения с удвоением частоты при взаимодействии I I типа (oe-e). После КТР излучение со и 2ω поступает на селектирующее зеркало 11, пропускающее со к поглотителю в виде конуса с сильно рассеивающей линзой перед ним, а 2ω , отразившись от зеркала 11, выходит из излучателя через просветленное окно 15. Так как зеркала 11 отражают примерно 10% излучения основной частоты (ω), то после второго зеркала 11 размещена стеклянная поглощающая пластинка 14 (нейтральный фильтр НС).



1. Выпуклое зеркало, 2 - диафрагма, 3 - электрооптический модулятор
4 - 90° вращатель поляризации, 5 - Nd:AYG активный элемент, 6 - поляризатор, 7 - профильное зеркало, 8 - поворотное (селективное - $1,064$ мкм) зеркало, 9 - корректирующая линза, 10 - кристалл удвоитель, 11 - поворотное (селективное - $0,532$ мкм) зеркало, 12 - двояковогнутая линза, 13 - поглотитель (конус), 14 - поглотитель (цветное стекло), 15 - выходное окно, 16 - четвертьволновая пластинка.

Рис. 1. Оптическая схема лазерного излучателя

В 2004 г. был изготовлен и испытан ЛТК LSP-2000. Комплекс работает в автоматическом режиме и обеспечивает выполнение следующих технологических операций: резки, сварки и лазерной абляции. Для выполнения этих операций комплекс оснащен двумя технологическими лазерами. Испытания и последующее практическое применение комплекса показали его высокие технические характеристики:

размер обрабатываемых деталей, мм	$3\,000 \times 3\,000 \times 600$
погрешность обработки, мкм, не более	± 10
скорость обработки м/мин	6
форма обрабатываемых деталей	произвольная
обрабатываемые материалы:	сталь, алюминий, титан, никель и др.

Применение оригинальных конструкторских и инженерных решений обеспечило работу комплекса с заданной точностью, без заклинивание портала и других механических частей в диапазоне температур от $+18^\circ$ до $+30^\circ$ С. Применение воздушных подшипников в системе основных приводов комплекса позволило предотвратить его механический износ.

Тестировались метрологические параметры комплекса: контурная точность движения исполнительного элемента, точность и повторяемость его выхода в заданную точку, точность перемещения по отдельным координатам, максимальная скорость перемещения, а также технологические возможности комплекса – возможность обработки различных материалов, а также выполнение задания по заранее подготовленному чертежу. Результаты тестирования точности перемещения исполнительного механизма по различным координатам приведены в таблице, в которой приведены максимальные значения неопределенности перемещений вдоль различных координат во всем диапазоне перемещений. Погрешность перемещений контролировалась с помощью лазерного интерферометрического преобразователя перемещений [3]. Иллюстрацией точности контурного перемещения исполнительного элемента служит рис. 2.

Таблица

Направление перемещения	Неопределенность позиционирования
Вдоль координаты X	≤ 6 мкм
Вдоль координаты Y	≤ 6 мкм
Вдоль координаты Z	≤ 2 мкм
Поворот вокруг вертикали	≤ 1 мкм
Поворот вокруг горизонтали	≤ 1 мкм

Данная фигура была сформирована многократным прохождением исполнительного элемента по одной и той же траектории. Тестирование других метрологических параметров, когда это технически было возможно, также производились с помощью интерферометрического измерителя перемещений, в остальных случаях измерения производились косвенным образом по результатам выполнения различных тестовых заданий.

Общие результаты тестирования показали, что созданный ЛТК полностью соответствует сформулированным требованиям и позволяет производить прецизионную обработку (микропрофилирование) поверхности тел произвольной формы. В частности, с помощью данной системы был реализован синтез антенных решеток с заданной диаграммой направленности.

Процесс выполнения технологических операций показан на рис. 3. В процессе испытаний производилась резка металла, в том числе нержавеющей стали и титана толщиной 6 мм. Резка металла производилась по сложному контуру при произвольной форме поверхности. При микропрофилировании поверхности производилось испарение никелевых пленок толщиной до 10 мкм с поверхности изделий.

Уникальная совокупность достигнутых технических параметров, а также возможности, заложенные в системе управления, системе позиционирования, позволяют на базе комплекса LSP-2000 создать контрольно-измерительную машину с неопределенностью результатов измерений не более 5 мкм в любой точке рабочего объема.

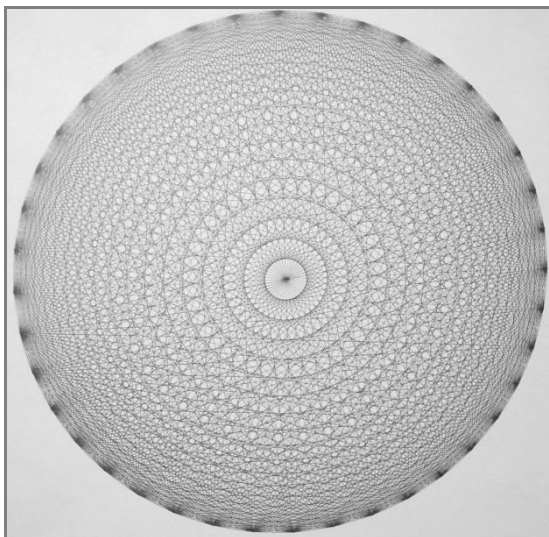


Рис. 2. Образец рисунка, сформированного ЛТК LSP-2000



Рис. 3. Вид обрабатываемой антенны с заданной диаграммой направленности

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Базин В.С. Многофункциональная прецизионная лазерная технологическая система для обработки больших размеров деталей произвольной топологии / В.С. Базин, А.Г. Верхогляд, И.А. Выхристюк и др. // Автометрия. – 2005. – Т. 41. – № 6. – С. 107–114.
2. Ахманов С.А. Физическая оптика / С.А. Ахманов, С.Ю. Никитин. – М.: МГУ, 1998.
3. Ведерников В.М. Применение лазерного интерферометра для контроля и юстировки измерительных систем тяжелых станков / В.М. Ведерников, В.П. Кирьянов, Г.А. Лебедев // Станки и инструмент. – 1978. – № 4.

© А.Г. Верхогляд, 2007

УДК 681.785

В.Л. Жуков, В.М. Красавцев, Б.П. Павлов, А.Н. Семенов, К.Н. Чиков
СПбГУИТМО, Санкт-Петербург

УФ-ВИДЕОСПЕКТРОМЕТР С «НОРМАЛЬНЫМ» СПЕКТРОМ

Дистанционное зондирование представляет собой процесс измерения спектральных и пространственных характеристик удаленных объектов посредством чувствительных устройств, не находящихся в непосредственном контакте с предметом исследования. В настоящее время устройства подобного типа устанавливаются, как правило, на борту авиационных и космических носителей, причем все больший интерес у исследователей вызывает ультрафиолетовый (УФ) диапазон спектра.

Как показывает международный опыт последних десятилетий, среди оптико-электронных приборов и устройств для дистанционного зондирования наибольшей эффективностью обладают малогабаритные бортовые видеоспектрометры (imaging spectrometers), обеспечивающие поэлементную регистрацию спектров и структуры рассматриваемых удаленных объектов. Они предоставляют широкие возможности для зондирования Земли и околоземного

пространства, выявляя самые изощренные естественные и искусственные маскировки исследуемых объектов. Получаемые данные от таких приборов могут использоваться как совместно с видеоданными о топологии наблюдаемых объектов, так и самостоятельно. Их высокие информационные возможности определяются формированием и раскрытием новой системы спектральных признаков, основанных на характерных различиях спектров собственных излучений и спектров отражений у природных и антропогенных объектов. При этом обработка видеоспектральных данных хорошо поддается автоматизации.

Видеоспектрометр, как правило, включает в себя проецирующий объектив и приборную спектральную часть, состоящую из входной щели, коллиматорного объектива, диспергирующего элемента или системы (чаще всего, на базе плоской фазовой отражательной дифракционной решетки), камерного объектива и двухкоординатного, матричного приемника излучения, который позволяет одновременно осуществлять и пространственное, и спектральное сканирование. При этом каждая строка матричного приемника, располагаемая строго поперек направления (трассы) полета носителя, фактически регистрирует детальное монохроматическое изображение узкой полосы земной поверхности и обеспечивает развертку этого изображения по пространству, а сканирование по пространству получается за счет движения носителя. Сканирование по спектру, осуществляемое электроникой приемника излучения, а также максимальное количество спектральных интервалов, разрешаемых таким видеоспектрометром, определяется числом строк этого приемника. Сколько строк в приемнике – столько, в принципе, можно зарегистрировать монохроматических узкополосных изображений участка местности, над которой пролетает носитель, причем эта цифра может достигать нескольких сотен.

Таким образом, видеоспектрометры данного класса обеспечивают разложение в спектр узких протяженных участков земной поверхности, расположенных перпендикулярно трассе полета и изображаемых проецирующим объективом во входной щели прибора. Движение носителя позволяет формировать полноразмерные монохроматические кадры в виде последовательности соответствующих монохроматических изображений узких полос земной поверхности, распределенных непрерывно вдоль трассы полета. При этом видеоспектрометры, совмещают в себе высокое пространственное разрешение, свойственное высококачественным аэрофотоаппаратам, и высокое спектральное разрешение, присущее лучшим классическим спектральным приборам.

Особенностью функционирования видеоспектрометра является статическое состояние всех его элементов, систем и блоков, при котором у работающего прибора отсутствует какое-либо механическое движение кинематических цепей и пар. Этому способствует применение двухкоординатных, матричных приемников излучения, создаваемых, в частности, на базе приборов с зарядовой связью (ПЗС), позволяющих устранить оптико-механическое сканирование, что является важным преимуществом аппаратуры такого класса.

Стремление обеспечить детальное изучение регистрируемых спектров обусловило использование в видеоспектрометрах схем с двукратной дифракцией, когда применяется вторичное падение на решетку дифрагированного пучка, отраженного от вспомогательного автоколлимационного элемента, выполненного, например, в виде двугранного зеркального отражателя [1, 2], как показано на рис.

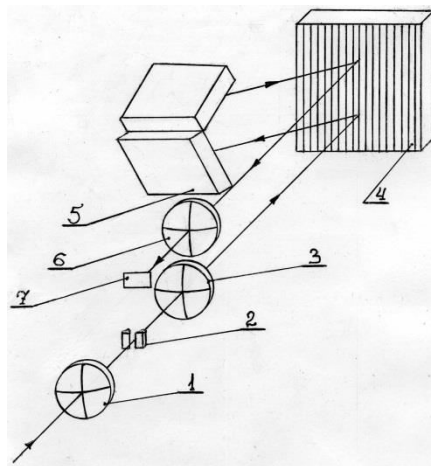


Рис. Оптическая схема видеоспектрометра:

1 – проецирующий объектив; 2 – входная щель; 3 – коллиматорный объектив; 4 – плоская фазовая отражательная дифракционная решетка; 5 – двугранный зеркальный отражатель; 6 – камерный объектив; 7 – выходная фокальная плоскость прибора, где устанавливается двухкоординатный, матричный приемник излучения (на базе ПЗС)

Входной проецирующий объектив 1 строит изображение исследуемого удаленного объекта в неразложенном свете в плоскости входной щели 2. Так как входная щель 2 является оптически сопряженной с плоскостью наземного объекта, то длина этой щели определяет протяженность полосы обзора на указанной плоскости, а ширина щели – спектральное и пространственное разрешения.

Лучистый поток, прошедший через входную щель 2 и коллиматорный объектив 3, дифрагирует на одной половине плоской фазовой отражательной дифракционной решетки 4, а затем перенаправляется на другую ее половину посредством двугранного зеркального отражателя 5 (в частности, от нижней к верхней половине решетки), что обеспечивает автоколлимационный ход лучей в сагиттальной плоскости. Вторично дифрагированный пучок лучей отображается камерным объективом 6 в выходной фокальной плоскости 7, где устанавливается двухкоординатный, матричный приемник излучения.

Здесь следует обозначить через ψ_1 и φ_1 углы падения и дифракции при первом прохождении пучка через решетку, а ψ_2 и φ_2 – при втором. При двукратной дифракции необходимо учесть угловое (меридиональное) увеличение решетки, численно равное отношению ширин вторично падающего и вторично дифрагированного пучков, и, как следствие, равное отношению $\cos\psi_2/\cos\varphi_2$. Угловая дисперсия при двукратной дифракции определяется по формуле [3]:

$$\left(\frac{d\varphi}{d\lambda}\right)_{\Sigma} = \frac{d\varphi_1}{d\lambda} \cdot \frac{\cos\psi_2}{\cos\varphi_2} + \frac{d\varphi_2}{d\lambda} = \frac{m}{d\cos\varphi_2} \left(\frac{\cos\psi_2}{\cos\varphi_1} + 1 \right),$$

где m – порядок дифракционного спектра; λ – длина волны излучения; d – постоянная (период) решетки, а число штрихов последней, приходящееся на 1 мм, равно $N = 1/d$.

При автоколлимации от вспомогательного автоколлимационного элемента $\psi_2 = \varphi_1$ и $\varphi_2 = \psi_1$; тогда

$$\left(\frac{d\varphi}{d\lambda}\right)_{\Sigma} = \frac{2m}{d\cos\psi_1} = \frac{2m}{d\cos\varphi_2}.$$

В видеоспектрометре с плоской фазовой отражательной дифракционной решеткой при значительной протяженности (высоте) входной щели лучи, падающие на решетку из периферийных точек щели, образуют с главным сечением решетки (плоскостью дисперсии) некоторый угол, от величины которого зависит направление лучей дифрагированных пучков. Вследствие этого на выходе спектрального прибора изображение узкой входной щели приобретает вид параболы, обращенной выпуклостью в сторону более коротких волн [3] и имеющей радиус r кривизны при вершине, равный

$$r = f \frac{1}{\frac{d\varphi}{d\lambda} \lambda},$$

где f – фокусное расстояние камерного объектива спектрального прибора; $d\varphi/d\lambda$ – угловая дисперсия дифракционной диспергирующей системы, рассчитанная, в частности, для двукратной дифракции.

При автоколлимации с двукратной дифракцией формула для радиуса r кривизны спектральных линий приобретает следующий вид:

$$r = \frac{fd\cos\psi_1}{2m\lambda} = \frac{f\cos\psi_1}{2m\lambda N} = \frac{f\cos\varphi_2}{2m\lambda N}.$$

При работе УФ-видеоспектрометра крайне нежелательно присутствие рассеянного света внутри прибора, приводящее к значительным ошибкам при спектральных исследованиях. Прежде всего, это касается наличия в приборе не разложенного в спектр излучения нулевого порядка ($m = 0$), резко повышающего уровень паразитного рассеянного света. С целью его устранения дифракционную решетку в оптической схеме целесообразно установить перпендикулярно входящему в прибор осевому пучку (см. рис.), обеспечивая тем самым свободный выход из прибора излучения нулевого порядка в обратном направлении после зеркального отражения от поверхности решетки. Такую возможность предоставляет использование автоколлимации при двукратной дифракции, когда $\psi_1 = \varphi_2 = 0$, а $\varphi_1 = \psi_2$. При этих условиях угловую дисперсию дифракционной диспергирующей системы спектрального прибора можно считать практически постоянной и равной:

$$\left(\frac{d\varphi}{d\lambda}\right)_{\Sigma(\psi_1=\varphi_2=0)} = \frac{2m}{d} = 2mN.$$

Отсюда следует, что приращение угла дифракции вторично дифрагированного пучка прямо пропорционально приращению длин волн регистрируемого излучения и, значит, можно применять линейную интерполяцию при определении длин волн спектральных линий на выходе прибора, если известно положение хотя бы одной «реперной» линии. Получаемый при такой установке решетки спектр часто называют «нормальным» спектром.

Для видеоспектрометра, работающего в УФ области с коротковолновой и длинноволновой границами соответственно $\lambda_{\min}$ и $\lambda_{\max}$, обычно выбирают в качестве рабочего порядка первый дифракционный порядок спектра ($m = 1$). С целью обеспечения на границах $\lambda_{\min}$ и $\lambda_{\max}$ идентичной абсолютной эффективности (под которой понимают отношение энергии, дифрагированной в данный спектральный порядок, к энергии, падающей на решетку), часто пользуются известным выражением [4], позволяющим определить длину волны «в блеске» λ_0 в первом приближении как

$$\lambda_0 = \frac{2\lambda_{\min}\lambda_{\max}}{\lambda_{\min} + \lambda_{\max}}.$$

При полученном значении λ_0 можно найти величину угла блеска θ_0 плоской фазовой отражательной дифракционной решетки, исходя из универсальной формулы [4]: $\lambda_0 = 2\sin\theta_0\cos(\alpha/2)/mN$, применяемой к случаю автоколлимации с двукратной дифракцией, когда $\psi_1 = \varphi_2 = 0$, $\varphi_1 = \psi_2 = 2\theta_0$, $\alpha = \varphi_1 - \psi_1 = 2\theta_0$, а $m = 1$. При этом имеем: $\lambda_0 = (\sin 2\theta_0)/N = d\sin 2\theta_0$.

Отсюда для рассматриваемого случая находят величину угла блеска плоской фазовой отражательной дифракционной решетки, используемой в спектральном приборе: $\theta_0 = 0,5\arcsin(\lambda_0 N) = 0,5\arcsin(\lambda_0/d)$.

Для автоколлимации с двукратной дифракцией при $\psi_1 = \varphi_2 = 0$ и $\varphi_1 = \psi_2$ радиус r кривизны спектральных линий на выходе прибора определяется выражением:

$$r = \frac{fd}{2m\lambda} = \frac{f}{2m\lambda N}, \text{ а при } m = 1 \text{ имеем } r = \frac{fd}{2\lambda} = \frac{f}{2\lambda N},$$

т. е. радиус r обратно пропорционален длине волны регистрируемого излучения, что несложно учесть при обработке видеоспектральной информации.

Дополнительным способом подавления рассеянного света на выходе прибора служит деление его физического объема на две замкнутые автономные полости (нижнюю и верхнюю), между которыми располагается единственная диафрагма, устанавливаемая в биссектральной плоскости двугранного зеркального отражателя 5, через которую излучение, дифрагированное на нижней половине решетки, перенаправляется к ее верхней половине.

В заключение следует еще раз подчеркнуть, что современные УФ-видеоспектрометры воплощают в себе новейшие технологические достижения в области электроники, оптики, передачи данных и обработки информации. Для них в настоящее время разрабатываются компоненты, позволяющие реализовать глубокую приборную миниатюризацию и проводить с их помощью

наблюдения с сохранением высокой информативности получаемых данных. При решении задач дистанционного зондирования Земли такие приборы могут быть конкурентоспособны и рентабельны, а, следовательно, представляют значительный интерес для широкого класса потребителей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шлишевский В.Б. Теория, методы и приборы светосильной растровой спектроскопии: автореф. докт. дис. / В.Б. Шлишевский. – СПб: СПбГИТМО (ТУ), 1997. – 45 с.
2. Koshkin Yu. S., Mukhin E.E., Razdobarin G.T. et al. Lower order blazed grating spectrometer of large diffraction angle // Review of Scientific Instruments. – 1999. – V. 70, No 10. – P. 3844–3846.
3. Тарасов, К.И. Спектральные приборы / К.И. Тарасов. – Л.: Машиностроение, 1974. – 368 с.
4. Пейсахсон И.В. Оптика спектральных приборов / И.В. Пейсахсон. – Л.: Машиностроение, 1975. – 312 с.

© В.Л. Жуков, В.М. Красавцев, Б.П. Павлов, А.Н. Семенов, К.Н. Чиков, 2007

УДК 621.383

Г.Г. Горбунов

ФГУП «НПК "ГОИ им. С.И. Вавилова"», Санкт-Петербург

В.Б. Шлишевский

СГГА, Новосибирск

О ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ СКРЫТЫХ ОБЪЕКТОВ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

В настоящее время одним из стратегически важных и наиболее приоритетных направлений развития средств и методов видовой оптико-электронной разведки становится разработка и применение много- и гиперспектральных (МГС) систем, обеспечивающих получение высокодетальных изображений местности в относительно узких участках оптического диапазона спектра. Значимость работ, связанных с проектированием МГС-приборов, обусловлена качественно новыми информационными возможностями таких средств по сравнению с обычной оптической аппаратурой, построенной по традиционным схемам и предназначенной для получения панхроматических изображений.

Совершенствование технических средств и МГС-методов видовой наблюдения является чрезвычайно актуальным в связи с высокой эффективностью их применения в целом ряде военных задач, среди которых следует выделить:

– Разведку и контроль заметности вооружения и военной техники в оптическом диапазоне спектра;

- Идентификацию объектов фоноцелевой обстановки в интересах коррекции полетных заданий высокоточного ракетного оружия;
- Оценку экологической обстановки в местах размещения и деятельности войск и военных объектов.

Именно поэтому в программах военных вооружений всех высокоразвитых стран после проведения военных операций США в Афганистане обязательно присутствуют разработки гиперспектральных спектровизоров (оптическое изображение исследуемой сцены в более чем сотни спектральных интервалов определенного спектрального диапазона), охватывающих не только уже испытанный диапазон 0,4...2,5 мкм, но и «атмосферные окна» в инфракрасной (ИК) области спектра – 3...5 и 8...12 мкм [1, 2].

При комплексном дешифрировании массива разноспектральных изображений замаскированных целей вероятности их обнаружения и распознавания существенно выше, чем при использовании обычных фотографических или телевизионных снимков. Во многих случаях МГС-данные могут явиться единственным источником информации, который позволит идентифицировать объекты, скрытые посредством применения маскирующих свойств местности или средств пассивной маскировки. По тонким различиям в спектральных характеристиках можно осуществлять селекцию макетов, имитирующих военные объекты, а также оценить состояние вооружения и военной техники (например, старые и выведенные из строя образцы идентифицируют по спектральным аномалиям, связанным с наличием на поверхности окислов и вторичных соединений железа). Гиперспектральная съемка является одним из наиболее эффективных методов обнаружения заглубленных и обвалованных объектов (командных пунктов, блиндажей, ангаров и др.), а также минных полей и подземных коммуникаций транспорта и связи по причине существенного различия спектров отражения естественных и нарушенных антропогенным воздействием растительного, почвенного и снежного покровов.

В последние годы в США интенсивно развивается новый вид разведки – сигнатурной (Measurement and Signature Intelligence – MASINT), представляющей собой получение, интеграцию и комплексный анализ разведанных данных, поступающих с разных приборов наблюдения и измерения, установленных на воздушных, морских, наземных и космических платформах [3]. Сигнатурная разведка использует скрытые, ненаблюдаемые традиционными средствами излучения и продукты целей – так называемые «следы» (спектральные, химические, радиочастотные). Эти следы формируют характерные для каждого объекта сигнатуры, которые могут использоваться в качестве надежного отличительного признака, позволяющего получить представление о происходящих событиях, либо обнаружить скрытно расположенные цели. В системах MASINT активно используются средства спектральной радиометрии, имеющие много общего с разведывательной оптико-электронной и ИК аппаратурой. Однако в отличие от традиционных систем видовой разведки, аппаратура MASINT не собирает пространственные

изображения, а извлекает только отличительные признаки целей, получая их характеристики в десятках, сотнях и даже тысячах различных спектральных интервалах. Особое внимание уделяется исследованию методов анализа и обработки аэрокосмических МГС-снимков, в том числе, созданию баз данных отличительных спектральных признаков практически всех объектов, имеющих военное значение. Организация разведки, ее управление и координация с другими ведомствами поручены специально созданному в 1997 г. Центральному Управлению по разведке MASINT – СМО (Central Measurement and Signature Intelligent Organization), которое входит в состав Разведуправления Министерства обороны США.

Чрезвычайно перспективным является применение МГС-средств дистанционного зондирования и в интересах военной экологии, особенно в задаче мониторинга объектов, вредное воздействие которых на окружающую среду проявляется в визуально не обнаруживаемых изменениях химического состава растительности, почв и воды [4]. При необходимости контроля экологической обстановки на больших по площади территориях, эффективность аэрокосмической МГС-съемки оценивается в десятки раз выше по сравнению с традиционными химико-аналитическими методами по показателям оперативности и стоимости работ. Особую актуальность данное направление применения МГС-средств наблюдения приобрело в настоящее время в связи с необходимостью определения состояния природной среды в районах локальных военных конфликтов и оценки ущерба, нанесенного в результате действий войск и применения оружия.

Сочетание гиперспектральных изображений в различных спектральных интервалах, создающих изображения сцен с независимыми характеристиками пространственной, спектральной (и поляризационной) информацией, с высокоточной радиометрической калибровкой, одновременной коррекцией влияния параметров атмосферы на измерения, современными методами моделирования и анализа данных (сжатие, обработка на борту) позволяет считать видеоспектрометр наиболее совершенным прибором перспективных систем наблюдения. В первую очередь, это касается технологии ведения военной разведки и обеспечения целеуказания системам высокоточного оружия, а также отработки технологии обнаружения предприятий, производящих радиоактивные материалы и компоненты химического оружия. В гражданских целях могут изучаться выбросы сточных вод в реки и озера, утечки химических веществ, нефтяные разливы, остатки горных выработок, состояние растительности, вулканической активности и др. В частности, в «Концепции развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года» в качестве одной из тенденций развития космических средств и технологий зондирования названо «... появление и расширение областей применения сверхмного-спектральных съемок (видеоспектрометрических, гиперспектральных) с числом каналов 256 и более» [5].

Следует отметить, что привычные методы определения корреляционных зависимостей имеющегося банка спектральных данных и зарегистрированной

информации исследуемого видеоспектрометрического изображения сцены уже не могут быть реализованы из-за огромных объемов информации, требующих многочасовой работы мощных ЭВМ. Отсюда становится очевидной важность определения наиболее информативных участков зарегистрированных спектров, позволяющих значительно уменьшить число основных спектральных компонентов при их последующей идентификации, и методов сжатия спектральной информации при идентификации различных ансамблей.

Одним из основных элементов много- или гиперспектральных видеоспектрометров, безусловно, является элемент, производящий кодирование спектральной информации, т. е. собственно спектрометрический блок. Как правило, для этой цели используются дисперсионные (призменные и дифракционные) полихроматические системы. В то же время, одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений спектрального оптического приборостроения в мире является фурье-спектрометрия, представляющая собой продукт самых высоких технологий и сочетающая в себе прецизионную оптику и механику, высокоинформативную электронику и вычислительные устройства с оригинальными алгоритмами и программами управления и обработки. Обладая широкими возможностями двойного применения, фурье-спектрометры имеют вполне реальную инвестиционную привлекательность, так как создают все необходимые условия получения прибыли за счет коммерческих продаж на рынке аналитических средств.

Известные преимущества фурье-спектрометров по сравнению с классическими спектральными приборами [6] стали еще более заметными при применении многоэлементных приемников, предопределивших возможность создания нового типа высокоэффективного прибора – фурье-спектровизора [7]. В комплексе к указанным преимуществам можно отнести:

- Большую светосилу (большой телесный угол, из которого может собираться исследуемое излучение при том же спектральном разрешении), что в некоторых случаях помогает установить интерферометр фурье-спектрометра в сходящихся пучках выходного телескопа и тем самым исключить дополнительную фокусирующую оптику, необходимую перед щелью классического дисперсионного монохроматора;

- Одновременность регистрации всех спектральных интервалов (мультиплексность) на одном приемнике излучения, что не только значительно увеличивает отношение сигнал/шум в регистрируемом спектре, но и позволяет использовать обе координаты приемной матрицы для построения исследуемой сцены и применять алгоритмы уменьшения «смаза» и увеличения времени регистрации одиночной интерферограммы, а, следовательно, и отношения сигнал/шум;

- Точность привязки шкалы волновых чисел по одному внутреннему эталону, что значительно упрощает системы калибровок аппаратуры и увеличивает надежность идентификации исследуемых объектов;

- Большой диапазон реализуемых спектральных разрешений, определяемых только величиной реализованной разности хода в плечах интерферометра, что позволяет разработать видеоспектрометрическую

аппаратуру, спектральное разрешение которой во время проведения эксперимента может изменяться по специальным программам, оптимизируя получаемую информацию определенных исследуемых сцен;

- Отсутствие переналожения дифракционных спектральных порядков и, следовательно, большую ширину регистрируемого спектра, определяемую только светопропусканием оптических деталей и чувствительностью приемника, что позволяет значительно сократить число разрабатываемых и запускаемых аппаратов;

- Наличие дополнительной информации, получаемой из фазового спектра, показывающей перемену направления излучения системы «источник–приемник» для каждой длины волны, что особенно важно в ик области спектра при работе с неохлаждаемыми приемниками, так как это позволяет внести коррекцию в спектры и повысить надежность получаемой информации;

- Возможность компенсации собственного излучения оптических деталей интерферометра за счет противофазности излучения деталей, устанавливаемых до и после светоделительного слоя;

- Получение дополнительной информации, извлекаемой из фазовых спектров, которую можно использовать для распознавания наличия излучающего точечного подвижного объекта (в его поле зрения) и определения направления движения;

- Определение направления на точечный излучающий объект с точностью не хуже одной десятой величины единичного пиксела приемника;

- Практически полное отсутствие влияния рассеянного света;

- Однозначность конструкторских и методических решений при построении приборов в очень широком спектральном диапазоне.

Исходя из вышеперечисленного, можно сделать вывод о целесообразности применения фурье-спектрометра с многоэлементным приемником в качестве кодирующего элемента гиперспектрального спектровизора [4]. При этом в пилотном проекте целесообразно начать разработку приборов для спектрального диапазона 0,4...1,1 мкм, в котором содержится многие спектральные особенности различных объектов, причем для выявления наиболее «информативных» длин волн для различных исследуемых сцен необходимо не менее 200 элементов спектрального разложения. Использование указанного диапазона поможет начать накопление спектральной базы данных исследуемых объектов, первоначально опираясь на имеющиеся панхроматические съемки.

Переход от традиционной многозональной съемки к гиперспектральной не только увеличивает количество информации, но обеспечивает качественно совершенно новый, уникальный характер данных гиперспектральной съемки. В России нет примеров систематического использования полевых видеоспектрометров, и возможность проведения серии первоначальных измерений, совместно с уже отработанными панхроматическими приборами, существенно ускорит отработку алгоритмов и программ обработки результатов

измерений. Кроме того, для диапазона 0,4...1,1 мкм возможно использование широкой гаммы матричных высокочувствительных приемников с размерами матрицы, например 512×512, и более. Использование других спектральных диапазонов, увеличивающих наличие спектральных отличий, возможно после получения первоначальной базы спектральных данных и отработки высокочувствительных матричных приемников, не требующих глубокого охлаждения, значительно усложняющего аппаратуру.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hardin R.W. Hyperspectral Imaging: How Mach is Hype? // Photonic Spectr. – 1997. – № 7. – P. 82–92.
2. Aviation Week and Space Technology. – 2001, 16/IV. – V. 154. – № 16.
3. Jane's Defence Weekly. – 2002, 24/IV. P. 6.
4. Использование видеоспектральной аэросъемки для экологического мониторинга / Б.В. Шилин, В.Н. Груздев, А.В. Марков, В.Н. Мочалов // Оптический журн. – 2001. – № 12. – С. 41–49.
5. Федеральное космическое агентство. «Концепция развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года» [Электронный ресурс] – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.gisa.ru/file/file766.doc>.
6. Вагин В.А. Светосильные спектральные приборы / В.А. Вагин, М.А. Гершун, Г.Н. Жижин, К.И. Тарасов. – М.: Наука, 1988. – 264 с.
7. Горбунов Г.Г. Новые применения фурье-спектрометров с многоэлементными приемниками / Г.Г. Горбунов, Д.Н. Еськов, Н.В. Рябова, А.К.Серегин // Оптический журн. – 2005. – № 8. – С. 71–77.

© Г.Г. Горбунов, В.Б. Шлишевский, 2007

УДК 681.7.015.2

А.И. Белоусов, Г.Н. Попов

ФГУП «ЦКБ "Точприбор"», Новосибирск

МОДИФИЦИРОВАННАЯ ОПТИЧЕСКАЯ ИК СИСТЕМА С ЗОННЫМ СКАНИРОВАНИЕМ

Простота осуществления развертки изображения с помощью вращающейся призмы и относительно невысокая стоимость короткой линейки фотоприемника является отличительной особенностью инфракрасных (ИК) систем с зонным сканированием. Немаловажную роль играет высокая линейность развертки изображения, что позволяет улучшить обработку видеосигнала в электронном тракте ИК системы.

В работах [1, 2] рассмотрены основные принципы построения оптического блока ИК системы зонного сканирования и приведен пример конкретного ее выполнения. В тоже время, при использовании приемника с размером фотоприемной площадки 0,035 × 0,035 мм ИК система имеет кружок Эйри диаметром 0,05 мм, что снижает контраст изображения и геометрическое разрешение. Кроме того, существуют определенные технологические особенности, которые необходимо учитывать при разработке ИК системы

зонного сканирования. Улучшение этих параметров является целью настоящей работы.

Для лучшего понимания существа вопроса воспроизводим фрагмент описания ИК системы зонного сканирования из работы [1]. На рис. 1 представлена оптическая схема ИК системы в упрощенном виде (без насадки Галилея и ломающего зеркала) в плоскости кадрового (рис. 1, а) и строчного (рис. 1, б) сканирования с обозначениями, необходимыми для пояснения принципа работы.

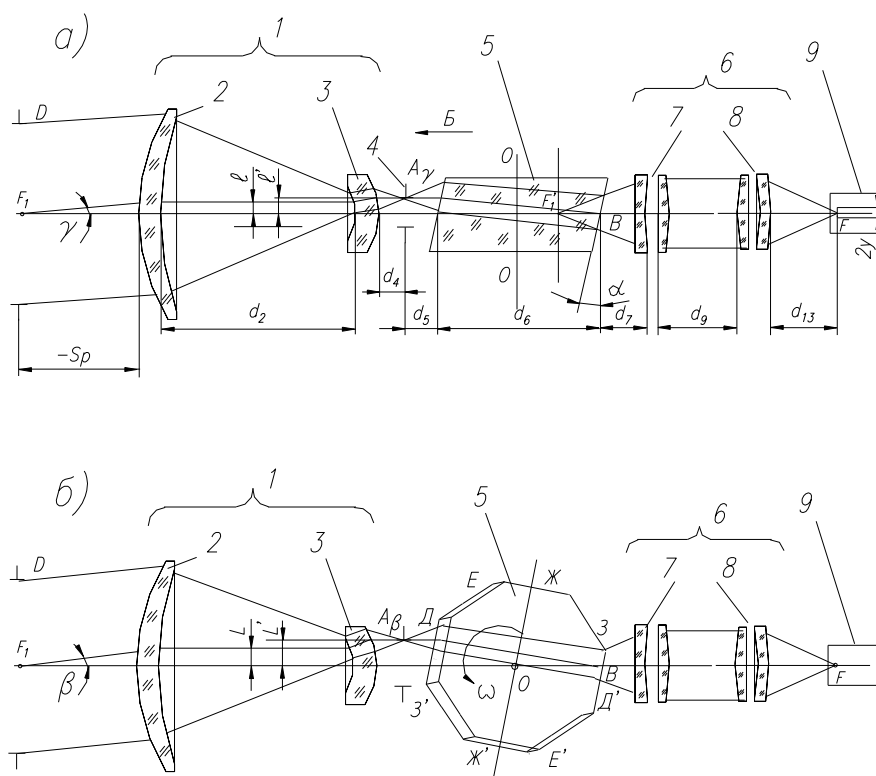


Рис. 1. ИК система в плоскости кадрового (а) и строчного (б) сканирования:

1 – объектив; 2 – фронтальный мениск; 3 – афокальный мениск; 4 – кадровое окно; 5 – призма; 6 – оптика переноса изображения; 7 – коллимирующий компонент; 8 – фокусирующий компонент; 9 – ФПУ

ИК система содержит объектив 1, выполненный в виде двух компонентов: фронтального мениска 2 и афокального мениска 3. В плоскости действительного промежуточного изображения объектива 1 (в воздушном промежутке d_4, d_5) установлено кадровое окно (диафрагма) 4. Входной зрачок D объектива 1 расположен в передней фокальной плоскости F_1 фронтального мениска 2 на расстоянии $-S_p$.

Призма 5 с толщиной по оптической оси, равной 42 мм ($\omega = 0^\circ$), выполнена со скошенными гранями (рис. 1, б), причем толщина призмы по оптической оси для меньших углов α скоса граней EE' и $ЖЖ'$ меньше, чем для больших углов скоса (границы $ДД'$ и $ЗЗ'$). С диафрагмой 4 оптически сопряжена плоскость мнимого промежуточного изображения, проходящая через точку F'_1 ,

расположенную внутри призмы 5. Эта плоскость соответствует плоскости предметов для оптики переноса изображения.

Оптика переноса изображения 6 состоящая из коллимирующего (7) и фокусирующего (8) компонентов, фокусирует пучки лучей на короткую линейку 2у чувствительных элементов фотоприемного устройства (ФПУ) 9. Линейка расположена параллельно оси OO вращения призмы 5. Перемещение фокусирующего компонента 8 вдоль оптической оси используется для фокусировки излучения на неподвижный фотоприемник при сборке ИК системы.

Принцип зонного сканирования для удобства изложения рассмотрим в обратном ходе лучей.

Предположим, что угол α (рис. 1, а) скоса граней и угол ω поворота призмы (рис. 1, б) равны нулю. Лучи, исходящие из точки F ФПУ 9, пройдя оптику переноса 6 и призму 5, попадут в центр кадрового окна 4.

На рис. 2 дан вид кадрового окна по стрелке Б (рис. 1, а) и положение линейки ФПУ (фиг. 2, а), а также линейные размеры для этого случая. При повороте призмы на угол 2ω будет формироваться зона шириной $2y\beta_k$, где $2y$ – длина линейки, а β_k – линейное увеличение оптики переноса изображения в обратном ходе лучей. Однако, вместо кадра телевизионного типа, формируется узкая зона сканирования. Несмотря на это, сдвигая попарно грани призмы на углы α_1 , можно перемещать изображение линейки в направлении кадровой развертки и получить полноформатный кадр размером $2L' \times 2l'$ (рис. 2, б, в).

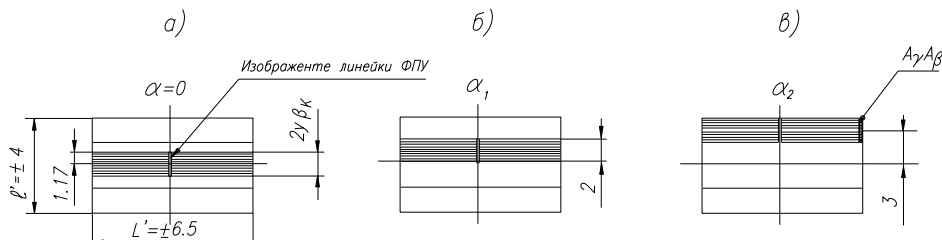


Рис. 2. Положение зон сканирования в плоскости кадрового окна в зависимости от скоса граней α_i

Пучки лучей, прошедшие объектив 1, (в обратном ходе лучей) строят изображение в пространстве предметов. Вид поля зрения в пространстве предметов показан на рис. 3, при этом из-за оборачивания, изображение линейки $A_\gamma A_\beta$ в плоскости кадрового окна (рис. 2, в) окажется в положении Д (рис. 3) в плоскости предметов. Первая четверть поля зрения разбита на 18 точек составляющие 6 триад, а именно: (1, 2, 3), (4, 5, 6) и т. д. В дальнейшем по этим точкам проводится оптимизация и контроль качества изображения.

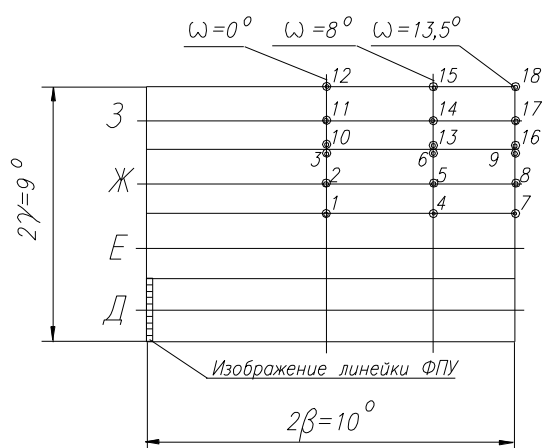


Рис. 3. Положение триад точек (конфигураций) в поле зрения ИК системы

Осевой луч FV , (рис. 1, а), пройдя призму 5, выходит из нее параллельно самому себе, а поскольку мениск 3 является афокальным, то и в промежутке d_2 между менисками он также идет параллельно оптической оси, т. е. является телецентрическим. Поэтому, пройдя через фронтальный мениск 2, он пересекает оптическую ось в точке F_1 , расположенную в его задней фокальной плоскости (в обратном ходе лучей) и образует угол γ по кадру. То же самое происходит в ортогональной плоскости, когда образуется угол β по строке (рис. 1, б).

Отметим, что расположение входного зрачка впереди объектива способствует оптимальному сопряжению оптической ИК системы с установленной перед ней телескопической системой Галилея, служащей для смены полей зрения.

Расчетные формулы по определению конструктивных элементов объектива на основании расчета хода нулевых лучей приведены в работе [1]. Параметры рассмотренной оптической системы следующие:

эквивалентное фокусное расстояние	73 мм
фокусное расстояние фронтального мениска	48,9 мм
фокусное расстояние объектива	78 мм
диаметр входного зрачка	36 мм
расстояние входного зрачка от первой поверхности	50 мм
поле зрения по строке	9°
поле зрения по кадру	6°
относительное отверстие	1 : 2
линейное увеличение оптики переноса изображения	0,935 ^x
задний отрезок	20,9 мм
спектральный диапазон	8 – 12 мкм

Выше упоминалось, что толщина призмы по оптической оси для меньших углов скоса меньше, чем для больших углов скоса. Это делается для некоторой подфокусировки внешних зон поля зрения и повышения в них качества изображения.

Здесь следует сказать несколько слов о способе компенсации аберраций призмы. Компенсация происходит в два этапа, а именно:

1. Компенсация aberrаций призмы aberrациями объектива таким образом, чтобы остаточные aberrации системы объектив-призма имели постоянную величину в пределах рабочего угла поворота призмы.

2. Компенсация этих остаточных aberrаций с помощью оптики переноса изображения для получения оптимального качества изображения на ФПУ.

Остаточные aberrации системы объектив–призма имеют значение порядка 0,5 мм, но постоянны по всем 18 точкам поля зрения (рис. 3). Анализ этих aberrаций показал, что объектив полностью компенсирует астигматизм и кому призмы. Таким образом, назначение оптики переноса изображения 6 (рис. 1) заключается не только в переносе изображения, расположенного внутри призмы 5, но и в компенсации остаточных aberrаций предыдущей системы.

Все расчеты выполнены с помощью программы ZEMAX методом мульти конфигураций, т.е. когда в функцию качества заложены параметры всех 18 точек поля зрения, что детально описано в работах [1, 2].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2244949 Российская Федерация, Int. Cl. G02B 26/10, H04 N5/3 / А.И. Белоусов. – Бюл. № 2.
2. Belousov A., Popov G. Infra Red Zone-Scanning System // Applied Optics. – V. 45, № 9. – P. 1931 – 1937.

© А.И. Белоусов, Г.Н. Попов, 2007

УДК 621.383

Е.А. Терешин, Г.Н. Хацевич

НФ ИФП СО РАН «КТИПМ», Новосибирск

АФОКАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ СКАНИРУЮЩИХ ТЕПЛОВИЗОРОВ

Большинство схемных решений сканирующих тепловизоров формально можно разбить на две группы – со сканированием в сходящихся и сканированием в параллельных пучках лучей. При организации решений второй группы, как правило, вводят афокальную фронтальную часть, расположенную перед сканером. Подобный шаг позволяет обеспечить модульность конструкции, возможность одновременного использования компонентов различных производителей, гибкое обновление модельного ряда тепловизоров. Для расширения функциональности сканирующих тепловизионных модулей, выпускаемых НФ ИФП СО РАН «КТИПМ», авторами были разработаны схемные решения афокальных систем со сменой увеличения. Схемы позволяют получать высокое, близкое к дифракционному, качество изображения, используя минимальное количество компонентов, при одновременном удовлетворении габаритных ограничений систем применения.

Оптические системы инфракрасных телескопов с панкратической сменой увеличения для дальней инфракрасной области спектра при использовании только сферических поверхностей обычно содержат много (до 10 и более)

компонентов. Наличие большого числа поверхностей ведет к снижению коэффициента пропускания системы. Повышение пропускания системы с одновременным уменьшением ее массы реализуется, в основном, использованием асферических поверхностей и дифракционных оптических элементов, что снижает технологичность продукции, значительно повышает ее трудоемкость и стоимость. Применение таких затратных технологических процессов не всегда обосновано, особенно, когда не в полной мере использованы возможности стандартных, сферических поверхностей при формировании оптимальных соотношений конструктивных параметров системы для достижения требуемого качества при обеспечении технологичности и высоких массогабаритных характеристик.

Разработанные афокальные системы состоят из 6 линз со сферическими поверхностями, обладают малыми габаритами. Смена увеличений обеспечивается двумя подвижными компонентами.

На стенде представлены параметры разработанных схем.

© Е.А. Терешин, Т.Н. Хацевич, 2007

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОННОЙ ПЛАСТИНКИ РЕЛЕЯ – ВУДА

В 1888 г. Релей впервые теоретически обосновал возможность существования фазовой линзы, у которой отсутствует нулевой порядок дифракции. Кроме того, он предположил существование киноформной линзы. Об этом он написал в своей известной книге: «Если бы можно было ввести в каждой части отверстия решетки произвольное запаздывание, то весь свет можно было бы сконцентрировать в любом из спектров, по желанию. Предположив, что запаздывание изменяется равномерно и непрерывно, мы приходим к случаю обыкновенной призмы; но тогда нет дифракционного спектра в обычном смысле. Чтобы его получить, нужно было бы сделать так, чтобы запаздывание изменялось постепенно на длину волны при прохождении каждого элемента решетки, а затем возвращалось к своему предыдущему значению, перескакивая таким образом внезапно на длину волны. Мало вероятно, чтобы можно было когда-либо полностью этого достигнуть на практике; однако случай этот стоит отметить для того, чтобы показать, что нет теоретического предела концентрации света заданной длины волны в одном спектре, и чтобы иллюстрировать часто наблюдаемый несимметричный характер спектров по обе стороны от центрального изображения». Но основной задачей Релея оставалось создание линзы, у которой отсутствует нулевой порядок. Он предположил, что если вместо того, чтобы затенять четные или нечетные зоны (амплитудная зонная пластинка Френеля), устроить пластинку так, чтобы «различные части решетки были равны и одинаково прозрачны, но устроены так, чтобы давать разность хода в $\lambda/2$ », то интенсивность в ± 1 порядках будет в четыре раза больше, а нулевой порядок исчезнет. Эта идея лежит в основе фазовой зонной пластинки. Впервые такую линзу создал в 1898 г. Вуд, покрыв стекло тонким слоем лака и выгравировав на нем зонную пластинку.

В ходе работы мы определили основные характеристики двуступенчатой (дискретной) линзы с параметрами: фокусное расстояние $f = 100$ мм, высота ступенек профиля $d_1 = 545,7$ нм, показатель преломления материала подложки $n = 1,445$, расчетная длина волны $\lambda_0 = 2d_1(n-1) = 485,6$ нм.

Особенностью зонной пластинки является то, что она осуществляет геометрические преобразования как рассеивающая и как собирающая линзы, и волновые преобразования, как интерферометр и дифрактометр. Малая масса элемента также относится к его достоинствам. Но технологические трудности изготовления таких пластинок не позволяют ввести их в широкое производство и применение. Кроме того, они обладают значительными хроматическими aberrациями по сравнению с обычной линзой.

Как уже было сказано, линза Релея – Вуда совершает геометрическое преобразование объекта. В ходе работы были проведены опыты, это подтверждающие. На рис. 1 показан график зависимости положения

изображения предмета от положения самого предмета для зонной пластины.

Линза Релея – Вуда включает в себя рассеивающую и собирающую линзы. Изображению, сформированному рассеивающей линзой, соответствует штриховая линия, собирающей – пунктирная. Сплошная линия – положение самого предмета относительно зонной пластинки. Пространство слева от линзы – пространство предметов, справа – пространство изображений. Точками 1 – 12 заданы различные положения предмета и соответствующих изображений.

В точках 7, 8 видно, что предмет мнимый, изображения от рассеивающей и собирающей линз действительные и находятся достаточно близко. Их можно регистрировать с помощью одной схемы, без дополнительных линз. Именно эти точки мы будем использовать в дальнейших экспериментах, поскольку получившиеся изображения можно зарегистрировать фотокамерой или увидеть на экране, а также свести друг с другом, чтобы получить интерференционную картину.



Рис. 1

1. Описание эксперимента – геометрическое преобразование

В положении В находится предмет (рис. 2). Положение А соответствует изображению собирающей линзы. Как видно из рис. 1, 2, оно располагается ближе к линзе, чем предмет. Изображение, формируемое рассеивающей линзой, находится в положении С. На рис. 2 показаны фотографии этих изображений и предмета. Изображение от собирающей линзы – прямое

уменьшенное, от рассеивающей – прямое увеличенное. Это полностью согласуется с теорией.

Предмет проецируем с помощью дополнительной линзы в положение В. Здесь находится действительное изображение предмета, а после того, как поставим зонную пластину, – мнимый предмет. Регистрируем изображение с помощью фотокамеры. Линзу Релея – Вуда устанавливаем таким образом, чтобы положение В находилось до фокусного расстояния. Для этого необходимо заранее отметить положение В. Оно соответствует точке 8 на рис. 1. Зонная пластина одновременно подфокусирует мнимый предмет в положение А (собирающая линза) и уводит в положение С (рассеивающая линза). Так как изображения действительные, их можно увидеть на экране или зарегистрировать фотокамерой. Необходимо выбирать положение линзы Релея относительно мнимого предмета таким образом, чтобы изображение, создаваемое рассеивающей линзой не ушло в бесконечность (положения между точками 9 и 10, рис. 1).

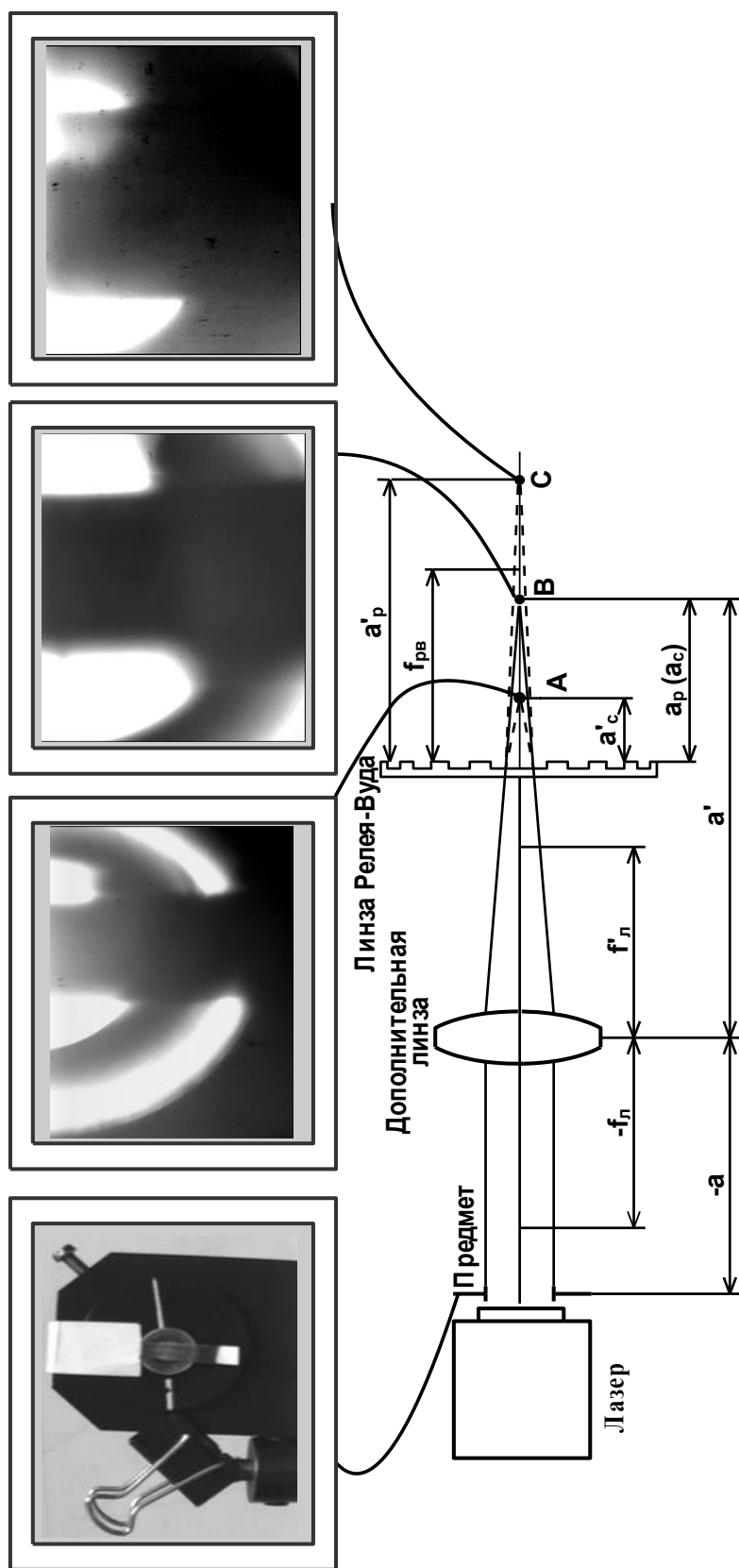


Рис. 2

Точка А – положение действительного изображения, созданного собирающей линзой; точка В – положение мнимого предмета; точка С – положение действительного изображения, созданного рассеивающей линзой;

f_n – фокусное расстояние вспомогательной линзы; $f_{рв}$ – фокусное расстояние линзы Релея – Вуда;

a – расстояние до предмета; a_c , (a_p) , a' – расстояние до мнимого предмета; a'_c – расстояние до изображения, созданного собирающей линзой Релея–Вуда; a'_p – расстояние до изображения, созданного рассеивающей линзой Релея – Вуда

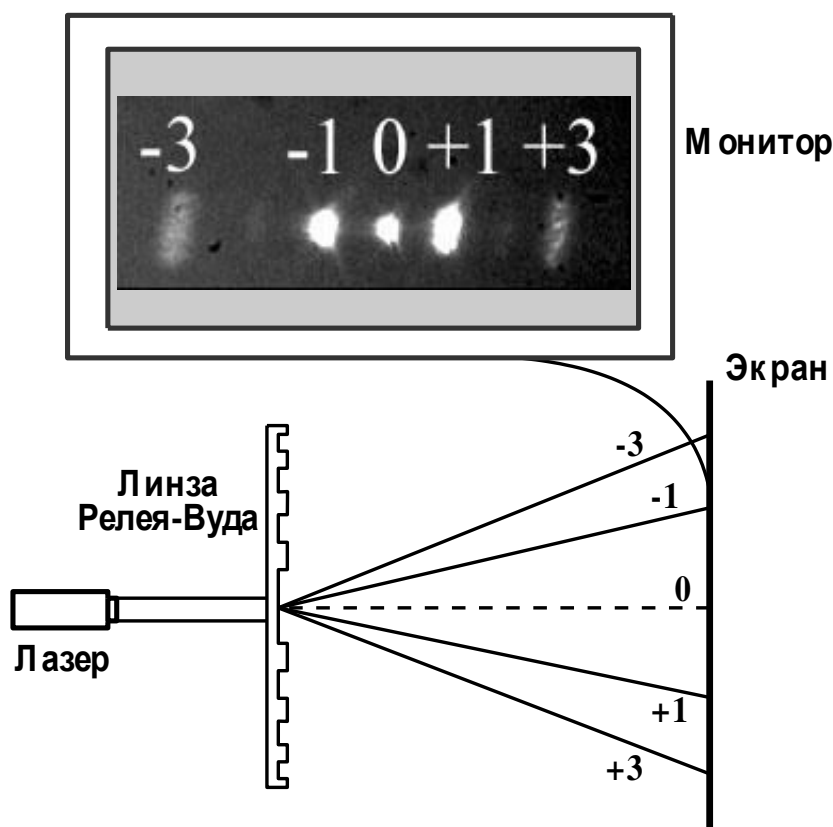


Рис. 3

2. Описание эксперимента – дифракция

Зонная пластинка представляет из себя дифракционный элемент. Это подтверждается экспериментом. Собираем установку по схеме рис. 3. Лазер испускает параллельный пучок. На линзе Релея – Вуда луч дифрагирует, в результате чего на экране мы получаем первый, третий и т. д. порядки дифракции. Нулевой порядок будет появляться в том случае, когда длина волны используемого лазера не соответствует расчетной длине волны для данной пластины. В нашем эксперименте использовался полупроводниковый лазер с длиной волны 0,65 мкм, тогда как расчетная длина волны для нашей пластинки составляла 0,486 мкм. Если источник подобран верно, то лучи, прошедшие через соседние зоны пластинки, доходя до экрана, как бы «сжигают» друг друга за счет разности фаз π (разность хода между лучами $\frac{\lambda}{2}$). Это было отмечено Релеем в своих работах. Четные порядки отсутствуют, когда размеры соседних прозрачных и непрозрачных зон равны. Как мы видим на рис. 3, возникают яркий нулевой, слабые ± 2 порядки дифракции.

3. Описание эксперимента – интерференция

Если в опыте с дифракцией ввести дополнительную линзу и свести нулевой и первые порядки, то на экране мы получим интерференционную картину, показанную на рис. 4.

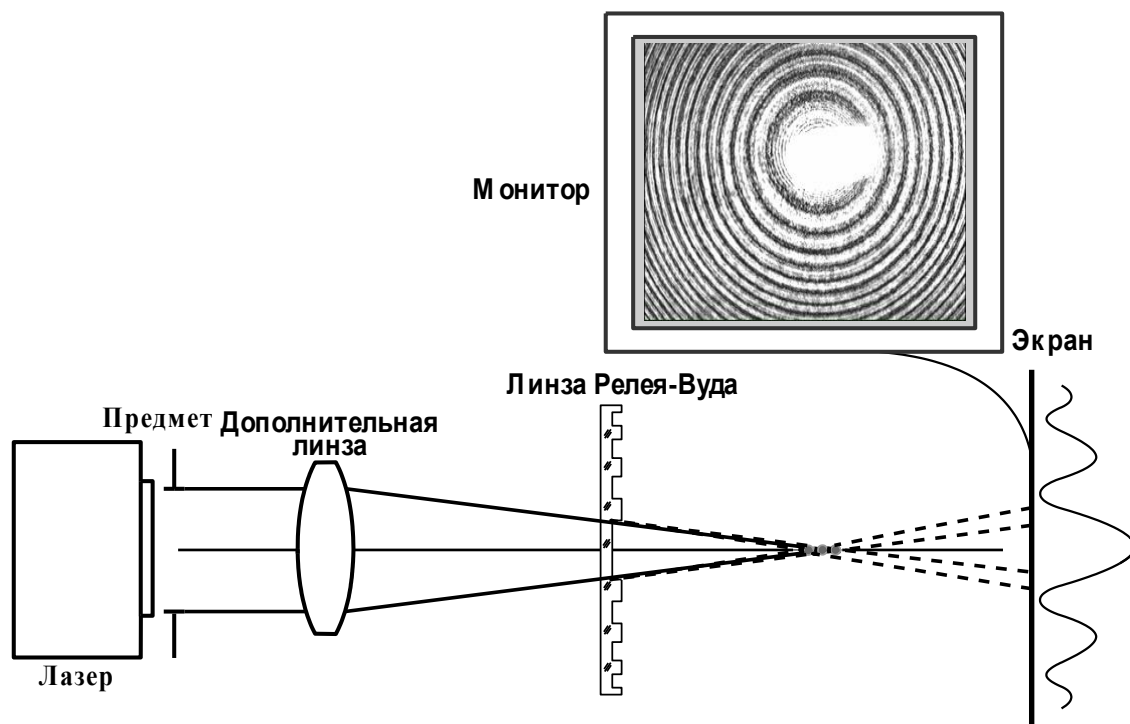


Рис. 4

Схема полностью идентична схеме для рассмотрения геометрических преобразований линзы. Прямоугольник в центре фотографии – засветка от нулевого порядка, не имеющая значения для опыта. Пунктирными линиями показаны направления лучей от рассеивающей и собирающей линз после фокуса. Серыми точками отмечены мнимый предмет и оба изображения (см. геометрическое преобразование).

© Е.С. Сенченко, 2007

УДК 621.383

В.М. Красавцев, А.Н. Семенов, К.Н. Чиков

СПбГУИТМО, Санкт-Петербург

В.Б. Шлишевский

СГГА, Новосибирск

ВИДЕОСПЕКТРОМЕТРЫ – НОВАЯ ПЕРСПЕКТИВНАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ ДИСТАНЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Дистанционное зондирование (ДЗ) представляет собой процесс измерения характеристик интересующих пользователя объектов с помощью чувствительных датчиков, не находящихся в непосредственном контакте с предметом исследования [1]. Подобные датчики устанавливаются, как правило, на борту авиационных и космических носителей.

Начало эффективному и широкомасштабному использованию методов ДЗ для получения информации о Земле из космоса было положено немногим более трех десятилетий тому назад с вводом в эксплуатацию метеорологических искусственных спутников Земли и спутников для исследования природных

ресурсов. Особое место среди этих методов заняли оптические методы ДЗ, основанные на регистрации и измерении в разных диапазонах электромагнитного спектра энергии, излучаемой или отражаемой исследуемыми объектами, имеющими различные спектральные коэффициенты яркости (СКЯ).

На ранних этапах развития спектральных средств ДЗ подавляющее большинство исследований, направленных на получение графиков и таблиц СКЯ, проводилось в лабораторных и полевых условиях с помощью различного типа спектрорадиометров с низким и средним спектральным разрешением. Отмечая особенности указанных видов измерений, следует подчеркнуть, что при наземных измерениях наблюдения обычно ведутся непосредственно над изучаемым объектом, как правило, на высоте 1,0–1,5 м и очень редко – со специальных вышек. В результате исследователь может быть совершенно уверен не только в правильном выборе необходимого объекта (тип почвы или горной породы, вид растительности и т. п.), но и в оценке условий его нахождения.

Напротив, при авиационных и, тем более, космических наблюдениях фиксируются некоторые усредненные по полю зрения прибора спектральные характеристики земной поверхности, которые могут существенно отличаться от реальных данных, особенно для небольших объектов на местности.

Следовательно, сопоставление результатов наземных и авиационно-космических измерений наталкивается на фактически непреодолимые методические трудности. Более того, исследования показывают [2], что результаты обеих методик имеют значительные расхождения даже для однородных протяженных объектов. Так, для растительности и некоторых горных пород значения СКЯ по данным наземных измерений обычно больше авиационных и спутниковых на величину от 30 до 60 %. Это очень большое расхождение в результатах.

Отсюда можно сделать вывод, что обе методики нередко дают неудовлетворительные результаты при изучении тонких спектральных различий у объектов земной поверхности, интересующих потребителей. В то же время, проведенные в последние два десятилетия детальные исследования СКЯ природных (естественных) и антропогенных (искусственных) образований показали [1], что именно небольшие спектральные различия являются индикаторами важнейших характеристик объектов и явлений.

Научная и практическая реализация выявляемых особенностей поведения СКЯ оказалась возможной в полной мере лишь с появлением в последние два десятилетия нового класса приборов с высоким пространственным, спектральным и радиометрическим разрешениями – видеоспектрометров, (imaging spectrometers), обеспечивающих поэлементную регистрацию одновременно и СКЯ, и структуры рассматриваемых удаленных объектов. Эти приборы открывают широкие возможности зондирования Земли и околоземного пространства, преодолевая самые изощренные естественные и искусственные маскировки исследуемых объектов. Получаемые данные от таких приборов могут использоваться как совместно с видеоданными о топологии наблюдаемых

объектов, так и самостоятельно. Их высокие информационные возможности определяются выявлением и формированием новой системы спектральных признаков, основанных на характерных различиях в спектрах собственных излучений и спектрах отражений природных и антропогенных объектов. При этом обработка видеоспектральных данных хорошо поддается автоматизации.

Особенностью аппаратного построения видеоспектральных средств, содержащих обычно видеоспектрометр и специальную телевизионную камеру, является их объединение в бортовой аэрокосмический информационно-измерительный комплекс. В таком случае спецтелекамера позволяет оператору на борту носителя или в камеральных (лабораторных) условиях анализировать в реальном масштабе времени всю наблюдаемую в данный момент картину.

Видеоспектрометр, как правило, включает в себя проецирующий объектив и полихроматор (спектрометрическую часть). На выходе полихроматора обычно устанавливают матричный фотоприемник (МФП) излучения, позволяющий одновременно осуществлять пространственное и спектральное сканирование. Каждая строка матричного приемника, располагаемая строго поперек направления (трассы) полета носителя, фактически регистрирует детальное монохроматическое изображение узкой полосы земной поверхности и обеспечивает развертку этого изображения по пространству, а сканирование по пространству происходит за счет движения носителя. Сканирование по спектру, осуществляемое электроникой матричного приемника, а также максимальное количество спектральных интервалов, разрешаемых видеоспектрометром, определяются числом строк МФП приемника. Сколько таких строк в МФП – столько, в принципе, можно зарегистрировать монохроматических узкополосных изображений участка местности, над которой пролетает носитель.

Таким образом, видеоспектрометры обеспечивают разложение в спектр узких протяженных участков земной поверхности, расположенных перпендикулярно трассе полета и изображаемых проецирующим объективом во входной щели полихроматора. Движение носителя позволяет формировать полноразмерные монохроматические кадры в виде последовательности соответствующих монохроматических изображений узких полос земной поверхности, распределенных непрерывно вдоль трассы полета. В итоге, видеоспектрометры совмещают в себе высокое пространственное разрешение, свойственное высококачественным аэрофотоаппаратам, и высокое спектральное разрешение, присущее дисперсионным спектральным приборам высокого класса.

В полной мере позитивные свойства видеоспектральной аппаратуры бортового базирования (на атмосферных или внеатмосферных носителях) раскрываются при выполнении прикладных исследований, когда необходимо получить высококачественные монохроматические изображения объектов естественного и/или искусственного происхождения с одновременной интегральной визуализацией кадра, что позволяет измерять пространственные и спектральные характеристики излучения у широкой номенклатуры целей и фонов.

Аэрокосмические видеоспектральные информационно-измерительные комплексы особенно эффективны при обеспечении гидрометеорологических служб оперативной информацией, позволяющей дать:

- Синоптический анализ и прогноз погоды в глобальном, региональном и локальном масштабах (характер и параметры облачных образований, фронтальные разделы, особенности циркуляции воздушных масс, стихийные гидрометеорологические явления);
- Анализ и прогноз состояния акваторий морей и океанов (ледовые условия, сгонно-нагонные процессы у побережий);
- Анализ и прогноз состояния внутренних водоемов, рек, процессов на реках и водохранилищах (паводки, половодья, ледовые условия, снегозапасы в бассейнах рек, запасы воды в водохранилищах);
- Анализ и прогноз условий для полетов авиации (высота верхней границы облачности, струйные течения, зоны болтанки летательных аппаратов, зоны развития активной конвекции в атмосфере);
- Анализ и прогноз гелиогеофизической обстановки;
- Анализ климата и глобальных климатических изменений.

Как показывает международный опыт последних десятилетий, видеоспектральная аппаратура становится незаменимой при выполнении различных геологических и инженерно-геологических изысканий, в частности, проводимых в интересах проектирования и строительства подводных газопроводов. Так, при реализации подводного газопровода Россия – Турция через Черное море или Северо-Европейского газопровода на акватории Финского залива множество прикладных задач может быть решено видеоспектральными средствами. Здесь по мере перемещения от глубоководных участков к мелководным прослеживается сложная гамма тоновых переходов от темных тонов к светлым. При этом светлым тоном изображаются мутные воды. Поскольку коротковолновая часть спектра солнечных лучей проникает в морскую толщу на большую глубину, то получаемые видеоспектральные изображения способны охарактеризовать распространение мутных вод до границ мелководных участков и контролировать глубины. Кроме того, по некоторым данным, видеоспектральные съемки позволяют визуализировать литодинамические процессы, которые могут заметно влиять на заносимость подводных траншей (прорезей) на морском дне, вымывание засыпки заглубленных трубопроводов, миграцию береговой черты и оказывать непосредственное динамическое воздействие на трубопровод.

Исключительное значение имеют литодинамические исследования на Черноморском побережье Кавказа. Это определяется сложной геоморфологией района. В данном районе присутствуют многочисленные подводные долины и каньоны, которые в большинстве случаев извилисты и имеют хорошо выраженные склоны, легко выделяемые на космических видеоспектральных изображениях. Такой рельеф дна может вызвать на отдельных участках магистрали протяженные провисания труб, а также значительные вибрационные нагрузки, вплоть до разрушения металла, что можно

предотвратить с помощью мер, принятых на основе проанализированных видеоспектральных данных.

Видеоспектральные аэрокосмические изображения позволяют выделять и картографировать разрывные нарушения, литолого-стратиграфические комплексы, выявлять складчатые структуры в условиях расчлененного рельефа. Например, область интенсивного проявления грязевого вулканизма, которая легко выделяется на видеоспектральных изображениях, парагенетически связана с нефтеносностью района. В частности, такие области характерны для районов западного побережья Каспийского моря.

Разработка и совершенствование видеоспектральной аппаратуры имеет большое значение при ее использовании и в военных целях, что связано с высокой эффективностью ее применения в случае, когда в получаемом изображении для выявления демаскирующих признаков требуется отдельно опознать смежные элементы или объекты, имеющие предельно близкие цвета или их оттенки, что абсолютно невозможно при использовании традиционных видов аэрокосмической съемки. Данное свойство видеоспектральной аппаратуры придает ей особую ценность при решении целого ряда военных задач, среди которых следует выделить разведку, контроль заметности вооружения и военной техники, а также гидрометеорологическое обеспечение и экологический мониторинг военных объектов.

В обзоре военных программ космической видовой разведки [3] отмечена важность программ создания аппаратуры для спутниковой видеоспектральной съемки. Военные задачи включают получение видеоспектральных изображений для оценки обстановки на сухопутном театре военных действий, номинации целей (определения локальных районов повышенного интереса, обнаружения крупномасштабных объектов и камуфляжа), трехмерного картографирования, обнаружения перемещения подразделений и крупномасштабных изменений в инженерных сооружениях, мониторинга погодных условий и прибрежных зон. Ожидается, что видеоспектральный принцип зондирования обеспечит повышение степени обнаружения тактических целей, даже если они укрыты с помощью новейших маскировочных средств. Вместе с тем, указано, что до выяснения потенциальных возможностей военного применения информации, получаемой посредством бортовых американских видеоспектрометров, правительством США наложен запрет на распространение среди зарубежных заказчиков видеоспектральных изображений с разрешением на местности лучше 20 м. Работы в этом направлении ведутся NASA по программе «Наблюдение за местностью» (EO-1) и космическим командованием США по программе «Уорфайтер».

Вышеизложенное, а также многочисленные результаты зарубежных испытаний видеоспектральной аппаратуры [4, 5], позволяют сделать вывод об исключительных перспективах развития видеоспектральной съемки как принципиально нового направления совершенствования методов и систем ДЗ в оптическом диапазоне. К сожалению, по экономическим причинам в отечественных исследованиях последнего десятилетия известны единичные примеры применения видеоспектрометрии [6–12].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли. – М.: Мир, 1988. – 343 с.
2. Чапурский Л.И. Отражательные свойства природных объектов в диапазоне 400–2500 нм. – М.: Изд. МО СССР, 1986.
3. Яблонский Л., Воронин Е., Кашин В. Зарубежные военные программы космической видовой разведки // Зарубежное военное обозрение. – 2002. – № 7.
4. Proceedings of the Fourth Intern. Airborne remote sensing conf. and exhibit // 21 Canadian symp. on remote sensing. Ottawa, Canada, 21 – 24 June 1999.
5. Proceedings of the Fourteenth conf. and workshops applied geologic remote sensing // Las Vegas, USA, 6 – 8 November 2000.
6. Гуд В.В., Красавцев В.М., Сандаков А.Н., Чиков К.Н. Видеоспектрометрические космические комплексы для исследования Земли и планет солнечной системы // Опт. журн. – 1995. – № 8. – С. 67–71.
7. Чиков К.Н., Гуд В.В., Красавцев В.М., Сандаков А.Н. Видеоспектрометры для экологического мониторинга // Изв. вузов «Приборостроение». – 1998. – № 3. – С. 5–10.
8. Чиков К.Н., Гуд В.В., Красавцев В.М. Бортовой видеоспектральный комплекс для целей геолого- и экологического картирования // Научные исследования высшей школы по экологии и рациональному природопользованию. Сб. статей / СПб.: Санкт-Петербургский горный ин-т. – 2000. – С. 173–175.
9. Батян П.В., Гуд В.В., Коняхин И.А. и др. Опыт использования видеоспектрометра ИТМО в натурных условиях // Изв. вузов «Приборостроение». – 2002. – № 2. – С. 46–51.
10. Чиков К.Н., Панков Э.Д., Порфирьев Л.Ф. и др. Особенности построения бортовых оптико-электронных систем спектрозонального мониторинга // Изв. вузов. Приборостроение. – 2004. – № 9. – С. 60–67.
11. Рафаилович А.С., Шлишевский В.Б. Краткие итоги разработки элементной базы и оптико-электронных модулей специального назначения для ультрафиолетового диапазона спектра // Сб. материалов Междунар. конгресса «ГЕО–СИБИРЬ–2006». Т. 4. – Новосибирск: СГГА, 2006. – С. 31–34.
12. Марков А.В., Рафаилович А.С., Шлишевский В.Б. и др. Некоторые предварительные результаты натурных испытаний оптико-электронной аппаратуры специального назначения для ультрафиолетового диапазона спектра // Сб. материалов междунар. конгресса «ГЕО–СИБИРЬ–2006». Т. 4. – Новосибирск: СГГА, 2006. – С. 34–37.

© В.М. Красавцев, А.Н. Семенов, К.Н. Чиков, В.Б. Шлишевский, 2007

НАПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЯ МНОГОЦЕЛЕВЫХ СТАНКОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ОПТИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Главная особенность развития станкостроения на современном этапе – существенное увеличение в структуре выпуска доли мало-габаритных точных станков для приборостроения. Современный технический уровень, которых обеспечивается, в первую очередь, повышением степени автоматизации единичной мощности машин, реализации технологических процессов на форсированных режимах, концентрацией технологических операций на одном рабочем месте.

В мировом производстве станков за последние 10–15 лет произошли существенные структурные сдвиги. При этом следует отметить рост выпуска фрезерных станков, которые в процессе их автоматизации и развития тенденции концентрации разнотипных операций на одной рабочей позиции приняли на себя значительный объем сверлильных, расточных и других операций.

Наряду с этим отмечается снижение выпуска чисто расточных и особенно сверлильных станков.

В настоящее время на западноевропейском рынке координатно-расточные станки уже не пользуются большим спросом, и все чаще заменяются многоцелевыми станками типа «обрабатывающий центр» тех же фирм-изготовителей.

Прецизионные обрабатывающие центры производят такие фирмы, как: DIXI (Швейцария), Mitsui Seiki, Jasda (Япония), Wanderer (ФРГ) и другие.

Современные отечественные сверх прецизионные станки подобного типа класса точности А могут быть изготовлены только на импортных комплектующих (измерительные преобразователи, УЧПУ И УЦИ фирмы Heidenhein, ФРГ).

Повышение производительности высокоточных многоцелевых станков обеспечивается за счет их совершенствования в следующих направлениях:

- Увеличение мощности главного привода (что позволяет использовать инструмент увеличенного размера) и многоинструментальных шпиндельных головок;
- Расширение диапазонов частот вращения и рабочих подач, что в сочетании с высокой мощностью и жесткостью станков позволяет применять современные режущие инструменты с оптимально высокими режимами резания;
- Сокращение вспомогательного времени за счет высокоскоростного позиционирования и быстрых перемещений рабочих органов со скоростью 60–80 м/мин, дальнейшего повышения быстродействия работы всех узлов и механизмов станка в 6–15 раз.

Для многоцелевых сверлильно-фрезерно-расточных станков компоновочные решения существенно меняются для повышения жесткости их несущих систем.

Жесткость одностоечных станков увеличивается за счет использования компоновки с крестовым столом, вертикально перемещающейся по стойке шпиндельной головки с жестким невыдвижным шпинделем и использования компоновки с продольно-подвижным столом, поперечно-перемещающейся стойки с вертикальной шпиндельной головкой без выдвижного шпинделя.

Повышение жесткости двухстоечных станков обеспечивается применением компоновки с продольно-подвижным столом, вертикально-перемещающейся поперечиной (от двух синхронных приводов), невыдвижного жесткого шпинделя.

На горизонтальных сверлильно-фрезерно-расточных станках используется компоновка с поперечно-подвижным поворотным столом, продольно-перемещающейся стойкой, с центральным геометрическим и термосимметричным В связи с повышением требований к точности обработки пространственно-сложных поверхностей наблюдается тенденция расширения выпуска многокоординатных станков (с управлением по четырем и более осям). Четырех- и пятикоординатные одностоечные станки с вертикальным шпинделем создаются путем применения накладных поворотных столов с ЧПУ с горизонтальной осью вращения (для четырехкоординатных станков) и универсальных поворотных столов с ЧПУ (для пятикоординатных станков).

Повышению производительности обработки на обрабатывающих центрах за счет более надежной и точной автоматизации смены инструмента (УАСИ) и устройств автоматической смены заготовок на паллетах, введения системы автоматического контроля деталей.

Повышение производительности станков достигается также благодаря повышению степени оснащенности станков различными устройствами и приспособлениями, расширяющими их технологические возможности: применение УЧПУ с большим количеством управляемых координат до 16...28, применением плансуппортных головок с ЧПУ, многошпиндельных и измерительных головок.

Совмещение традиционных операций сверления и растачивания с операциями глубокого сверления и растачивание производится с помощью агрегатной инструментальной оснастки и устройства подачи СОЖ сквозь инструмент (в том числе и на станках с УАСИ).

Применение высокоскоростных шпиндельных головок с частотой вращения 20 000...90 000 об/мин на станках позволяет совмещать сверлильно-фрезерно-расточные операции с выполнением ряда шлифовальных работ.

Основным видом ГП-модулей для обработки корпусных деталей являются вертикальные и горизонтальные сверлильно-фрезерно-расточные базовые станки. Как и ГПС, ГП-модули komponуются из унифицированных (по крайней мере в пределах фирмы) элементов в соответствии с конкретными требованиями заказчика. Заказчик определяет необходимый уровень автоматизации. Указанный подход к созданию ГП-модулей стал возможным

после перехода станкостроительных фирм к выпуску станков нового поколения, рассчитанных на оптимальное встраивание в ГП-модули или ГПС.

В пятикоординатных двухстоечных станках применяются встроенные и накладные двухкоординатные универсальные столы с ЧПУ.

Примером такого станка является пятикоординатный двухстоечный вертикальный сверлильно-фрезерный-расточной станок модели Taurus 3S фирмы Oerlikon (Италия).

Рост производительности достигается также повышением уровня автоматизации станков за счет увеличения числа управляемых координат (до 12).

Прецизионные обрабатывающие центры производят такие фирмы, как: DIXI (Швейцария), Mitsui Seiki, Jasda (Япония), Wanderer (ФРГ) и другие.

Для прецизионных станков сверлильно-фрезерно-расточной группы точность является основным показателем, определяющим их технический уровень. Фирмы стремятся в пределах достигнутой точности обеспечить наибольшую производительность и надежность с уменьшением удельных показателей по материалу- и энергоемкости.

К определяющей тенденции развития прецизионных обрабатывающих центров следует отнести повышение точности обработки и ресурса сохранения точности.

Определяя основные пути совершенствования технологии оптического производства, необходимо учитывать следующие факторы:

- Объективные условия современного развития станкостроения, приборостроения, и машиностроения в целом: нет государственной поддержки или же она ничтожно мала;

- Систематическое повышение точности выпускаемой продукции, а, следовательно, размерной и геометрической точности деталей (иначе продукция неконкурентоспособна), устройств ЧПУ и деталей приборов;

- Повышение технического уровня и степени автоматизации выпускаемых машин, усложнение их конструкций, увеличение количества деталей, проходящих механическую обработку, включая и оптические детали, рост абсолютной трудоемкости механической обработки и сборки, рост стоимости готовой продукции;

- Постоянное сокращение резерва трудовых ресурсов, и, в частности, количества основных рабочих-станочников, слесарей-ремонтников, наладчиков;

- Наличие большого количества физически и морально устаревшего оборудования.

В этом плане прогресс механической обработки и производства оптических деталей обуславливает ускорение развития приборостроения в целом.

Повышение жесткости станков типа ОЦ многоцелевых, существенно повышающийся при использовании при изготовлении несущих деталей активно внедряются неметаллические материалы: полимербетон, интегран, гранитан и другие. Об одном из них будет изложено ниже.

Во всех типах точных станков используются такие материалы как, гранитан, синтегран, минералокерамика.

Для повышения демпфирующей способности и устойчивости некоторые фирмы выполняют нижнюю часть станины из бетона, герметизированного эпоксидной смолой (полимербетон) или другими материалами для предохранения от влияния СОЖ и окружающей среды, другие оставляют в полостях рамы станины формовочный песок (например, фирма Gildemeister). Эти мероприятия обеспечивают повышение точности обработки и делают станок единым транспортным и монтажным (установка на трех точках без фундамента) узлом. Отдельные фирмы (G. Fischer – Швейцария, Sjurmek – Франция) выпускают станки с ЧПУ для комплексной обработки со станками из сплошного бетона (или с полостями) с металлическим каркасом, заанкерными направляющими из закаленной стали. Фирма G. Fischer реализовала потребителям несколько сот единиц оборудования с железобетонными станинами.

Бетонные станины обладают рядом преимуществ по сравнению с чугунными. Так, они обеспечивают более эффективное гашение (в 6 раз) вибрации, в связи с тем, что коэффициент демпфирования бетона почти в 6 раз выше, чем чугуна, что объясняется различием молекулярных структур материала. Бетон за счет внутреннего трения почти мгновенно гасит колебания, в частности высокочастотные вибрации и импульсные возмущения. Побочный эффект этого явления заключается в том, что бетон значительно интенсивнее подавляет распространяющиеся в нем звуковые колебания. Таким образом, демпфирование и звукопоглощение непосредственно связаны друг с другом. В пределах частотного диапазона 0–400 Гц станины из бетона имеют в 3–4 раза меньшие, чем из чугуна, резонансные частоты.

Жесткость такой станины определяется как произведение модуля упругости на плоскостный момент инерции, причем жесткость на изгиб в основном зависит от осевого момента инерции, а сопротивление кручению – от полярного момента инерции. Монолитная бетонная станина позволяет повысить плоскостный момент инерции за счет увеличения толщины стенок, вплоть до сплошного заполнения по всему (поперечному и продольному) сечению. Поскольку железобетон почти в 3 раза легче чугуна, дешевле и гигиеничнее в изготовлении, то небольшое повышение массивности конструкции не является помехой в его широком использовании. Более высокая крутильная жесткость станка позволяет его устанавливать без фундамента на трех точках.

Многолетние наблюдения и измерения выявили необычно высокую долговременную стабильность геометрических размеров бетонной станины: изменение углов наклона, линейных размеров и параллельности в среднем оказались меньше, чем в случае сопоставимой конструкции из серого чугуна, что подтверждается также материалами фирмы F. Sehtuder (Швейцария). За 20 лет эксплуатации, точностные параметры станков со станинами из полимербетона не изменились.

Многоцелевые станки типа ОЦ и ТОЦ в настоящее время выпускают фирмы многих стран, но она по функциональности и качеству изготовления, надежности дизайну и удобству обслуживания, существенно уступают станкам из Швейцарии, Германии, Японии, включая РФ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Концепция технологии 90-х годов. Автоматика и робототехника, Штаймхимлер, Р. Издательство: Модерн Индустрии (Германия) и Ост Контакт (Швейцария), 1990. – № 2.
2. Каталоги и проспекты, материалы симпозиума фирм производителей УЧПУ за 2002–2004 год: Hajdenchajn, Siemens, Boch, Traub, Gildemejster (ФРГ); Fanuc, Jmazaki, Okuma (Япония), Fасog (Испания), Num (Франция).
3. Каталоги, проспекты и материалы симпозиумов (по ОЦ и ТОЦ) станкостроительных фирм: ОАО «СТЕРЛИТОМАК – М. Т. Е.», ОАО «ИЗТС», ОАО «Красный пролетарий», ОАО «РСЗ» (Россия); Heckler – Koch, Burkhardt und Weber, Maho, F. Werner, Ex – Cell – O, Mauser, Traub, Gildemelster (ФРГ); Cincinnati Milackron, Kearney + Trecker, HAAS AUTOMATION (США); Oerlikon, Wyssbrod, Wahli (Швейцария); Olivetti, Mandelli (Италия); Mitsui Seiki, Roki – Rorki, Makino, Tayoda, OKUMA (Япония); Bridgenort (Англия). 2000 - 2004 г.

© Б.Э. Шлишевский, Н.К. Соснова, А.Н. Соснов, П.И. Петров, 2007

УДК 621.9.06: 62-529

Б.Э. Шлишевский, Н.К. Соснова, А.Н. Соснов

СГГА, Новосибирск

ПРОГРЕССИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ НА МНОГОЦЕЛЕВЫХ СТАНКАХ С УЧПУ

Определяя основные пути совершенствования технологии оптического производства и машиностроения в целом, необходимо учитывать следующие факторы:

- Объективные условия современного развития станкостроения, приборостроения и машиностроения. В целом нет государственной поддержки или же она ничтожно мала;
- Систематическое повышение точности выпускаемой продукции, а, следовательно, размерной и геометрической точности деталей станков (иначе продукция неконкурентоспособна);
- Повышение технического уровня и степени автоматизации выпускаемых машин, усложнение их конструкций, увеличение количества деталей, проходящих механическую обработку, включая и оптические детали, рост абсолютной трудоемкости механической обработки и сборки;
- Постоянное сокращение резерва трудовых ресурсов, и, в частности, количества основных рабочих-станочников, слесарей-ремонтников, наладчиков;
- Наличие большого количества физически и морально устаревшего оборудования.

В этом плане прогресс механической обработки и производства оптических приборов и деталей, обуславливает ускорение развития приборостроения в целом.

Важнейшим средством повышения технического уровня производства является внедрение новых базовых технологий и комплексная автоматизация технологического процесса. Станки-автоматы известны давно, они работали в жестком цикле от кулачков, копиров, упоров и их переналадка требует значительных затрат времени. Широко используются также автоматические линии для обработки деталей массового производства. Они эффективны на переналадке на другую продукцию практически не подлежат.

В тоже время в производстве 75–80 % всей номенклатуры деталей составляют небольшие, серийные партии, и ассортиментное разнообразие деталей имеет тенденцию к возрастанию.

В этих условиях, вопросы, связанные с повышением гибкости и автоматизации производства приобретают фундаментальное значение.

Появившиеся 50-десятилетие назад первые системы числового программного управления с жестким составом алгоритмов управления типа NC сыграли положительную роль в повышении производительности и мобильности производства, но лишь в весьма ограниченных пределах. К тому были довольно дороги, сложны и в целом – малоэффективны.

Создание на границе 70–80 годов прошлого столетия микропроцессорные системы числового программного управления (ЧПУ), адекватные по своим функциям универсальным или специализированным ЭВМ – (но во много раз меньше по стоимости и габаритам) радикально решили проблему гибкого автоматического управления технологическим оборудованием, а также управления целыми систем машин. Этим практически совершен революционный переворот в автоматизации систем управления.

Следует отметить, что расширение функциональности и технологических возможностей оборудования и систем ЧПУ является одним из концептуальных положений гибкой автоматизации. Эта концепция способствовала тому, что за сравнительно короткий срок (15–25 лет) на основе блочно-модульного принципа создана гамма станков-автоматов с ЧПУ по всем типам металлорежущих станков и заготовительного оборудования. Эти станки и оборудование в условиях серийного производства могут обеспечивать реализацию прогрессивных схем обработки деталей, свойственных массовому производству.

Таким образом, сложилась ситуация, при которой обработку базовых, корпусных и других деталей в условиях массового и, в ряде случаев, крупносерийного производства экономически выгодно выполнять на традиционном оборудовании с жесткими системами управления. Это оборудование постоянно совершенствуется и развивается. При этом оно часто интегрирует в себе отдельные элементы, заимствованные из техники ЧПУ, что повышает его гибкость и технологические возможности. Но в общем, объеме выпуска доля автоматических станков для жестко программируемого специального и автоматического оборудования увеличивается незначительно.

В то же время работы по внедрению в производство гибкой автоматизации во всех видах производства, но особенно в серийном (мелко-, средне-, крупном), получают за рубежом все более широкое развитие.

Рассмотрим некоторые обобщенные технологические возможности многоцелевых станков.

Современные ОЦ и ТОЦ – это системы мехатроники самого высокого уровня. Они имеют мощные приводы, высоко – динамичны по конструкции, имеют жесткие станины и всех узлов; термосимметричные направляющие и шпиндельный узел; снабжены большим количеством разнотипных инструментов и автооператорами для их последовательной замены по управляющей программе обработки.

Многоцелевые станки для обработки резанием воплощают идею концентрации и комбинации операций, широко функциональны и универсальны. ТОЦ и ОЦ обеспечивают одноточечное расположение оборудования в пространстве, 3-х–6-ти стороннюю обработку, позволяют интегрировать и выполнять все или большее число разнородных технологических операций, например: точение, растачивание, включая тонкое чистовое точение, черновое и чистовое фрезерование всеми типами фрез, сверление, рассверливание, зенкерование, развертывание, резьбонарезание, и другие (в отдельных случаях дорнование и протягивание) непрерывно, за один установ заготовки, без её перемещения по цеху.

Изготовление базовых объемно-сложных, многомерных корпусных деталей и тел вращения может быть осуществлено полностью за один установ на одном станке или в гибкой технологической ячейке из двух станков последовательно или параллельно в автоматическом цикле без перемещения по различным рабочим местам. Существенно уменьшается потребность в квалифицированной рабочей силе; многократно сокращается цикл производства.

Практически полностью исключается ручной труд на вспомогательных и машинных переходах обработки, ликвидируются (или сводятся до минимума) межоперационные транспортные, контрольные, установочные и разметочные операции, складирование и пролеживание заготовок. Отпадает необходимость в многочисленных перемещениях заготовок по цеху и в большой номенклатуре специальной оснастки, обеспечивается возможность многостаночного обслуживания. Для обработки традиционными методами (на разных типах станков), исключаются многократные ошибки базирования, закрепления заготовок, постоянная и случайная погрешности непосредственно станков, приспособлений, оснастки. В результате существенно повышается точность обработки и достигаются преимущества, свойственные поточному крупносерийному производству.

Для повышения законченности цикла обработки и повышения уровня автоматизации и функциональности многоцелевые станки оснащают: одно – и двухповоротными столами; различными поворотными и дополнительными инструментальными головками, в том числе многошпиндельными, для углового сверления и фрезерования; устройствами для автоматической замены спутников с заготовками и обработанными деталями; различными системами активного

автоматического контроля деталей, инструмента и процесса обработки; системами самодиагностики ЧПУ и исправности станка.

Все эти компоненты выдвигают ОЦ и ТОЦ на первый план в технологии гибкой – автоматизированной обработки корпусных деталей, нецентровых и других сложных тел вращения. Эти станочные комплексы во многих случаях, станки с CNC – ЧПУ являются первым уровнем гибкой автоматизированной обработки. Максимальное освоение экономического потенциала и технических возможностей потребителями создает предпосылки для интенсивной разработки гибких технологий более высокого уровня: станочных роботизированных технологических комплексов (РТК), гибких производственных модулей (ГПМ), гибких производственных систем (ГПС) [1].

Многоцелевые станки в ряде случаев целесообразно комплектовать промышленными роботами, автоматическими манипуляторами или системой спутников с заготовками, установленными на них вне рабочей зоны станка. Станки полуавтоматы, управляемые от ЧПУ, ОЦ и ТОЦ, за рубежом сравнивают (по их значимости в машино- и приборостроении) с созданием паровой машины, автомобиля, самолета, а гибкое автоматизированное производство (ГАП) – с достижениями космической техники.

Эти достижения позволили перейти к качественно более прогрессивному этапу технологии и организации производства, который в литературе все чаще определяется термином «гибкая автоматизация».

Важнейшие показатели современного технического уровня автоматических станков – высокие частоты вращения шпинделя и скорости рабочих и холостых ходов, минимальное время всех видов коммуникационных потерь, высокая мощность главного привода для работы на интенсивных режимах резания, мощное инструментальное обеспечение.

Можно также перечислить некоторые определяющие направления в развитии и совершенствовании технологии механообрабатывающего производства в приборостроении, которые относятся в разной степени к деталям типа тел вращения (центровым и нецентровым), корпусным, фигурным и др.

Внедрение малооперационной технологии механической обработки, т. е. максимальная концентрация технологических операций, выполняемых на одном станке по возможности за один установ деталей;

Максимальная интенсификация процессов механической обработки на основе применения параллельных и параллельно-последовательных методов обработки, использование многоинструментальных наладок и увеличение суммарной длины режущих кромок инструментов, перекрытие машинным временем времени на установку и снятие деталей;

Повышение режимов резания за счет более широкого применения новых и усовершенствованных инструментов и инструментальных материалов: неперетачиваемых твердосплавных пластин с механическим креплением, износостойких покрытий инструментов, оснащенных сверхтвердыми материалами (СТМ) и минералокерамикой;

Повышение точности и степени «законченности» механической обработки (для исключения доделочных и доводочных операций, выполняемых при сборке) путем широкого применения финишных методов обработки: чистового точения, шлифования, тонкого фрезерования, хонингования и др. Эффективно «сдвигать» трудоемкость из процессов сборки в механическую обработку, а затем – в заготовительное производство;

Комплексная механизация и автоматизация основных и вспомогательных процессов производства, повышение его гибкости и мобильности путем создания автоматизированных участков из станочных модулей и роботизированных ячеек.

Совершенствование технологии и повышение гибкости механической обработки достигаются улучшением технологической структуры станочного парка механических цехов. Необходимо повысить удельный вес прогрессивных групп оборудования, в том числе универсальных и специальных станков-автоматов и полуавтоматов, нового поколения одно- и многоцелевых станков с ЧПУ всех типовых групп; агрегатных станков с быстросменными головками; станков высокой и особо высокой точности, что позволяет снизить количество доделочных и пригоночных работ на сборке. Следует повысить степень универсальности и расширить технологические возможности оборудования (автоматический контроль размеров деталей, качества и стойкости инструментов, автоматизация загрузки – выгрузки заготовок и деталей с помощью автоматических манипуляторов, стыковка с сервисными устройствами).

Оптимизация разнообразных рабочих процессов по точности, повышению надежности, управлению сервисными устройствами, которые в ТОЦ и ОЦ, в условиях реализации гибкой автоматизации становятся более многочисленными и сложными, предъявляют дополнительные требования к математическому обеспечению технологической функциональности и эксплуатационной надежности устройств с ЧПУ. Ведущие зарубежные фирмы выпускают широкий спектр с УЧПУ для всех типовых групп станков; для токарных станков с ЧПУ в РФ выпускаются надежные системы НЦ 31 и их модификации. Ведутся интенсивные работы по созданию и выпуску универсальных систем ЧПУ и для других видов оборудования, которые по своим качествам не уступали бы зарубежным аналогам УЧПУ 4 и 5 поколений [2]. В тоже время отечественные станкостроительные заводы выпускают конкурентоспособные станки класса точности П и В с зарубежными комплектующими элементами (включая, УЧПУ фирм «Fanuk» (Япония), «Siemens» и «Heidenhein» (Германия) и другие). Подобная практика кооперации широко используется в международных деловых контактах. В частности, ИЗТС г. Иваново выпускаемые ОЦ реализует в десятках зарубежных, в том числе и развитых странах, в том числе и в промышленно высоко развитых, таких как, Швейцария, Германия и других. Подобная кооперация широко развита и выгодна странам-участникам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Концепция технологии 90-х годов. Автоматика и робототехника, Штаймхимлер Р. Модерн Индустрии (Германия) и Ост Контакт (Швейцария) 1990. – №.2.
2. Шлишевский Б.Э. Микропроцессорные устройства ЧПУ и гибкая автоматизация оборудования в оптическом приборостроении / Б.Э. Шлишевский, А.Н. Соснов, Е.Е. Трифонов. – Новосибирск: НИИГАиК, 1989.
3. Каталоги и проспекты, материалы симпозиума фирм производителей УЧПУ за 2002–2004 год: Hajdenchajn, Siemens, Boch, Traub, Gildemejster (ФРГ); Fanuc, Jmazaki, Okuma (Япония), Fасог (Испания), Num (Франция).

© Б.Э. Шлишевский, Н.К. Соснова, А.Н. Соснов, 2007

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ОПТИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ИК-МАТЕРИАЛОВ

Согласно закону смещения Вина, максимум излучения человека и окружающих его предметов при температуре, характерной для среды его обитания, находится в ИК области в интервале длин волн 4–9 мкм.

В этой области стекло непрозрачно, поэтому в оптических системах используют оптические кристаллы, оптическую керамику, бескислородные стекла, которые в видимой области спектра часто непрозрачны или малопрозрачны, что затрудняет контроль их дефектов. В современных ИК-приборах, имеющих фотоэлектрическую регистрацию, влияние оптических неоднородностей велико, так как они отклоняют лучи, чем искажают информацию об объекте.

Для контроля неоднородностей ИК-материалов применяют как традиционные методы (светящейся точки [1, 2], теневой [3], интерференционный [4]), так и сравнительно новые: голографический, ИК-микроскопии, амплитудно-фазовой модуляции и т. д.

Для визуализации дефектов используются ЭОПы [3–6], ИК-фото пленки и фотобумагу, сенсibilизированные в ИК-области [8], специальные люминофоры [2], толстослойные голограммы [7], однако наиболее чувствительными и производительными являются измерительные устройства, где в качестве регистрации применяются фотоэлектрические приемники с выносом результатов исследований на экран монитора. Такие приборы позволяют автоматически производить разбраковку заготовок.

В настоящем обзоре описаны различные методы контроля оптических неоднородностей с фотоэлектрической регистрацией.

Метод светящейся точки

В работе описана установка [11], работающая по принципу светящейся точки и использующая в качестве регистратора излучения фотоэлектрический приемник, осуществляющий сканирование изображения. Картина распределения дефектов воспроизводится в видимых лучах на экране видеоконтрольного устройства (рис. 1).

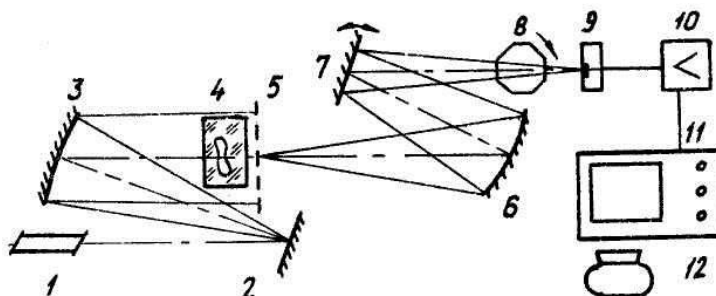


Рис. 1. Видеоконтрольное устройство

1 – лазер; 2, 3, 6 – сферические зеркала; 4 – образец; 5 – регистратор; 7 – кадровое зеркало; 9 – фотоприемник; 10 – усилитель; 11 – ВКУ; 12 – фотоаппарат

Голографический метод

Большие возможности для контроля неоднородностей в ИК-области спектра предоставляет голография, позволяющая измерить фазовый сдвиг между возмущенным и невозмущенным оптической неоднородностью фронтами.

Основными достоинствами голографического метода являются [10]:

- Практически неограниченность размеров деталей;
- Сравнительно невысокие требования к качеству оптических элементов;
- Возможность определения объемного распределения показателя преломления;
- Возможность регулирования чувствительности в широких пределах;
- Возможность регистрации и «замораживания» световой волны, прошедшей через испытуемый образец, с последующим ее исследованием не только интерференционным, но и теньвым методом и методом светящейся точки, с получением максимальной информации об исследуемой неоднородности.

Голографический дефектоскоп, предложенный в [11], позволяет обнаруживать внутренние дефекты ИК-материалов (пузыри, камни, посторонние включения, свиля) (рис. 2). Источником излучения является лазер с активным элементом $2YAG:Nd^{3+}$.

Фазовая структура образца восстанавливается в результате обработки сдвиговых интерферограмм и ввода информации в ЭВМ. Восстановленное изображение интерферограммы обрабатывается построением по экспериментально снятой фотографии картины тонких линий, проходящих по максимумам интерференционных полос.

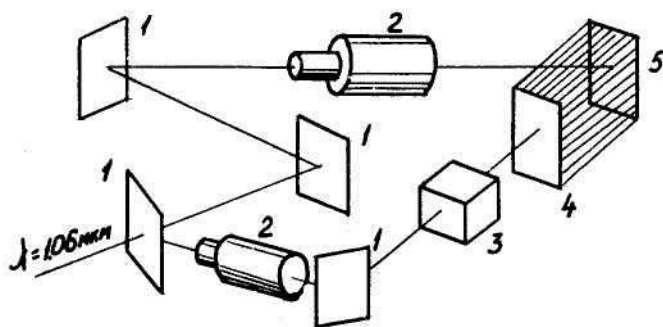


Рис. 2. Голографический дефектоскоп:

1 – зеркала, 2 – расширитель пучков, 3 – образец, 4 – голограмма, 5 – рассеиватель

Для голографирования в дальней области спектра была создана установка [10], работающая на длине волны 10,6 мкм, и применяющийся в качестве регистратора голограммы фотоэлектронный приемник. Сканирование ИК-изображения относительно приемника излучения и воспроизведения видимого изображения на экране видеоконтрольного устройства производилось специальным оптико-электронным прибором, описанным в [11].

Разделение опорного и предметного пучков производилось по схеме интерферометра Маха-Цендера, светоделительные пластины в котором выполнены из германия.

Метод амплитудно-фазовой модуляции

Так как наличие оптических неоднородностей приводит к искажению амплитудно-фазового распределения прошедшего через них излучения, измерение этих искажений позволяет определить пространственное распределение неоднородностей.

Амплитудно-фазовый метод [12] позволяет получить количественную информацию пространственного распределения градиента показателя преломления $\text{grad}n$ по образцу.

Сущность метода понятна из принципиальной схемы (рис. 3).

Телескопическая система 3 расширяет пучок лазера 1 и формирует с помощью модулятора 2 прерывистый сигнал с частотой 12 Гц. Платформа сканирующего устройства 7 с установленной на ней диафрагмой 5 и приемником 6 может перемещаться перпендикулярно оптической оси прибора. Преобразователь перемещения 8 вырабатывает электрический сигнал, соответствующий координате в направлении сканирования. Двухплощадочный дифференциальный пироэлектрический приемник 6 позволяет одновременно получать сигнал, пропорциональный углу отклонения луча в плоскости сканирования, и сигнал, пропорциональный интенсивности излучения, прошедшего диафрагму 3 и испытуемый образец 4.

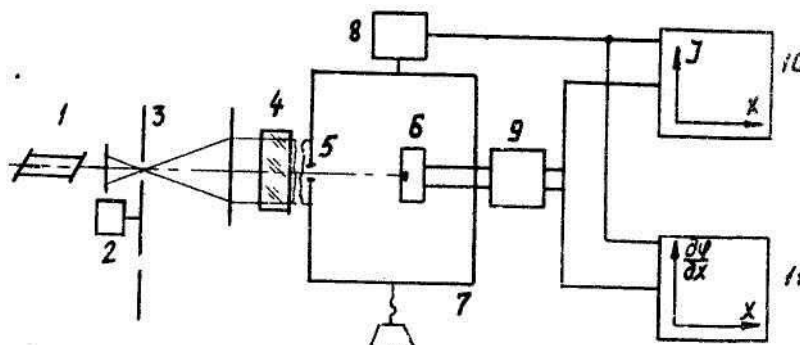


Рис. 3. Амплитудно-фазовое устройство:

1 – лазер; 2 – модулятор; 3 – телескопическая система; 4 – образец; 5 – диафрагма; 6 – приемник; 7 – платформа сканирующего устройства; 8 – преобразователь перемещения; 9 – электронный преобразователь; 10 – самописцы

Электрические сигналы, поступающие с приемника на электронный преобразователь, усиливаются им, нормируются по величине интенсивности и после выпрямления попадают на входы двухкоординатных самопишущих приборов 10 и 11, куда одновременно подается сигнал от преобразователя перемещений 9. Самописец 10 регистрирует распределение $d\phi(x)/dx$ градиента фазы вдоль траектории луча сканирования, самописец 11 – распределение интенсивности $J(x)$, излучения в направлении чувствительной оси устройства. Распределение изменения показателя преломления в однородности $\delta n(x)$ находится из выражения:

$$\delta n(x) = (\lambda/2\pi n) \int (d\varphi(x)/dx) dx,$$

где d – толщина исследуемого образца.

Прибор, предложенный Солом и Вильямсом [13], также основан на измерении модуляционных изменений интенсивности узкого пучка ИК-излучения, прошедшего через неоднородность. С помощью системы зеркал (одиночного, колеблющегося с частотой 200 Гц и двойного, перемещающегося поступательно) происходит медленное сканирование образца точечной диафрагмой. Обработанный электронной системой сигнал от приемника поступает на самописец, изображающий распределение интенсивности в тонких линиях, совокупность которых образует псевдо объемную картину однородности образца.

Интересный вариант метода амплитудно-фазовой модуляции описан [14]. Сущность метода заключается в преобразовании фазового контраста объекта в амплитудный контраст в пространстве изображений фокусирующей оптической системы при смещении исследуемого объекта относительно плоскости предметов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Доладугина В.С. Оптическая однородность материала КО 1 / В.С. Доладугина, В.И. Воскресенская // ОМП. – 1979. – №7. – С. 18–20.
2. Доладугина В.С. Прибор для исследования свильности оптических материалов в красной и ближней ИК-области спектра / В.С. Доладугина, В.И. Воскресенская, М.И. Колпаков // ОМП. – 1968. – № 5. – С. 56–57.
3. Кузнецова А.Ф. Исследование неоднородностей полупроводниковых материалов / А.Ф. Кузнецова, Н.И. Поляков, А.Н. Цветкова // ОМП. – 1977. – № 1. – С. 30–35.
4. Доладугина В.С. Инфракрасный интерферометр Майкельсона / В.С. Доладугина, В.И. Воскресенская, Ю.Д. Пушкин // ОМП. – 1973. – № 4. – С. 37–39.
5. Лазарев Л.П. Оптико-электронные приборы наведения летательных аппаратов / Л.П. Лазарев. – М.: Машиностроение, 1984. – 480 с.
6. Дуденкова А.В. Исследование оптических неоднородностей монокристаллов арсенида галлия / А.В. Дуденкова // Физика и техника полупроводников. – 1971. – Т. 5. – № 1. – С. 3–7.
7. Майклер М.П. О преобразовании ИК-изображения в видимое с помощью толстостенной голограммы / М.П. Майклер // Журнал технической физики. – 1979. – Т.49. – № 10. – С. 2255.
8. Тимофеев Ю.П. Люменесцентные приемники прямого видения полей ИК-излучения. / Ю.П. Тимофеев, С.А. Фридман // Изв. АН СССР. Сер. Физика. – 1981. – Т. 45. – № 2. – С. 296–301.
9. Гнатюк Л.Н. Исследование характеристик оптических элементов в ближнем ИК-диапазоне посредством голографии / Л.Н. Гнатюк, М.Л. Гурари // Измерительная техника. – 1975. – № 7. – С. 40–50.
10. Рукман Г.И. Голография в ИК-области спектра на основе сканирующих преобразователей изображения / Г.И. Рукман, В.Е. Лисянский // Измерительная техника. – 1978. – № 5. – С. 29–30.
11. Лисянский, Б.Е. Контроль оптической однородности материалов в ИК-области / Б.Е. Лисянский, П.А. Морозов // Измерительная техника. – 1982. – № 4. – С. 36–37.
12. Бардюков А.М. Определение пространственного распределения в полупроводниковых материалах / А.М. Бардюков, М.Э. Бэрг // Измерительная техника. – 1978. – № 9. – С. 42–44.
13. Saul R.S., William T.L. JR-Scanning device vor non-homogeneity samples detection. – Opt.acta, 1978, v 25, № 12, 5. 1149–1153.

14. Чудаков В.С. Метод наблюдения оптической неоднородности с помощью спектральной модуляции / В.С. Чудаков, Б.Н. Гречушников // ОМП. – 1977. – № 7. – С. 49–51.

© Л.А. Канушина, А.Н. Соснов, Н.К. Соснова, 2007

ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ Mg – B

Основное внимание последнее время уделено результатам изучения природы сверхпроводимости и физико-химических свойств MgB_2 , полученных в последние годы (включая 2001 г.). Диборид магния имеет исключительно простой состав и структуру, что чрезвычайно важно при его получении. Целью данной работы является исследование системы $\text{Mg} - \text{B}$.

Детальная фазовая диаграмма системы $\text{Mg} - \text{B}$ не построена. Она представляет нелегкий объект для исследования в связи с высокой летучестью магния и сложностью выделения монокристаллов образующихся в ней бинарных соединений, а также из-за трудности химического определения свободного и связанного бора. Все это не дает возможности внести достаточную ясность в вопрос о составе и структуре высших боридов магния [1].

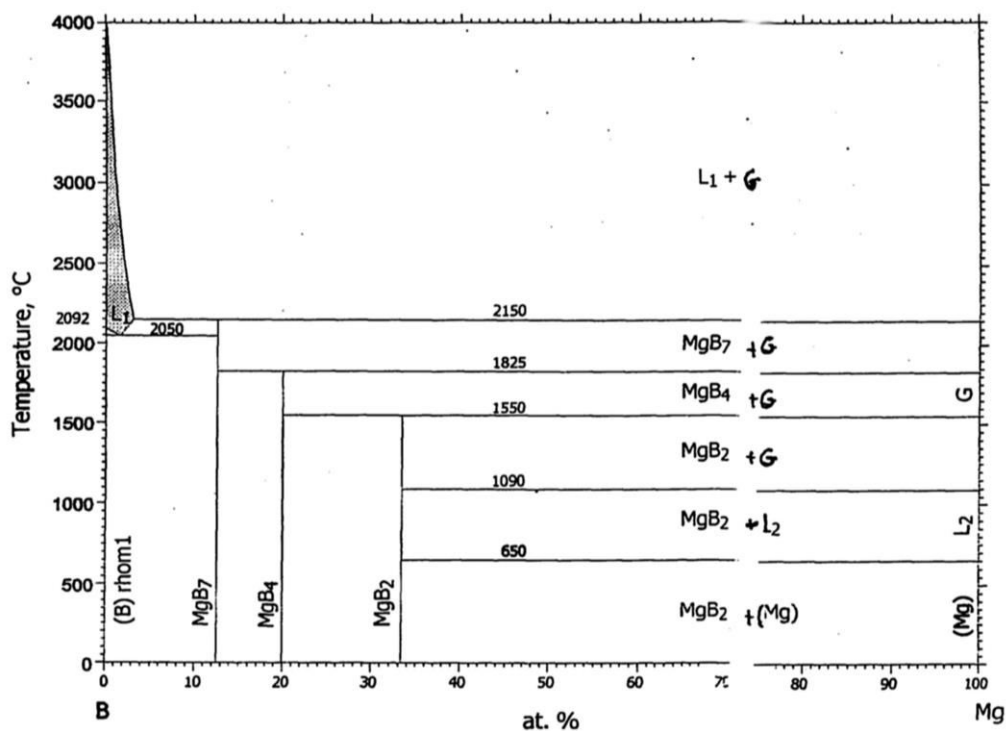


Рис. 1. Диаграмма состояния системы $\text{Mg} - \text{B}$ [4]

Справочник «Диаграммы состояния двойных металлических систем» [2] сообщает о нескольких боридах в системе $\text{Mg} - \text{B}$, однако только один (MgB_2) надежно установлен.

Данные о боридах с более высокой концентрацией B, чем в MgB_2 , противоречивы. Отмечено существование боридов MgB_6 и MgB_{12} , обозначенных как (A) и (C), соответственно, а также фазы (B) промежуточного состава между MgB_6 и MgB_{12} .

Также сообщается о получении соединений MgB_4 , MgB_6 и фазы переменного состава MgB_{6-17} . При температуре выше 1300°C фаза MgB_{6-17} разлагается на две фазы (X и X_1), составы которых не установлены.

На основании рентгеновских исследований фазы MgB_4 и MgB_6 соответствуют боридам (A) и (B), а соединение (C), по-видимому является смесью фаз (X) и (X_1).

Указаны температуры невариантных превращений <1050 , 1150 , 1200 , 1700°C , при которых, по-видимому, образуются фазы MgB_2 , (A), (B) и (C), соответственно.

Таким образом, даны сведения о четырех фазах – MgB_2 , MgB_4 , MgB_6 , MgB_{12} .

В работе А. Л. Ивановского отмечены 3 фазы MgB_2 , MgB_4 и MgB_7 и отсутствуют фазы MgB_6 , MgB_{12} . На рис. 1 представлена диаграмма состояния Mg – B, приведенная в работе [3]. В ней рассмотрены бориды магния, для которых получена по мнению автора достоверная структурная информация.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Серебрякова, Т.И. Высокотемпературные бориды / Т.И. Серебрякова, В.А. Неронов, П.Д. Пешев. – М.: Металлургия, 1991. – 368 с.
2. Лякишев, Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем: в 3 т. / Н.П. Лякишев, О.А. Банных, Л.Л. Рохлин. – М.: Машиностроение, 1996. – 2000 с.
3. Ивановский, А.Л. Сверхпроводящий MgB_2 и родственные соединения: синтез, свойства, электронная структура / А.Л. Ивановский // Успехи химии. – 2001. – 70 (9). – С. 812 – 829.
4. Перминов, В.П. Вопросы безопасности при получении MgB_2 // В.П. Перминов, В.А. Неронов // Вестник СГГА. – 2004. – Вып. 9. – С. 144–147.

© Т.В. Ларина, В.П. Перминов, В.А. Неронов, А.Н. Соснов, 2007

УДК 669.01

Т.В. Ларина, В.П. Перминов, А.Н. Соснов

СГГА, Новосибирск

В.А. Неронов

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ БОРИДОВ АЛЮМИНИЯ И МАГНИЯ

Несмотря на практическую полезность, бориды алюминия широкого применения не нашли. Это обусловлено:

- Технологическими трудностями синтеза чистых боридов алюминия, что в свою очередь связано с высокой температурой плавления и реакционной способностью бора, сложностью идентификации образующихся фаз;
- Недостаточной изученностью фазовых равновесий в системе алюминий – бор.

В системе В – Al надёжно установлено существование двух соединений – AlB_2 и AlB_{12} (α – модификация).

Инконгруэнтный характер плавления AlB_{12} затрудняет его получение непосредственно из расплава. При относительно низких температурах дополнительные ограничения накладывает перитектическая реакция:



протекающая, по разным данным, в интервале, 1 000–1 500 °С. Небольшой наклон кривой ликвидуса в области 1 500–1 800°С, где, по-видимому, имеет место кристаллизация AlB_{12} непосредственно из расплава, указывает на то, что количество образующегося додекаборида сильно зависит от температуры. Это создаёт неблагоприятные условия при кристаллизации соединения и требует медленного охлаждения.

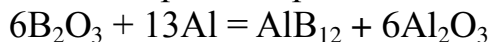
Синтез диборида AlB_2 также затруднён указанным выше перитектическим превращением. Рекомендуемые температуры при получении этого соединения из элементов (800–850 °С) требуют длительных выдержек и обычно не обеспечивают полноты взаимодействия из-за оксидной плёнки на частицах алюминия. Концентрационный интервал первичной кристаллизации AlB_2 в связи с крутым подъёмом линии ликвидуса со стороны алюминия настолько узок, что позволяет получать только сплавы с незначительным содержанием диборида алюминия [1].

Таким образом, характер фазовых равновесий в системе В–Al показывает, что получение как AlB_2 , так и AlB_{12} представляет собой довольно сложную технологическую задачу.

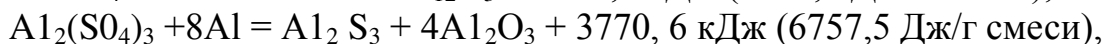
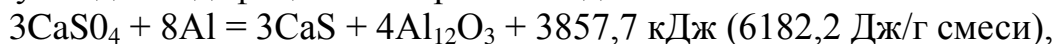
На данный момент можно отметить два основных метода получения боридов алюминия:

1. Аллюминотермическое восстановление борного ангидрида;
2. Синтез из элементов (используют обычно в препаративных и аналитических целях).

Наиболее производительным методом получения, в частности богатого бором соединения α - AlB_{12} , является аллюминотермическое восстановление борного ангидрида по реакции:



Поскольку выделяющегося при этом тепла недостаточно для качественного разделения металлической и шлаковой составляющих плавки, в шихту вводят недефицитные термитные добавки:



которые обеспечивают удовлетворительные металлургические показатели плавки – извлечение бора до 70–75 %, формирование единого, хорошо отделяющегося от шлака слитка.

Недостатком этих процессов является насыщение слитка серой, образование сульфидов и как следствие образование сероводорода при взаимодействии шлака и металлического слитка с влагой воздуха и при химической обработке.

В.А. Нероновым и сотр. [1–3] разработано несколько вариантов и технология алюминотермического синтеза α - AlB_{12} , которые обеспечивают хорошее извлечение бора из борного ангидрида, качественное отделение металлического слитка от шлака и техническую чистоту получаемого продукта. Диборид алюминия AlB_2 может быть получен в небольших количествах при алюминотермическом синтезе AlB_{12} .

Таким образом, эффективным методом получения додекаборида алюминия является алюминотермическое восстановление борного ангидрида. Одной из задач является разработка метода без использования добавок, содержащих серу и оптимизация процесса алюминотермического получения диборида алюминия.

Бориды магния также недостаточно изучены, как и бориды алюминия. В системе В – Mg описано несколько соединений: MgB_2 , MgB_4 , MgB_7 , MgB_{12} и др. [2, 4, 6]. Наибольшее внимание, из которых привлекает диборид магния. Существуют несколько методов синтеза боридов магния [2, 4, 6]:

1. Магнийтермическое восстановление борсодержащих соединений;
2. При взрывном нагружении смеси порошков магния и бора.

Открытие в 2001 г. [6, 7] сверхпроводимости диборида магния MgB_2 с температурой сверхпроводящего перехода $T_c \approx 40$ К примерно вдвое более высокой, чем у всех изученных к настоящему времени бинарных бескислородных сверхпроводников (например, NbN $T_c = 17$ К; Nb_3Ge $T_c = 23$ К и др.) вызвало «лавину» публикаций как с результатами исследований строения вещества, так и его физико-химических свойств и способов получения. Диборид магния имеет исключительно простой состав и структуру, что чрезвычайно важно при его синтезе.

Попытки получить это вещество магнийтермическим восстановлением борсодержащих соединений не дали удовлетворительных результатов [6].

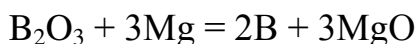
По-видимому, наиболее перспективными способами получения будут различные варианты, в том числе в условиях сверхвысокого давления в несколько десятков Кбар [4].

В настоящее время сверхпроводящий MgB_2 получают в основном в поликристаллическом состоянии твердофазным синтезом из элементов $\text{Mg} + 2\text{B} = \text{MgB}_2$, варьируя составами шихты, защитной среды и режимам термообработки [6].

Магний – чрезвычайно активный, низкокипящий восстановитель с большой летучестью. Поэтому процессы целесообразно проводить под повышенным давлением инертных газов в замкнутых объёмах под повышенным давлением инертных газов.

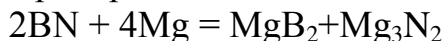
Например, в работе [5] проводилось восстановление борного ангидрида магнием в присутствии окислителя (бертолетова соль) в среде аргона в реакторе без внешнего подогрева.

Основная реакция восстановления борного ангидрида имеет следующий вид:



Однако фактически в результате восстановления B_2O_3 получается значительное количество боридов магния разного состава – от MgB_2 до MgB_{12} , а также субоксиды бора.

Предпринятая нами попытка получить диборид магния по реакции



не увенчалось успехом. Установлено, что это связано с испарением магния в процессе нагрева исходной смеси.

Бориды магния предложено получать взрывом [7].

Смесь исходных порошков $Mg + 2B$ предварительно подвергали измельчению и механической активации. Обработку проводили в течение одной минуты в защитной среде аргона при самом энергонапряженном режиме (60 g) работы планетарной шаровой мельницы АГО-2. Полученная смесь порошков загружалась в стальную цилиндрическую ампулу с наружным диаметром 14 мм, внутренним 8 мм и длиной полости, равной 100 мм. Ампулу помещали по оси цилиндрического заряда взрывчатого вещества и компактировали взрывом при давлении 3 ГПа.

Величина этого давления существенно превосходит прочность материала ампулы, что приводит к ее пластической деформации. Внутренний диаметр ампулы уменьшался с 8 мм примерно до 5 мм, что приводило к увеличению плотности смеси порошков.

Исследование полученных образцов проводилось на растровом электронном микроскопе JSMT-20. Рентгеноструктурный анализ выполнялся на дифрактометре ДРОН-3 в CuK_α -излучений.

На основании данных исследования, а также знания общих закономерностей, протекающих при нагружении, можно предположить следующую схему происходящих при этом процессов.

1. Разогрев и плавление частиц магния при нагружении.
2. Диффузия магния в окружающую реакционную смесь.
3. Взаимодействие расплава магния с бором и образование диборида магния.

Не менее интересно по нашему мнению, решение подобной задачи по синтезу диборида магния из борного ангидрида при взрывном нагружении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Неронов В.А. Бориды алюминия / В.А. Неронов. – Новосибирск: Наука, 1966. – 72 с.
2. Серебрякова Т.И. Высокотемпературные бориды / Т.И. Серебрякова, В.А. Неронов, П.Д. Пешев. – М.: Металлургия, 1991. – 368 с.
3. Бориды алюминия / П.С. Кислый, В.А. Неронов, Т.А. Прихна, Ю.В. Бевза – Киев: Наукова думка, 1990. – 192 с.
4. Самсонов В.Г. Магниты / В.Г. Самсонов, В.П. Перминов. – Киев: Наукова думка, 1971. – 344 с.
5. Перминов В.П. Магнийтермическое внепечное получение бора из борного ангидрида / В.П. Перминов, В.А. Неронов // Порошковая металлургия. – 1969. – № 1. – С. 1–5.

6. Ивановский А.Л. Сверхпроводящий MgB_2 и родственные соединения: синтез, свойства, электронная структура / А.Л. Ивановский // Успехи химии. – 2001. – 70 (9). – С. 812–829.
7. Мали В.И. Взрывной синтез диборида магния / В.И. Мали, В.А. Неронов, В.П. Перминов, М.А. Корчагин, Т.С. Тесленко // Химия в интересах устойчивого развития. – 2005. – Т. 13. – С. 451–453.

© Т.В. Ларина, В.П. Перминов, А.Н. Соснов, В.А. Неронов, 2007

УДК 669.01

Т.В. Ларина

СГГА, Новосибирск

В.А. Неронов

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

В.П. Перминов, А.Н. Соснов

СГГА, Новосибирск

ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ Al – B

Имеющиеся диаграммы состояния системы Al – B неполные и содержат неточности.

Бориды алюминия относятся к группе бескислородных тугоплавких неметаллических соединений. Несмотря на практическую значимость – высокую твердость, большое поперечное сечение захвата тепловых нейтронов, малую плотность, химическую стойкость, полупроводниковые и другие важные для современной техники свойства – бориды алюминия в группе указанных соединений наименее изучены [1, 2].

Сложившаяся противоречивая ситуация – несомненная практическая полезность и недостаточная изученность боридов алюминия – обусловлена отсутствием до настоящего времени чистых образцов бора, высокой реакционной способностью B и Al, сложностью идентификации образуемых бором с алюминием и примесными элементами фаз, а также технологическими трудностями синтеза.

Информация о системе Al – B, полученная до середины 70-х гг. сводится к следующему. Со стороны Al имеет место эвтектическое превращение при температуре 659 °С. Положение эвтектической точки смещено в сторону, богатую Al. В системе образуются два соединения. Соединение AlB_2 образуется по перитектической реакции $\text{Ж} + AlB_{12} \rightleftharpoons AlB_2$. Для соединения AlB_{12} указывались три модификации α , β и γ .

Вариант диаграммы состояния, предложенный В.Т. Серебрянским и сотрудниками [3], противоречит правилу фаз Гиббса. Диаграмма состояния отражает все (за исключением γ - AlB_{12}) описанные соединения системы Al – B (AlB_2 , AlB_{10} , α - AlB_{12} , β - AlB_{12}) и фазу неуставленного состава, существующую между 1450 и 1550 °С.

Некоторые из найденных модификаций боридов Al оказались тройными фазами, образование которых вызвано загрязнением. Образование соединения AlB_{10} по данным ряда исследователей вызвано примесями углерода. Модификация AlB_{12} с моноклинной структурой образуется вследствие загрязнения азотом. Так называемый β - AlB_{12} с ромбической структурой в действительности оказался карбидом $C_2Al_3B_{48}$. Отмечено влияние кремния на образование фазы со структурой β - AlB_{12} [2, 4].

Наиболее достоверные варианты диаграммы состояния системы Al-B (рис. 1, 2) приведены в работах [2, 3]. Здесь представлены гипотетические варианты диаграммы состояния с указанием возможного образования соединения γ - AlB_{12} и фазы α - AlB_{12} с областью гомогенности со стороны бора (заштрихована).

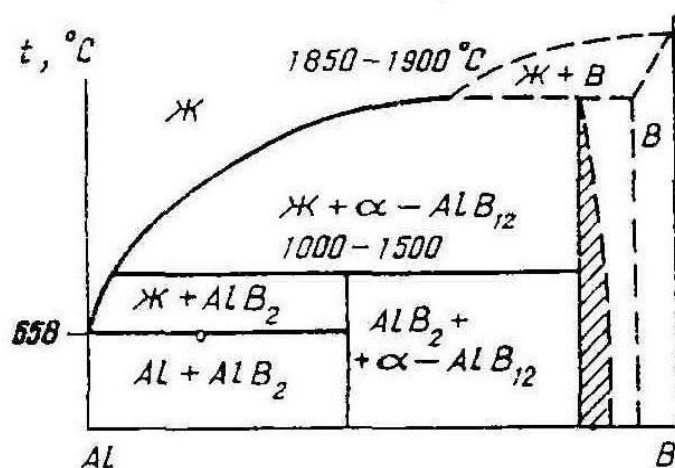


Рис. 1. Гипотетическая диаграмма состояния системы Al – B, учитывающая разложение α -AlB₁₂ на B и Ж

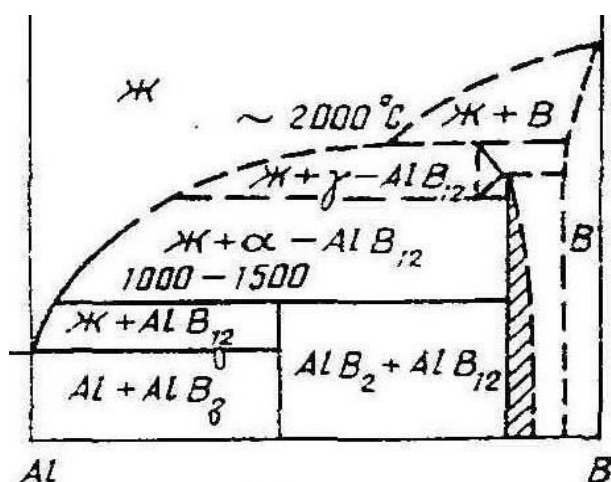


Рис. 2. Гипотетическая диаграмма состояния системы Al – B, учитывающая разложение и возможное образование γ -AlB₁₂

В работе [5] подтверждены данные об образовании фаз со структурами β -AlB₁₂ и AlB₁₀ при введении в шихту углерода. Анализировался метод алюминотермического восстановления буры и получены диборид и α – додекаборид алюминия. Были измерены теплоемкость, теплопроводность, удельное электросопротивление додекаборида алюминия до 480 К. Определена температура Дебая и энергия активизации прыжковой проводимости. Получена вольт – амперная характеристика α -AlB₁₂.

В работе [6] исследовали энтальпию образования AlB₂ и температуру его перитектического распада. В качестве исходного вещества использовался порошок AlB₂, очищенный вакуумной сублимацией. Из термодинамического анализа предсказан эвтектоидный распад AlB₂ при 213°C.

Обнаружено, что инконгруэнтное плавление AlB₂ происходит при 972 °C. Предполагается, что область стабильности AlB₂ может быть даже уже чем 972 – 213 °C.

Таким образом, природа фаз в системах Al – B, Al – B – C, а также Al – B – примесь требует дальнейшего анализа в широком температурно-

концентрационном интервале с привлечением современных методов исследования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Неронов В.А. Бориды алюминия / В.А. Неронов. – Новосибирск: Наука, 1966. – 72 с.
2. Серебрякова Т.И. Высокотемпературные бориды / Т.И. Серебрякова, В.А. Неронов, П.Д. Пешев. – М.: Металлургия, 1991. – 368 с.
3. Неронов, В.А. Обзор данных по диаграмме состояния системы Al – B / В.А. Неронов // Порошковая металлургия. – 1989. – № 10. – С. 58–62.
4. Лякишев Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем в 3 т. / Н.П. Лякишев, О.А. Банных, Л.Л. Рохлин. – М.: Машиностроение, 1996. – Т. 1. – С. 117–118.
5. Особенности синтеза и свойства боридов алюминия / Р.К. Чужко, В.А. Неронов, Ю.А. Коваленко, Т.К. Титова, Н.В. Неронова // Неорганические материалы. – 1995. – Т. 31, № 8. – С. 1043–1047.
6. Экспериментальное исследование и повторный термодинамический расчет системы Al – B / Реферативный журнал «Металлургия». – № 06.02-15E.30 // Experimental study and thermodynamic re-assessment of the Al – B system. Mirkovic Djordje, Grobner Joachinn, Schmid-Fetzer Rainer, Fabrichnaya Olga Lukas Hans Leo J/ Alloys and Compounds. 2004. 384. № 1-2, P. 168–174.

© Т.В. Ларина, В.А. Неронов, В.П. Перминов, А.Н. Соснов, 2007

УДК 669.295

В.П. Перминов

СГГА, Новосибирск

ПРОГРЕСС В МАГНИЕТЕРМИИ

Металлотермия – процесс восстановления металлов и их соединений с помощью других, более активных металлов – восстановителей. Это прогрессивный и непрерывно развивающийся в металлургии и химии метод, который позволяет простыми технологическими способами и с использованием несложного оборудования получать многие редкие металлы, осуществлять процессы сварки, производить ферросплавы, готовить многочисленные химические соединения. Основоположником металлотермии был замечательный русский ученый Николай Николаевич Бекетов (1827–1911).

Наряду с наиболее развитой алюминотермией в последние десятилетия все более широко используют кальциетермию, силикотермию, а также магниетермию, которой посвящена эта статья.

Магниетермия получила особенно глубокое развитие в связи с организацией промышленного магниетермического производства титана, ниобия и других легких и тугоплавких металлов, а также соединений типа нитридов, карбида бора, силицидов и др.

Одновременное расширение мощностей производства магния, его высокая восстановительная активность, отсутствие соединений магния со многими металлами, либо образование соединений непрочных, относительно легко

теряющих магний при высоких температурах обуславливает особенно быстрое распространение магниетермического метода в неорганическом синтезе и в производстве.

Кроме того, магниетермия позволяет синтезировать многие соединения магния с металлами и неметаллами, которые обладают важными физико-техническими свойствами, обеспечивающими использование в различных отраслях новой техники.

Хотя термодинамически магний является хорошим восстановителем почти всех оксидов, однако для успешного хода магниетермического процесса, необходим определенный тепловой эффект реакции, называемый часто термичностью, достаточный для расплавления компонентов шихты и продуктов реакции.

Нами было показано [1], что целесообразность применения магниетермии к той или другой группе исходных веществ находится в прямой зависимости от типа химического взаимодействия магния с восстанавливаемым элементом, и, следовательно, получать магниетермическим путем относительно чистый металл или металлоид возможно в достаточно ограниченном количестве систем.

К 70-м годам прошлого века в промышленности были реализованы магниетермические способы получения бериллия, титана, циркония, гафния, бора, урана из соответствующих галогенидов (за исключением бора).

Наиболее интенсивно в последние десятилетия ведутся работы в области металлургии титана.

Хорошо известный способ Кролля, основанный на восстановлении четыреххлористого титана магнием, модернизированный в СССР, вывел нашу страну на одно из первых мест в мире.

Совершенствование магниетермии титана продолжается как у нас в стране, так и за рубежом. Работы направлены на создание экономичных непрерывных способов [2].

Интересны в этом отношении работы, проводящиеся с 1997 года в Кембриджском университете Соединенного Королевства по получению титановой губки из диоксида титана, позволяющие в 3,5 раза уменьшить стоимость губки по сравнению с полученной по способу Кролля [3].

Ранее нами уже приводились результаты работ по синтезу боридов, нитридов, силицидов, фосфидов магния, а также карбида бора, гидрида циркония и некоторых сплавов [1].

В последние годы интенсивно исследуются нанотехнологии и наноматериалы, что объясняется значительным повышением (в 2–5 раз) ресурса изделий, полученных из наноструктурных соединений [4, 5].

В США например, проводились исследования по получению дисперсных порошков в парогазовой фазе. Восстановление тетрахлорида титана парами магния в среде метана позволяет получать также порошки карбонитрида [5].

В России также получены серьезные результаты по синтезу наноматериалов и фуллереноподобных соединений титана путем магниетермического восстановления хлоридов титана и углерода в среде аргона или азота [5].

В связи с открытием в 2001 году сверхпроводимости диборида магния с критической температурой $T_c = 39\text{K}$ начались интенсивные исследования по его получению.

Нами была предпринята попытка осуществить магниетермический процесс в условиях взрывного нагружения по реакции



В качестве исходных материалов использовались порошки магния Мг96 в виде чешуек размером 80–250 мкм и аморфного бора В94 марки А с размерами частиц не более 1 мкм.

Смесь порошков в соотношении, отвечающем составу MgB_2 , загружалась в стальную цилиндрическую ампулу с внутренним диаметром 8 мм и толщиной стенки 3 мм.

Ампулу помещали по оси цилиндрического заряда взрывчатого вещества (промышленный аммонит СЖВ) плотностью $0,9\text{ г/см}^3$ и диаметром 60 мм.

Инициирование проводилось с помощью высоковольтного детонатора.

Рентгеноструктурный анализ показал наличие в центральном канале ампулы около 90 % диборида магния [6, 7].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Самсонов Г.В. Магниетермия / Г.В. Самсонов, В.П. Перминов. – М.: Металлургия, 1971. – 174 с.
2. Тарасов А.В. Металлургия титана / А.В. Тарасов. – М.: Академкнига, 2003. – 327 с.
3. Karpel S. Metals Bull Mon. 2003. N 391. – p. 18–20.
4. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
5. Александровский С.В. Новые способы синтеза наноструктурных тугоплавких соединений на основе титана / С.В. Александровский, Ли Донг Вон // Цветные металлы. – 2005. – № 9. – С. 57–62
6. Взрывной синтез соединений в системах «бор-кремний» и «бор-магний» / В.П. Перминов, В.А. Неронов, В.И. Мали, Т.С. Тесленко, М.А. Корчагин, Н.С. Черняк, А.А. Панькова // Сб. матер. междунар. науч. конгр. ГЕО-Сибирь-2006, СГГА. – Новосибирск, 2006. – Т. 4 – С. 144–147.
7. Mali V. I. Possibility of increasing Magnesium – diboride output in explosive synthesis / V.I. Mali, V.A. Neronov, V.P. Perminov, M.A. Korchagin, T.S. Teslenco. V International Conference on Mechanochemistry and Mechanical Alloying, Novosibirsk. 2006, p.157–158.

© В.П. Перминов, 2007

ОТРАБОТКА НА ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ ИЗДЕЛИЙ, ОБРАБАТЫВАЕМЫХ НА СТАНКАХ С ЧПУ, КАК ЭЛЕМЕНТ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА

Многообразие деталей, изготавливаемых в машиностроении, предъявляет различные требования к технологичности, кроме того, есть некоторые особенности, характерные для деталей, обрабатываемых на станках с числовым программным управлением (ЧПУ). Данная статья не претендует на стопроцентное выявление всех компонентов технологичности, которые встречаются при обработке на обрабатывающих центрах (ОЦ).

Преимущества ОЦ могут быть максимально использованы, если при конструировании детали будут учтены вопросы ее технологичности применительно к этим станкам. Особенности технологичности связаны с возможностями станков, необходимостью сокращения основного и вспомогательного времени, обеспечения безопасности работы.

Кроме того повышение производительности оборудования и качества изделий при максимальном снижении затрат времени и средств на разработку, технологическую подготовку производства (ТПП) и обработку заготовок на станках с ЧПУ в значительной мере определяется технологичностью конструкции деталей.

Отработку на технологичность деталей необходимо выполнять на начальных стадиях технологической подготовки производства, что требует достойной технологической подготовки и знаний у инженеров-конструкторов.

Моделирование процесса обработки с использованием ЭВМ позволяет определить не только степень технологичности детали, но и возможность применения типовых и групповых технологических процессов. На этапе технологической подготовки производства все детали должны быть подвергнуты тщательному анализу (конструктивно-технологической проработке) в целях повышения степени конструктивной и технологической преемственности элементов детали. Решая эту задачу, можно определить полный перечень типоразмеров и выявить степень их применяемости, построить параметрические ряды, унифицировать детали. Это наиболее полно обеспечит преемственность технологических процессов и их элементов, средств технологического оснащения.

На этапе анализа детали выявляется также, насколько технологически рациональна ее конструкция. Эта задача заключается в нахождении возможности изготовления и эксплуатации данного изделия при использовании имеющихся в распоряжении предприятия материальных и трудовых ресурсов.

В целом задачи обеспечения технологичности конструкции решаются на всех этапах работ по постановке продукции на производство. Отработка изделия на технологичность начинается с систематизации аналогов и прогнозирования показателей технологичности. Эти данные являются исходными для определения базовых показателей, фиксируемых в техническом задании (ТЗ) на изделие. Затем следуют работы по стадиям проектирования,

которые в основном завершаются при подготовке конструкторской документации (КД) на опытный образец. В дальнейшем изменять документацию становится все труднее. На стадии ТПП приходится оформлять заявки на изменение КД, в процессе изготовления установочной серии – собирать замечания цехов, давать разрешения на отступления от КД и ТД (технологической документации), прорабатывать замечания и вносить предложения по изменениям на комиссию, разрабатывать мероприятия по результатам начала установившегося производства, планировать их выполнение и т. д.

Общие требования к технологичности деталей, обрабатываемых на станках с ЧПУ или намеченных к обработке на этих станках:

1. Высокие требования к качеству заготовок, особенно, если речь идет об отливках. Необходимо, чтобы разъем формы не проходил через базовые поверхности, а также, чтобы на них не было раковин, трещин, газовых и шлаковых включений. Обязательно должны выдерживаться припуски на механическую обработку, иначе потребуются изменения в программе обработки, или может возникнуть аварийная ситуация из-за поломки инструмента. Появление отбелов в отливках из чугуна, внутренних раковин, смещений также приводит к поломке инструмента и браку детали;

2. Унификация наружных и внутренних радиусов;

3. Унификация элементов форм деталей и их размеров;

4. Создание такой конфигурации детали, которая обеспечивает свободный доступ инструмента для обработки поверхностей;

5. Обеспечение возможности надежного и удобного базирования детали при обработке;

6. Конструкция детали должна обеспечивать минимальное число переустановок для ее полной обработки;

7. Необходимо предусматривать в детали ограничения, связанные с минимальными диаметрами гладких и резьбовых отверстий;

8. Не допускается пересечение отверстий, имеющих выход на литейные скосы и приливы. Это тем более важно, что в большинстве современных ОЦ не предусмотрено предохранение инструментов от поломок;

9. Глубина обработки должна соответствовать возможностям стандартного инструмента. Глухие резьбовые отверстия должны иметь достаточную глубину сверления для выхода заборной части метчика. В глухих высокоточных отверстиях обязательно указывать длину посадки;

10. Необходимо унифицировать обрабатываемые отверстия не только в одной детали, но и во всей группе, обрабатываемых по групповому ТП деталей, что позволяет сократить число и номенклатуру оснастки;

11. Выбранные базы должны обеспечить точность и стабильность установки детали, и поэтому к ним предъявляются особые требования к точности и жесткости. Аналогичные требования предъявляют к поверхностям, к которым приложено усилие зажима;

12. Радиусы фрезерования в окнах, карманах, занижениях следует, по возможности, увеличить, что повышает жесткость инструмента;

13. При наличии соосных отверстий в двух стенках корпусной детали, целесообразно конструкцию проектировать так, чтобы при расточке отношение длины «l» к диаметру «d» была не более 6;

14. При многопереходной обработке рационально вместо глухих отверстий и карманов для лучшего стружкоотделения проектировать деталь, предусмотрев в ней окна или сквозные отверстия;

15. Следует по возможности избегать наклонных (так называемых малкованных) стенок, а также имитации штамповочных уклонов;

16. Сопряжение стенок наружных и внутренних обрабатываемых контуров детали по возможности следует выполнять одинаковыми (типовыми для данного контура) радиусами.

Блок-схема основных составляющих отработки изделия на технологичность представлена на рис. 1.

Все эти требования направлены прежде всего на сокращение типоразмеров применяемого режущего инструмента, использование более производительного (экономически выгодного) инструмента, замену специального инструмента стандартным, уменьшение числа переустановок детали, снижение количества и стоимости требуемой оснастки, повышение точности базирования, а также точности и производительности обработки, уменьшение степени коробления детали при обработке и объема последующей слесарной (станочной) ручной доработки, сокращение затрат на расчет и подготовку программ.

Указанные требования, как правило, могут быть выполнены путем изменения геометрической формы и отдельных элементов детали, изменения некоторых размеров, смещения отдельных элементов и т. п.

При обработке детали на станках с ЧПУ (особенно на фрезерных) требуются строгая ориентация ее относительно осей координат станка и привязка к исходной точке траектории движения инструмента. Поэтому уже при анализе технологичности детали необходимо предусмотреть элементы для ее базирования. Если деталь не имеет конструктивных отверстий, которые могут быть использованы как базовые, то такие отверстия надо ввести, расположив их на максимальном удалении друг от друга. Можно ввести в конструкцию детали только одно отверстие, если имеется второе – конструктивное.

При невозможности выполнить технологические базовые отверстия в детали следует предусмотреть у заготовки специальные технологические приливы, в которых и разместить базовые отверстия.

При анализе шероховатости поверхностного слоя обработанной детали следует иметь в виду, что после обработки концевыми фрезами на горизонтальных поверхностях остаются заметные на глаз следы фрезерования. В большинстве случаев высота уступов и микронеровностей не превышает 0,01 – 0,05 мм.

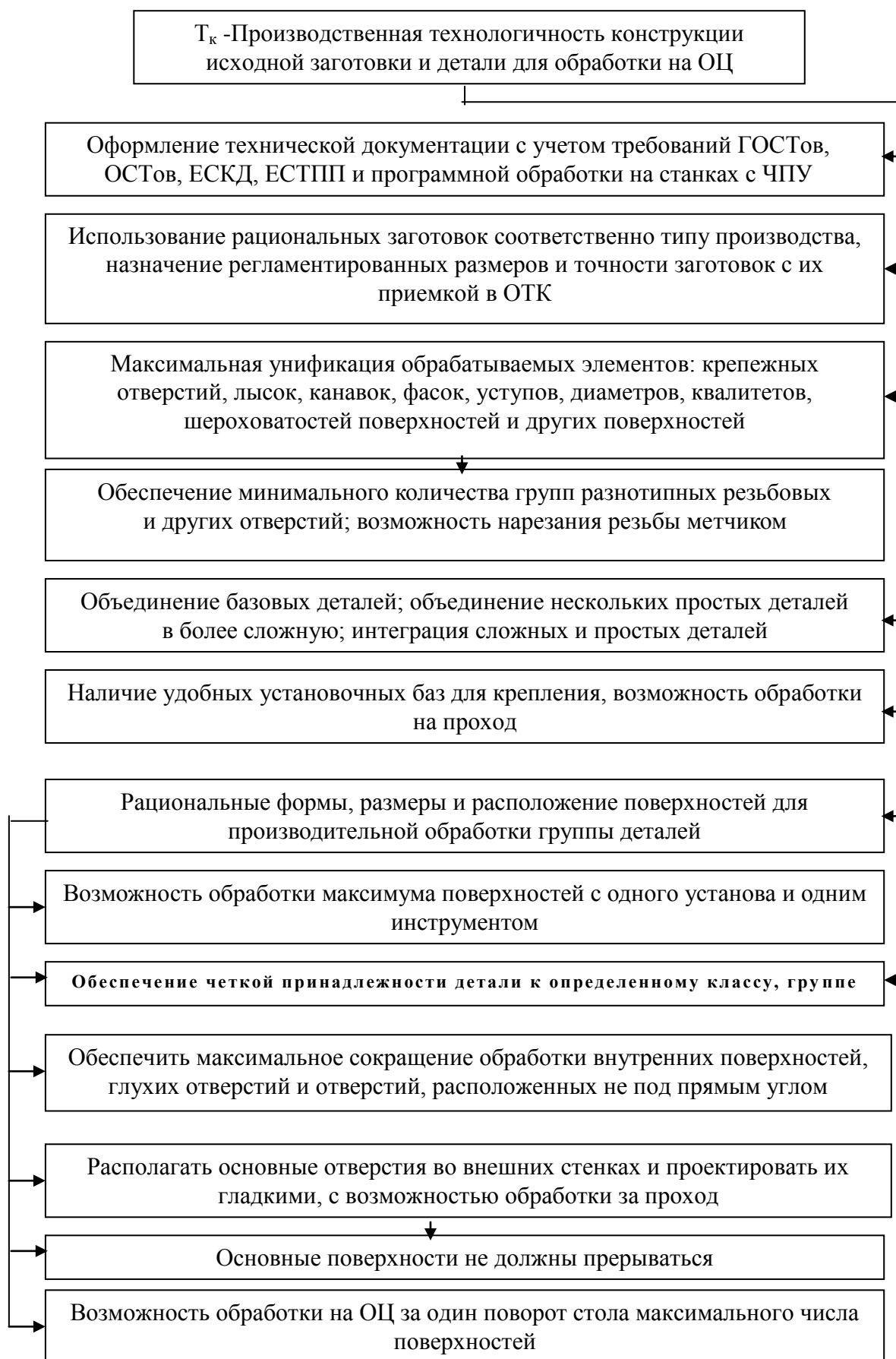


Рис. 1. Составляющие отработки изделия на технологичность

Определено, что лучше иметь такие неровности, чем риски от слесарной доработки поверхности абразивными кругами: микронеровности после фрезерной обработки как концентраторы напряжений менее опасны, чем риски. Поэтому по возможности при проектировании ТП слесарную доработку поверхностей, обработанных на станках с ЧПУ, вводить не следует.

Это сохранит поверхностный слой обработанной поверхности, который упрочнен наклоном при фрезеровании и имеет сравнительно хороший микрорельеф. К чертежам деталей, обрабатываемых на станках с ЧПУ, не предъявляют никаких требований, противоречащих стандартам ЕСКД на выполнение машиностроительных чертежей. Однако, необходима некоторая дополнительная информация о детали, в связи с чем следует выполнять ряд правил, облегчающих процесс программирования:

1. Все размеры проставляют на детали в прямоугольной системе координат от единых конструктивных баз детали;

2. Желательно также проставлять размеры от оси детали к центрам всех окружностей, если это не требует от конструктора дополнительных трудоемких вычислений;

3. Проставлять размеры следует так, чтобы данные о каждом контуре были по возможности по одной проекции, а размерные цепи имели двусторонний допуск ($\pm$), что облегчает разработку программ;

4. В случае, если контуры изделия заданы аналитически или таблицей координатных точек, в чертеже не должно быть ссылок на плаз. Вместо указаний «контур снять с плаза» следует писать «контур рассчитывать по данным теоретического чертежа, первую деталь сверлить с плазом»;

5. При закреплении деталь должна быть ориентирована так, чтобы расчетные координаты обрабатываемых поверхностей детали были связаны с координатной системой станка. Это сократит время введения базовых координат в систему ЧПУ;

6. Чертеж выполняют в масштабе, соблюдая его по всему полю чертежа;

7. На поле чертежа рекомендуется помещать надпись «изготавливать на станке с ЧПУ» или «контур фрезеровать на станке с ЧПУ»;

8. Для сложного профиля необходимо задавать координаты опорных точек дуг окружности. Если профиль отличается от окружности, необходимо давать координаты опорных точек с дискретностью, обеспечивающей выполнение профиля вписанными дугами окружности с помощью круговой интерполяции или прямыми с помощью линейной интерполяции.

Таким образом, комплексный анализ деталей перед обработкой на ОЦ позволяет найти оптимальные варианты механической обработки с обеспечением наибольшей производительности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гжиров Р.И. Программирование обработки на станках с ЧПУ: Справочник / Р.И. Гжиров, П.П. Серебrenицкий. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990. – 588 с.

© Б.Э. Шлишевский, Е.Ю. Кутенкова, 2007

О СУЩНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ВООБЩЕ И ТЕХНОЛОГИИ ОПТИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА В ЧАСТНОСТИ

Что, в сущности, представляет собой технология? Если технология – искусство, то каждый технолог – свободный художник и его творческая деятельность не укладывается в стандартные рамки единых правил. Если технология – наука, то мы вправе требовать научного объяснения технологических явлений. Согласно политехническому словарю, изданному в 1977 г. под редакцией академика И.И. Артоболевского [1], «технология», как понятие, произошло от греч. «*techne*» – *искусство*, мастерство, умение и «*logos*» – слово, учение. Исходя из данного толкования, видно, что технология, как понятие, содержит в себе и научную составляющую, и элементы искусства. Мы знаем многочисленные примеры оптиков, токарей, металлургов и т.п., обладающих высочайшим мастерством, которое проявляется не только в знаниях и опыте, но и в особом чутье, интуиции и неповторимом индивидуальном почерке. Наука, в отличие от искусства, стремится к максимально обобщённому объективному и коллективному знанию. Как сказал Виктор Гюго, «искусство – это я, наука – это мы». То, что научные знания присутствуют в технологии, сомнений нет. Тому доказательство многочисленные научные труды, научные школы и научные направления. Однако достаточно ли этого для того, чтобы называется наукой?

Пожалуй, будет интересно узнать, как определяли технологию те учёные, которые рассматривали её в качестве объекта изучения.

Ещё в 1804 году академик В.М. Севергин определил, что «технология – наука о ремёслах и заводах». В 1817 году его невольно поддержал профессор Московского университета И. Двигубский: «Технология есть наука, показывающая перерабатывание естественных произведений». А вот, что писал советский учёный Ю.М. Покровский о той ситуации, которая сложилась в 1850-х гг.: «Хотя общее состояние науки, в частности, физики, к середине прошлого века достигло уже высокого развития, однако наука о металле представляла всего два-три параграфа в разделе физики, посвящённом учению о твёрдых телах. А между тем ...рост общего машиностроения и массовое производство самих машин потребовали точного научного знания для оценки какого-либо свойства металла» [2].

Итак, технологию того времени уже считали наукой. Однако ей научность могла быть следствием тогдашнего представления о науке, т.е. иного, чем сейчас – другие требования, другой уровень, другие результаты. Например, наукой могли считать знания как таковые. В 1898 году в энциклопедическом словаре Ф.А. Брокгауза и И.А. Эфрона было, в частности, напечатано: «Технологическая наука есть вообще наука недавнего времени. Учила такой науке, или таким знаниям – в начале особенно, – сама жизнь и школа примера, привезённого из чужой страны. В Россию технические знания также принесены были иностранцами. Не было недостатка и в самостоятельных самородных

талантах; особенно много фактов свидетельствуют о способностях русских людей к механике. Знания технические распространялись путём примера и поучения» [3].

В тоже время сосуществовали иные точки зрения на научность технологии. В 1900 году американец Ф. Тэйлор, один из основателей технологии обработки резанием, назвал свою монографию *«Искусство резать металлы»*. И не случайно. В предисловии к изданию данного труда в России, в 1922 году, написано [4]: «Вопросы чисто научные сами по себе в глазах Тэйлора имели ... мало значения». Ко всякой теории... он скорее расположен был относиться недоверчиво и иногда несколько свысока,... поэтому он полагался, главным образом, на свой непосредственный опыт и иногда считал нужным проверку экспериментальным путём даже тех положений, которые принимались в технике за достаточно прочно установленные...». В 1940-х гг. профессор А.П. Соколовский писал о том, что [5]: «учение о технологии *должно стать наукой*» и что «учение о резании металлов *ещё не может быть названо наукой*». В 1955 г. А.Б. Яхин и В.П. Ефимов утверждали [6]: «Теоретические основы сборки в общем виде *ещё не созданы*». В 1962 г. профессор К.Г. Куманин делал вывод [7]: «Теоретические основы процессов механической обработки стекла, особенно для получения точных оптических поверхностей... *ещё не созданы*. Немногочисленные монографии по технологии изготовления оптических деталей носят описательный, почти рецептурный, характер». В специализированном журнале «Стружка» за май 2004 года, специалисты по вопросам технологического аудита высказываются ещё более категорично: «*в технологии металлообработки не_существует...«положений» и «законов»*. Наверное, *их никогда и не будет*»...

Данные цитаты и ряд последующих лишней раз подтверждают, что единого мнения в научном мире не бывает. И каждый прав по-своему. И взгляды могут со временем пересматриваться. В уже упоминаемом словаре Артоболевского И.И. [1] за 1977 год указано, в частности: «Технология – это...*наука* о способах воздействия на сырьё, материалы и полуфабрикаты соответствующими орудиями производств». Но самое красивое определение дал в 1990 г. на 1-м съезде технологов профессор Ю. Шнейдер: «Технология – это *наука о материализации идей*» [8].

Однако всё это были высказывания учёных. Небезынтересно узнать мнения тех, кто непосредственно занимался технологией. Известный в своё время токарь П. Быков, лауреат Сталинской премии, писал в 1950 году [9]: «Технолог никогда не сможет установить какие-то непреложные правила работы станочника. Если станочник сознательно, творчески относится к своему труду, он неизменно найдёт новые методы обработки, такие, какие технолог не учёл. А иногда просто не мог учесть». Очевидно, что технология зародилась из практики, и такая направленность сохраняется до сих пор. Как утверждал профессор А.П. Соколовский: «Учение о технологии родилось в цехе и не должно порывать с ним связи. В противном случае работа технолога станет академической и бесплодной» [5].

И всё же, как любая разумная деятельность, технология стремится к научному самоопределению. Вот что писал в 1936 году П.И. Ивашкевич, автор учебника по проектированию приспособлений [10]: «Ничего нельзя возразить против обмена опытом, но постоянное подражание образцам обрекает на вечное ученичество. Надо этому противопоставить развитие «методов», выяснение «законов»». Словно включаясь в тему обсуждения, в 1930 году, француз Дэве высказался так [11]: «Могут возразить, что теоретические знания для рабочих-оптиков и учеников являются излишними. Несомненно, что по крайней мере во Франции до сих пор обходились без обучения подобного рода, и тем не менее там имеются мастера-оптики, обладающие умением и навыками, которых нельзя извлечь из книг... Но понимают ли они сущность применяемых ими приёмов? Отличают ли они существенное от безразличного в практике их мастерской, и если у них потребовать изготовления изделий, давно или даже никогда ими не изготавливавшихся, как смогут они разработать технологический процесс, если не знают законов, лежащих в основе их обычных приёмов? ... не знают того, что можно было бы назвать *философией* ремесла». Примечательно, что здесь технология возвышена до высот философии!

Примерно в то же время, в 1931 году, профессор А.П. Афанасьев тоже высказывался по этому вопросу [12]: «На каждом предприятии существует несколько высококвалифицированных рабочих, приобретших путём долголетней практики определённые навыки в работе, которые они ревниво охраняют и не передают другим. Такие рабочие зачастую переманиваются с одного предприятия на другое, и состояние качества продукции данного предприятия обуславливается именно наличием таких рабочих. Только весьма немногие предприятия, как, например, фирма Цейсса в Иене, несомненно имеют технологически разработанные инструкции в области оптической обработки стекла... Однако, эти инструкции не публикуются и остаются в недрах данного предприятия. ... При рождении оптической промышленности у нас ещё в довоенное время было выписано несколько иностранных рабочих, от которых и пошли те немногочисленные кадры рабочих-оптиков..., которые... переняли от своих учителей не только технические навыки, но и не охоту передавать свои навыки другим.... В настоящее время... имеются уже немало работников, стремящихся поделиться своими знаниями с другими товарищами. К сожалению, весьма немногие из них делают это в письменной форме, отчасти по причине недостатка времени, а иногда и вследствие отсутствия необходимых навыков в изложении своих мыслей».

Со всем, что процитировано, трудно не согласиться. Очевидно, что в технологии научные знания нужны, и они есть! Вопрос в том, достаточно ли этих знаний, чтобы считать технологию наукой? Ведь технология, прежде всего, является практической деятельностью, в которой активную роль играют *ненаучные* элементы. Приведу соответствующие цитаты. Из книги инженера-технолога и преподавателя Харьковского технологического института В. Кнаббе за 1892 год [13]: «...в противность логики и в силу чисто случайных обстоятельств, прежде всего, получила развитие более сложная фасонная фреза,

между тем как фреза простейшей формы (гладкая цилиндрическая) долгое ещё время оставалась без употребления, вследствие неумения употреблять её рационально». Из руководства по обработке оптических поверхностей за 1932 год [12]: «Практически совет при шлифовке 30-минутником ещё сводится к тому, чтобы не подбрызгивать кисточкой, которой можно подбрызгнуть нечаянно много воды, а слегка подплёвывать». И далее: «Чтобы отшлифовать 30-минутником и не поцарапать, надо не подбрызгивать или подплёвывать на высыхающий наждак, а просто дышать на шлифовальник: испарений будет достаточно, чтобы увлажнить наждак». Из руководства по обработке точных оптических стёкол за 1934 год [11]: «Рабочие оптики имеют обыкновение протирать свои стёкла кожей локтевой части руки, но при этом нужно, чтобы кожа не была влажной». Из книги «Микрогеометрия обработанной металлической поверхности и её измерение» за 1948 год [14]: «Сопоставление (обработанной поверхности с эталонной – П.П.) лучше всего производить, проводя по поверхности изделия в нужном направлении пальцем, а ещё лучше – ногтём. В тех случаях, когда требуется проверить внутреннюю поверхность... труднодоступных мест, оценка производится проведением по поверхности концом проволоки, удерживаемой пальцами или зубами».

По утверждению профессора А.П. Соколовского, в ходе становления технологии, как науки «вскрываются многие секреты, которыми обычно владеют лишь квалифицированные практики». Но, согласитесь, как можно, например, научно описать подплёвывание или удержание проволоки зубами?

Есть ещё один важный момент: технология, помимо прочего, может рассматриваться и как ремесло. В словаре Артоболевского И.И. [1] понятие «технология» определено не только как искусство и учение, но и как *умение*. А умение – это характеристика ремесла. «Ремесло» и «ремесленный», в одном из значений по словарю Ожегова С.И., понимаются как ручной труд по шаблону, без творческой инициативы. И действительно, практика показывает, что шаблонное соблюдение технологических приёмов широко распространено. Технология, как ремесло, в принципе, удел любого человека, поскольку это (согласно словарю В. Даля) «занятие, коим человек живёт, промысел его, требующий более телесного, чем умственного труда». Однако, по словам профессора А.П. Соколовского [5]: «Даже в условиях установившегося процесса инженер не может работать по шаблону. Его внимание по необходимости привлечено не к тем участкам производства, на которых оно течёт бесперебойно, а к тем, где возникают затруднения». Просто талантливому инженеру это под силу, а ремесленнику – нет.

Что касается соотношения искусства и ремесла в технологии, то это не так важно. Важнее утверждение, что любая технология выступает в начале искусством, а затем подкрепляется научными обобщениями и становится ремеслом, после проверенных временем технологических приёмов, стабильно приводящих к известному результату. В связи с научно-техническим прогрессом и творческим преобразованием действительности возможны радикальные изменения в устоявшейся технологии, и тогда цикл повторяется...

Перейдём к основным выводам.

1. Технология, прежде всего, является практической деятельностью, в которой активную роль, особенно на начальной стадии становления, играют ненаучные элементы и элементы искусства, которые со временем перерастают в ремесло.

2. Любая технология стремится к научному самоопределению для обеспечения тех же практических целей – стабильности производства и малой зависимости от конкретного человека. Технология оптического производства стала «примерять научные одежды» в 30-40-е годы XX века, делает это до сих пор, и будет постоянно заниматься этим в будущем.

3. Научные достижения предполагают доступность для обсуждения, а технологические секреты требуют утаивания, и потому существует проблема сознательных технологических тайн, что до сих пор служит препятствием для широкого внедрения и научного определения новых технологий.

4. Технология всегда образуется и развивается в определённой окружающей среде, представленной другими областями знания. В свою очередь, научные и практические знания, порождаемые конкретной технологией, влияют на окружающую среду, дополняя и развивая её. Технология – это не наука, не искусство и не ремесло. Она может быть и наукой, и искусством, и ремеслом, в зависимости от стадии её развития и в отношении конкретной технологической задачи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Политехнический словарь / Под ред. И.И. Артоболевского. – М.: Сов. энциклопедия, 1977.
2. Покровский Ю.М. Очерки по истории металлургии / Ю.М. Покровский; ОНТИ. – М.; Л., 1936.
3. Россия: Энциклопедический словарь. – Л.: Лениздат, 1991.
4. Тэйлор Ф. Искусство резать металлы / Ф. Тейлор; пер. с англ. А.В. Панкина, Л.А. Левенстерна. Бюро иностранной науки и техники. – Берлин, 1922.
5. Соколовский А.П. Курс технологии машиностроения. Ч. 1. Общие вопросы технологии механической обработки: учебник для втузов / А.П. Соколовский; М.; Л., 1947.
6. Яхин А.Б. Технология приборостроения. Оборонгиз / А.Б. Яхин, В.П. Ефремов – М., 1955.
7. Формообразование оптических поверхностей: сб. статей / под ред. проф. К.Г. Куманина. – М.: Оборонгиз, 1962.
8. Кадры приборостроению. – Л.: ЛИТМО. – 1991. – № 9.
9. Быков П. Путь к счастью / П. Быков. – М.: Профиздат, 1951.
10. Ивашкевич, П.И. Методика проектирования приспособлений: учеб. пособие для вузов/ П.И. Ивашкевич; ОНТИ-НКТП. – Л.; М., 1936.
11. Дэве К. Руководство по обработке точных оптических стёкол / К. Дэве; пер. с франц. П.Д. Радченко; под ред. проф. В.П. Линника. – Л.; М.: ОНТИ-НКТП, 1934.
12. Осипов В.А. Руководство по обработке оптических поверхностей / В.А. Осипов; под ред. проф. А.П. Афанасьева. Ред. изд. отдел ВООМП. – Л., 1932.
13. Кнаббе В. Фреза и её роль в современном машиностроении / В. Кнаббе. – Харьков, 1892.
14. Барун В.А. Микрогеометрия обработанной металлической поверхности и её измерения / В.А. Барун. – М.; Л.: Машгиз, 1948.

ИЗМЕРЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ КОНСТАНТ ТОНКИХ ПЛЁНОК ПОЛИМЕТИНОВЫХ КРАСИТЕЛЕЙ МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ В БЛИЖНЕЙ ИК-ОБЛАСТИ

Введение

Тонкие пленки широко используются в области электроники, полупроводниковой технике, лазерной и нелинейной оптике и оптоэлектронике. В частности, тонкие органические пленки проявляют свойства кубической нелинейной восприимчивости, под действием интенсивного лазерного излучения [1, 2, 9].

Для характеристики плёнок путем определения толщины плёнок, фундаментальных оптических постоянных: показателя преломления и коэффициента поглощения используют метод эллипсометрии.

Метод эллипсометрии имеет ряд преимуществ перед другими способами, обусловленных простотой подготовки образцов, широтой охвата исследуемых материалов, не разрушающим и не возмущающим характером измерений [1, 3].

Целью исследований является измерение оптических констант тонких плёнок полиметиновых красителей методом спектральной эллипсометрии в ближней ИК-области.

Актуальность данных исследований связана с использованием тонких пленок органических красителей обладающих нелинейными свойствами в резонансных условиях для нелинейного преобразования оптических сигналов в системах оптической передачи информации [2]. Поскольку современные системы волоконно-оптической связи работают именно в ближней ИК-области, то исследование оптических характеристик красителей такого типа является особенно необходимым [8].

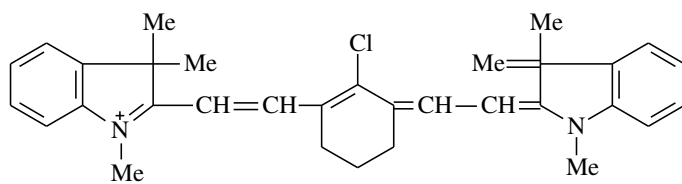
Предмет исследований

Среди органических красителей полиметиновые красители обладают наиболее интенсивным поглощением, а в ряду полиметиновых красителей тиофлавилиевые красители обладают интенсивным поглощением в ближней ИК-области. Хромофомная система полиметиновых красителей характеризуется наличием цепочки сопряжённых двойных связей, состоящей из свободных или замещённых метиновых групп, с электронодонорными или электроноакцепторными заместителями по концам [7].

Для исследования были выбраны два полиметиновых красителя И1 и DT1, у которых ранее была выявлена хорошая способность к пленкообразованию и максимальное значение коэффициента поглощения в ближней ИК-области.

Краситель И1 хорошо растворим в дихлорэтано. Максимум поглощения в растворе находится на длине волны 790 нм.

Краситель DT1 хорошо растворим в хлороформе. Максимум поглощения в растворе находится на длине волны 805 нм.



(Г)

Рис. 1. Полиметиновый краситель И1:
2-[2-хлоро-3-(1,3,3-триметил-1,3-дигидроиндол-2-илиденеметил)-циклогекс-2-енилиденеметил]-1,3,3-триметил-1-Н-индолиум

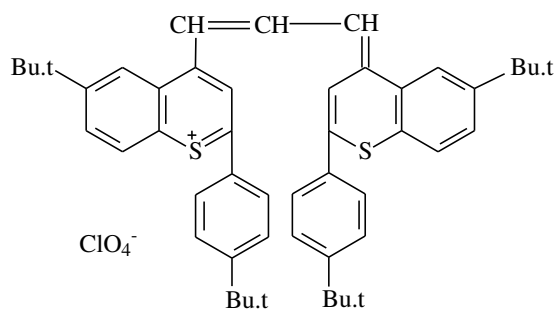


Рис. 2. Полиметиновый краситель DT1: перхлорат 2-(n-трет-бутилфенил)-4-{3-[2-(n-трет-бутилфенил)-6-трет-бутил-1-бензотио-пиранилиден-4]-1-пропенил}-6-трет-бутил-1-бензотиопирилия

Данные красители синтезированы в Новосибирском Институте Органической Химии СО РАН к.х.н. Орловой Натальей Алексеевной.

Пленки наносились методом центрифугирования растворов красителей (скорость вращения 1 500 об/мин) на стеклянные очищенные подложки размером 25*25 мм.

Метод исследований

Для исследования свойств тонких пленок полиметиновых красителей был использован спектральный эллипсометр, разработанный в ИФП СО РАН. Эллипсометр создан на основе статической измерительной схемы. Внешний вид эллипсометра и его основные узлы изображены на рис. 3.

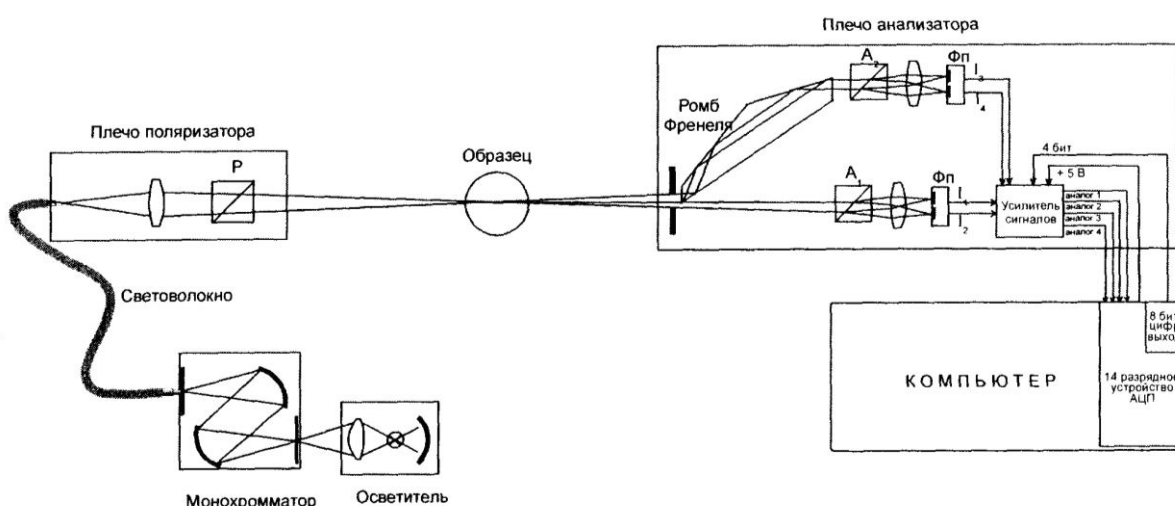


Рис. 3. Структурно-оптическая схема спектрального эллипсометра

Принцип работы прибора: излучение лампы осветителя ДКсШ-120 фокусируется на входную щель монохроматора Jobin-Yvon-НС-1 (спектральный диапазон 500–1 600 нм) для сканирования по длине волны света. Через световолокно монохроматическое излучение заводится в плечо поляризатора,

где световой пучок приобретает линейную поляризацию, при прохождении призмы Глана-Фуко с воздушным промежутком [4]. Поляризованное излучение под определенным углом падает на поверхность исследуемой пленки. Отраженное эллиптически поляризованное излучение попадает в плечо анализатора, где с помощью ромба Френеля [4] разделяется на два пространственно разнесенных канала. Ромб Френеля вносит фазовый сдвиг 90° , работая в качестве компенсатора. Световой пучок, прошедший мимо ромба Френеля расщепляется призмой Волластона A_1 [4] на два ортогонально поляризованных пучка, которые фокусируются линзой на две фоточувствительных площадки фотоприемника $\Phi\Pi_1$. Второй пучок, расщепляется призмой Волластона A_2 на две ортогонально поляризованные компоненты, которые также фокусируются линзой на фотоприемник $\Phi\Pi_2$. Усиленные сигналы поступают в устройство аналогово-цифровой обработки сигналов: По измеренным величинам интенсивностей I_1 , I_2 , I_3 и I_4 в компьютере вычисляются эллипсометрические параметры образца.

Измерение оптических констант и толщин пленок красителей И1 и ДТ1

При нанесении пленок методом центрифугирования растворов с различной концентрацией красителя возможно образование различных агрегированных состояний красителя, которые могут влиять на оптические характеристики пленки. В этом случае можно ожидать изменение значений n_λ и k_λ при изменении исходной концентрации красителя и появления нелинейной зависимости между оптической плотностью пленки в максимуме поглощения красителя и ее толщиной, т. е. должно наблюдаться нарушение закона Бугера – Ламберта – Бера. В противном случае, если структура пленки не зависит от начальной концентрации красителя, должна наблюдаться линейная зависимость между оптической плотностью и толщиной пленки и постоянство значений n_λ и k_λ в не зависимости от концентрации красителя [6, 4].

Для проверки возможного отклонения от закона Бугера – Ламберта – Бера при пленкообразовании красителя в эксперименте использовались растворы красителей различной концентрации от 0,0025 до 0,02 М/л. По полученным данным построены графики зависимости эллипсометрически измеренной толщины пленки и максимальных значений n_λ и k_λ от спектрофотометрически измеренной оптической плотности пленки в максимуме поглощения красителя. Они приведены для красителей И1 и ДТ1 на рис. 4. Рассчитанное среднее значение максимального показателя преломления для красителя И1 равно 3,26 и максимального коэффициента поглощения равно 1,52 для красителя ДТ1 2,49 и 1.07 соответственно.

Дисперсии n_λ и k_λ и спектр оптической плотности D для пленки красителя И1 толщиной 22 нм и для пленки красителя ДТ1 толщиной 9 нм представлены на рис. 5.

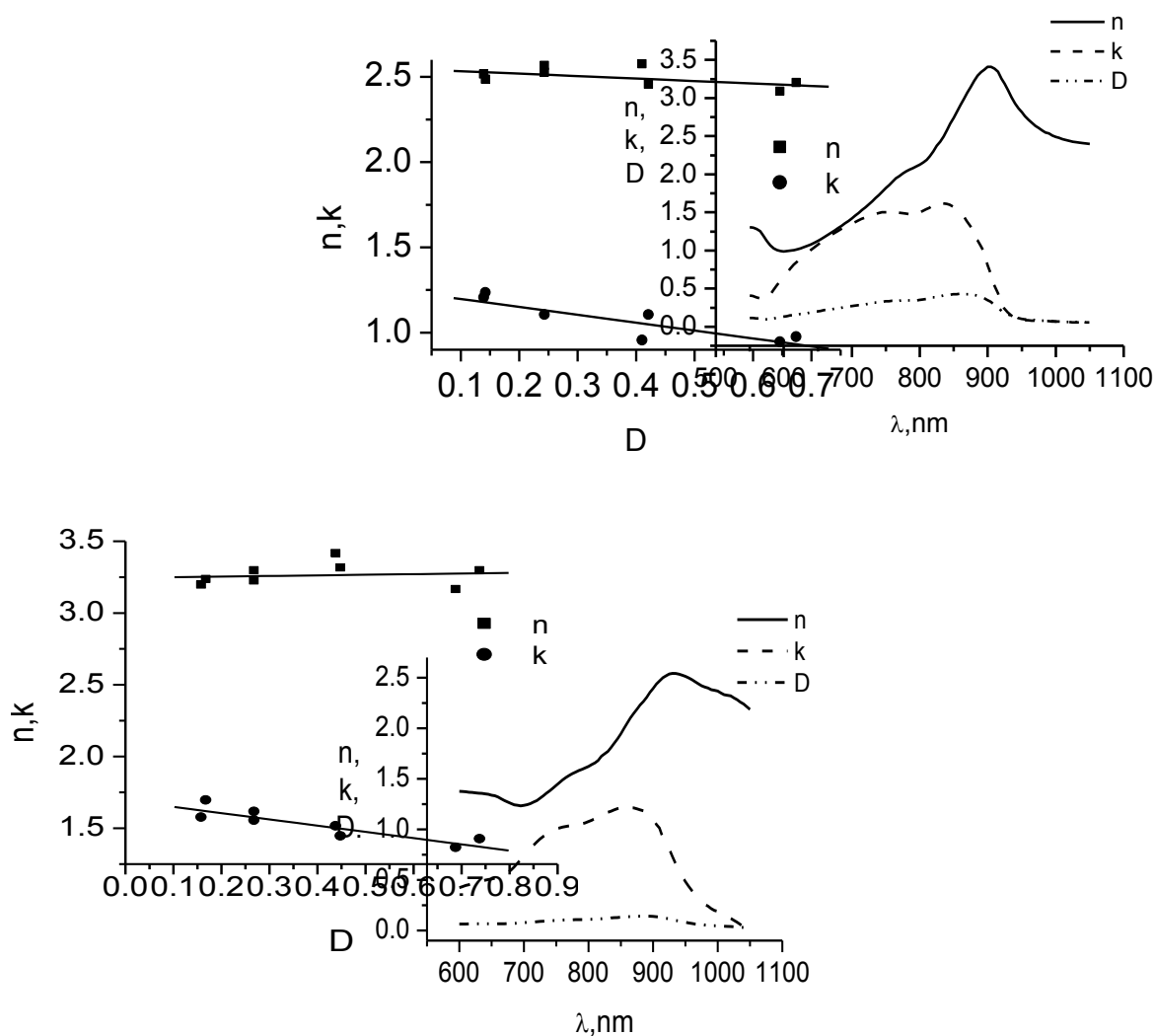


Рис. 5. Дисперсии n_λ и k_λ и спектр оптической плотности D для пленки красителя И1 толщиной 22 нм (слева) и красителя ДТ1 толщиной 9 нм (справа)

Основные результаты

Как видно из приведенных зависимостей $n(D)$, $k(D)$ изменение концентрации красителя не влияет на значения показателя преломления и поглощения исследованных пленок красителей, а зависимость между толщиной пленки и оптической плотностью пленки является линейной, в соответствии с законом Бугера – Ламберта – Бера. То есть при центрифугировании растворов красителей в исследованном диапазоне концентраций не наблюдается формирования агрегированных состояний красителя, которые могут повлиять на характеристики пленки, и закон Бугера – Ламберта – Бера не нарушается.

Из сопоставления рассчитанных дисперсий n_λ и k_λ для красителей И1 и ДТ1 (рис. 4, 5) видно, что максимальное значение показателя преломления красителя И1 (3,26) и коэффициента поглощения (1,55) больше, чем для пленки красителя ДТ1 (2,49) и (1,07) соответственно. Это означает, что поляризуемость красителя И1 в условиях возбуждения близких к оптическому резонансу больше, чем для красителя ДТ1 и для него можно ожидать больших значений нелинейной кубической восприимчивости, по сравнению с пленками красителя ДТ1. В

целом обе пленки обладают высоким значением показателя преломления в области генерации первой гармоники импульсного Nd-YAG лазера (1064 нм) и могут служить основой для создания органических нелинейных волноводных структур в ближней ИК-области.

Заключение

Получены следующие результаты.

1. Методом центрифугирования растворов красителей получен ряд экспериментальных образцов тонких пленок двух полиметиновых красителей И1 и ДТ1 различной концентрации на стеклянных подложках.

2. Методом спектральной эллипсометрии проведены измерения дисперсий показателя преломления n_λ и k_λ коэффициента поглощения тонких пленок красителей И1 и ДТ1 в диапазоне длин волн от 550 до 1050 нм. Максимальные значения n и k для красителя И1 составляют 3,26 и 1,55, а для красителя ДТ1 2,49 и 1,07 соответственно.

3. Измерены значения толщины, показателя преломления и коэффициента поглощения пленок полиметиновых красителей И1 и ДТ1 для различной исходной концентрации красителя в растворе и показано линейное соотношение между толщиной и оптической плотностью образцов, постоянство значений n и k . Соблюдение закона Ламберта-Бера в пленочном образце в данном диапазоне концентраций указывает на отсутствие агрегатных состояний красителей в пленке по мере возрастания концентрации красителя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Азаам Р., Башара. Н. Эллипсометрия и поляризованный свет: пер. с англ. – М.: Мир» 1981.
2. Гиббс Х. Оптическая бистабильность. Управление светом с помощью света: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988.
3. Громов В.К. Введение в эллипсометрию. – Л.: Издательство Ленингр. Ун-та, 1986.
4. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Наука, 1976.
5. Метфессель С. Тонкие пленки, их изготовление и измерение. М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963.
6. Снопко В.Н. Поляризационные характеристики оптического излучения и методы их измерения. – Минск : Навука і тэхніка, 1992.
7. Степанов Б.И. Введение в химию и технологию органических красителей. – М.: Химия, 1971.
8. Стерлинг Дональд Дж. Техническое руководство по волоконной оптике. – М.: Лори, 1998.
9. Эллипсометрия: теория, методы, приложения. – Новосибирск: Наука, 1987.

© Т.В. Романова, В.В. Шелковников, 2007

БЕЗВОЛЬФРАМОВЫЕ ТВЕРДЫЕ СПЛАВЫ И ПЕРСПЕКТИВА ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ОПТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Безвольфрамовые твердые сплавы появились на рынке впервые в последней трети прошлого века, как альтернатива твердым сплавам на основе карбида вольфрама.

Вольфрамосодержащие твердые сплавы при обработке конструкционных материалов – черных и цветных металлов и их сплавов, за счет высокой износоустойчивости и режущих свойств, повысили производительность в металлообработке более чем в 2,8 раза.

Но вольфрам дефицитный стратегический материал. И начавшие первые работы по исследованию возможности замены дефицитного вольфрама альтернативным материалом, ученые из Японии главной задачей ставили замену вольфрама титаном, а связующую фракцию кобальт – заменить на никель-молибден. После множества вариантов и комбинаций «право на жизнь» получил первоначально задуманный вариант.

В настоящее время в Японии, которая ранее других стран начала эту работу, до 30 % конструкционных материалов срезается безвольфрамовыми твердыми сплавами, она лидер в этой области, на много опередившая остальные страны.

В СССР и России работы по созданию БВТС (их за рубежом называют «Керметами», а также «Металлокерамикой») начались несколько позже. Получены позитивные результаты, которые будут освещены ниже.

Металлокерамические режущие материалы состоят из металлических и керамических компонентов. При этом имеются в виду керамические тугоплавкие соединения – нитриды, карбонитриды и карбиды, внедренные в металлическую связывающую фазу (никель+молибден). Металлокерамические режущие материалы отличаются от твердых сплавов тем, что они наряду с известными карбидами вольфрама (WC), титана (TiC) и тантала (TaC) всегда содержат азотосодержащие тугоплавкие соединения, например, нитрид титана (TiN).

В настоящее время металлокерамика состоит в основном из сплавов «карбонитрид титана – никель-молибден», которые по различным своим параметрам, таким как содержание никеля, большой доли Ti (CN), и других тугоплавких соединений (TaC, Nb, C, WC), цирконий (Zr), бор (B), гафний (Hf), ниобий (Nb), кобальт (K), а так же соотношению C/N оптимизированы для определенной возможности применения. Металлокерамика имеет исключительную стойкость к изнашиванию. БВТС на порядок меньше подвержены износу при трении и менее склонны к диффузии, чем твердые сплавы. Высокая устойчивость металлокерамики к изнашиванию при трении в значительной степени определяется носителями твердости TiC и TiN. Компонент TiN снижает износ металлокерамики при трении и адгезию (приваривание) стружки к режущей пластине. На устойчивость к изменению

температуры, что весьма важно при фрезеровании, положительно влияет, например, легирование добавками TaC.

У металлокерамики при температуре 900 °С сопротивление на разрыв при изгибе примерно такое же, как у твердых сплавов, но их твердость при нагреве до этой температуры значительно выше.

Наиболее часто металлокерамика применяется для изготовления инструментов – поворотных многогранных и др. режущих пластин, используемых в металлообработке.

Ее получают, так же как и твердые сплавы и (белый) металлокерамический режущий материал, методом порошковой металлургии. Спекание протекает в вакууме при атмосфере защитного газа при температуре 1 350–1 500 °С. При этом происходит расплавление связывающей фазы и частичное растворение тугоплавкого вещества в расплаве металла. Ассортимент режущих пластин достаточно широк, при необходимости их оформляют со стружколомающими канавками и упрочняющим покрытием Al_2O_3 .

Трудности технологического процесса заключается в основном не в осуществлении самого процесса получения методом порошковой металлургии, а в подборе легирующих элементов, часть которых перечислена ранее, и в создании исходных компонентов с субмикронной величиной зерна. Применение вакуумных процессов при изготовлении порошков и спекании обеспечивает получение сплавов с плотной структурой и стабильным качеством.

Вольфрамосодержащие твердые сплавы, в отличие от БВТС, при высоких скоростях резания подвержены интенсивному износу по передней и задней поверхностям, могут образоваться лунки, что отрицательно влияет на шероховатость обработанной поверхности, к тому же допускают образование заусенцев. Нитрид титана из-за повышенной химической инертности в значительно меньшей степени подвержен указанным видам износа, благодаря чему улучшается микрорельеф поверхности.

Высокая устойчивость металлокерамики к твердости в значительной степени определяется носителями твердости TiC и TiN. Компонент TiN снижает износ металлокерамики при трении и адгезию (приваривание) стружки к режущей пластине. На устойчивость к изменению температуры, что весьма важно при фрезеровании, положительно влияет, например, легирование добавками TaC.

Заметим, что у металлокерамики при температуре 900 °С сопротивление на разрыв при изгибе примерно такое же, как у твердых сплавов, но их твердость при нагреве до этой температуры значительно выше.

В настоящее время БВТС состоят в основном из сплавов «карбонитрид титана – никель», которые по различным своим параметрам, таким как содержание никеля, большой доли Ti (CN), и других тугоплавких соединений (TaC, Nb, C, WC), цирконий (Zr), бор (B), гафний (Hf), ниобий (Nb), кобальт (K), а так же соотношению C/N оптимизированы для определенной возможности применения.

Металлокерамика в основном используется для изготовления инструмента: поворотных многогранных и др. режущих пластин. Ее получают, так же как и

твердые сплавы и (белый) металлокерамический режущий материал, методом порошковой металлургии. Спекание протекает в вакууме при атмосфере защитного газа при температуре 1350–1500°C. При этом происходят расплавление связывающей фазы и частичное растворение тугоплавкого вещества в расплаве металла.

Трудности технологического процесса заключается в основном не в осуществлении самого процесса получения методом порошковой металлургии, а в подборе легирующих элементов, часть которых перечислена ранее, и в создании исходных компонентов с субмикронной величиной зерна.

Вольфрамовые твердые сплавы на основе карбидов вольфрама, в отличие от БВТС, при высоких скоростях резания подвержены интенсивному износу по передней и задней поверхностям, что отрицательно влияет на шероховатость обработанной поверхности. Нитрид титана из-за повышенной химической инертности в значительно меньшей степени подвержен указанным видам износа, что обеспечивает повышение качества поверхности. Можно отметить, в целом, что при прочих равных условиях, металлокерамика обеспечивает лучшее, более высокое качество обработанной поверхности.

При использовании резцов, оснащенных БВТС, разница между теоретическими и реальными значениями шероховатости поверхности проявляется при подачах меньше 0,15 мм/об. В условиях точения БВТС обеспечивают меньшую шероховатость, чем твердосплавные режущие пластины с износостойким покрытием.

Ниже приводится состав БВТС и характеристики выпускаемых марок этого материала.

Таблица. Безвольфрамовые твердые сплавы

Марка сплава	Состав		Физико-механические свойства			Величина основной массы зерна, мкм
	Тугоплавкая составляющая	Связка	HRA	HV, МПа	сизг., МПа	
ТН20	TiC	Ni-Mo	91	12500	1050	1-2
ТН50	TiC	Ni-Mo	86,5	12800	1250	-
КТН16	TiCN	Ni-Mo	89,5	10700	1200	1,2–1,8
ЛКЦ20	TiCN	Ni-Mo-Zr	88	12200	1270	-
ТВ4	TiCN	Ni-Mo-W	89	12240	1300	-

Если сравнить механические характеристики вольфрамовых и безвольфрамовых твердых сплавов, то, как видно из табл. 1 и ранее изложенного в статье, видно, что они различаются, не очень значительно, чего нельзя сказать о химических свойствах и составе.

Металлокерамика в широком спектре, по международным стандартам, может заменять вольфрамовые твердые сплавы, без ущерба для качества обработки заготовок и производительности практически по всем группам применения P1...P5...P10...P20...P30. Следовательно, заменить на минералокерамику самые распространенные режущие материалы титано-

кобальтовой группы T15K6, T30K4 и многие другие, (например, BK8), для обработки чугуна (особенно фрезерованием), цветных металлов и их сплавов.

При легировании БВТС 4-мя процентами вольфрама минералокерамикой можно обрабатывать материалы группы K10...K20 (по стандартам J 50). Этим же сплавом можно выполнять черновую обработку всех материалов, входящих в группу P и K, и частично – в группу M.

Важной проблемой при обработке вязких материалов является обеспечение удовлетворительного стружкодробления, особенно при подачах 0,07 мм/об и глубинах резания менее 0,13 мм, а также при черновой обработке с подачами от 0,4 до 3 мм/об. Для обеспечения устойчивого дробления стружки, промышленно выпускаемые режущие пластины из БВТС для токарной обработки имеют на передних поверхностях отпрессованные стружколомающие элементы соответствующей формы, как у вольфрамовых твердых сплавов.

Для обработки канавок и резьб необходимы износостойкие инструменты с высокопрочной режущей кромкой. БВТС по своим свойствам вполне соответствуют условиям указанных операций, которые выполняются, как правило, с достаточно высокими скоростями резания и малыми сечениями срезаемого слоя.

При обработке канавок БВТС рекомендуется скорость резания на 20 % ниже, чем при чистовом точении того же материала, а подача – от 0,05 до 0,15 мм/об. При нарезании резьбы резцом из БВТС скорость составляет примерно 60 % скорости чистового точения. При обработке канавок и резьб рекомендуется использовать СОЖ, что позволяет увеличить стойкость инструмента и снизить шероховатость обработанной поверхности.

Основным отличием процесса фрезерования от процесса точения является переменный характер механической и тепловой нагрузок на режущую кромку. В этих условиях инструментальный материал должен обладать достаточной термоусталостной и механической прочностью. Проведены стойкостные испытания концевых фрез, оснащенных твердосплавными пластинами с трехслойным покрытием (TiC-TiC/N-TiN) и пластинами из БВТС ЛКЦ-20 в условиях контурного фрезерования литых заготовок из стали твердостью 33...36 HRC. Производительность обработки фрезами, оснащенными пластинами ЛКЦ-20, выше твердых сплавов в 2,4 раза за счет более высокой скорости резания, допускаемой металлокерамикой, при равных подачах и глубине резания.

Теоретически шероховатость обработанной поверхности зависит только от радиуса при вершине инструмента и подачи. Однако на практике большое влияние на шероховатость поверхности оказывают обрабатываемость материала, скорость резания, свойства применяемой СОЖ и степень химической инертности инструментального материала. Одной из причин, увеличивающей шероховатость обработанной поверхности, является адгезийное наростообразование стружки, которое при обработке вольфрамосодержащим твердым сплавом при скоростях резания менее 30–40 м/мин, на передней поверхности резца образует адгезийный нарост стружки. Нарост резко ухудшает качество поверхности. При обработке БВТС наростообразование не происходит.

Основными областями применения БВТС в оптическом производстве являются операции чернового, получистового и чистового точения, фрезерование, прорезки канавок, нарезания резьбы, чистовая обработка компактных теплоемких корпусных деталей с развитыми поверхностями, вписываемых в куб со стороной 150 мм, контурная чистовая обработка за один проход рациональных заготовок; изготовление колец, втулок, в том числе ступенчатых корпусов-труб, тубусов и других аналогичных деталей; на высоких скоростях, за один проход окончательно с высоким качеством поверхности, то есть находит широкое применение.

Такое широко возможное (и практически реализуемое) применение инструмента из металлокерамики, связано с его высокими механическими другими физическими и химическими свойствами: высокой твердостью и износостойкостью, антиадгезийностью, теплостойкостью, температурной стабильностью, устойчивостью к изнашиванию и окислению, высокой режущей способностью, вязкостью, на уровне твердых сплавов, малым коэффициентом трения с металлами, низкой плотностью, стойкостью к окислению.

Рассмотрим кратко наиболее эффективные области применения выпускаемых в РФ БВТС по Европейским стандартам ISO.

Марка сплава:

Сплав ТН-20 (P01-P05)

Область применения инструмента:

Чистовое точение и фрезерование углеродистой и низколегированной стали и, в отдельных случаях, серого чугуна. Высокая скорость резания при небольших подаче и глубине резания. Повышенная износостойкость и малое адгезионное взаимодействие с обрабатываемым металлом.

Сплав КТН-16 (P10-P15)

Получистовое точение и фрезерование стали. Средние скорости резания и подачи. Изготовление калибров и другого измерительного инструмента.

Сплав ЛКЦ-20 (P15-P20)

Получистовое и черновое точение и фрезерование стали с умеренными нагрузками. Повышенная прочность по сравнению с КТН-16 позволяет работать с увеличенным сечением среза при средних скоростях резания.

Сплав ТВ4 (P20-P30)

Черновое точение и фрезерование стали с умеренной скоростью резания и увеличенным сечением среза. Неблагоприятные условия. Повышенная жаропрочность режущей кромки.

БВТС имеют более низкий модуль упругости, теплопроводности и ударную вязкость, то есть более чувствительны к ударным тепловым нагрузкам, чем вольфрамсодержащие сплавы группы (ВК) – вольфрамо-кобальтовые, и титано-кобальтовые (ТК).

Для оптического приборостроения эти качества не являются препятствием, поскольку при чистовом и получистовом точении срезание стружки производят с небольшими подачами, а конструкции деталей изначально тщательно отрабатываются на технологичность, что минимизирует возможность

переменной нагрузки на инструмент, особенно в условиях скоростного или сверхскоростного точения (то есть в пределах 160–300 м/мин. для стали 40).

Металлокерамика при заточке инструмента образует весьма острые износостойкие режущие кромки (что связано с её высокой прочностью и высокой пористостью). Это позволяет уже с первого прохода осуществить чистовую обработку заготовок на высоких скоростях резания: порядка 90, 300, 500 м/мин, без традиционного финишного шлифования. Для оптической отрасли получение высоко-качественной поверхности с одного прохода имеет особое значение в связи, с ярко выраженной тенденцией приоритетного использования в производстве рациональных заготовок с минимальными припусками на обработку. Здесь, в первую очередь, имеются в виду заготовки, получаемые следующими методами: литьем под давлением, по выплавляемым моделям, в оболочковые формы, точной штамповкой на прессах тройного действия; объемной горячей, холодной и жидкой штамповкой в закрытых штампах; порошковой металлургией и другими прогрессивными способами, включая фасонный прокат; высоко точную двухопорную смешанную резку заготовок на станках с ЧПУ дисковыми и ленточными пилами, оснащенными твердосплавным инструментом (зубцами), лазерную разрезку или раскрой материала 4 возрастание использования различных типов пластмасс, обработка их прессованием или литьем под давлением, а так же различные виды штамповок и прессовок из слоистых пластиков. К тому же, в ближайшие годы прогнозируется дефицит рабочей силы в обрабатывающей отрасли машиностроения. В силу изложенного, повышение производительности труда и качества обработки, перечисленные с возможностью более широкого использования инструментов из БВТС представляется обоснованной и актуальной для практической реализации задач. Можно повторно отметить, что все рабочие поверхности упомянутых типов заготовок могут быть обработаны металлокерамикой с одного прохода окончательно, с шероховатостью R_a 0,63 мкм. Сплавы БВТС обеспечивают меньшую шероховатость поверхности по сравнению с твердым сплавом, что дает возможность заменять финишную операцию шлифование – точением и способствует повышению производительности труда в 2–2,5 раза. Износостойкость БВТС в 1,2–1,5 раза выше износостойкости сплавов группы титан-кобальт. К тому же БВТС имеют в примере 1,3–1,5 раза меньшую стоимость, чем сплав группы ВК.

Можно с большой долей вероятности утверждать, что постоянная работа по совершенствованию БВТС, улучшит и еще более повысит их качество и широкое применение, как в оптическом приборостроении, так и в металлообработке в целом, как это показал опыт Японской промышленности. В Японии впервые специально для создания БВТС были изобретены уникальные технологии и оборудование (особенно для получения составляющих компонентов (порошков) с домикронной величиной). И насколько известно из технической литературы именно предприятия этой страны доминируют в мире по экспорту БВТС. Возможно, конкурентом номер один станет Россия, ибо нет сведений, чтобы другие страны – признанные производителем инструмента

(Швеция, Германия, Австрия, США) активно занимались производством и инновациями в производстве БВТС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Материалы симпозиума, каталоги, проспекты фирм SandvikCoromant, Новосибирск, 1999.
2. Plansse (Австрия), Москва, 2002.
3. Hertell каталоги и проспекты, Новосибирск, 2004.
4. «Москва-Sandvic» каталоги и материалы симпозиума, Новосибирск, 2005.

© Б.Э. Шлишевский, Т.В. Ларина, 2007

УДК 621.9.047.7

В.И. Каплин, А.В. Гуцин, А.Ю. Васильев, А.В. Печенкин

НГТУ, Новосибирск

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТОДОМ ТОНКОГО ГЛУБИННОГО АЛМАЗНОГО ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ШЛИФОВАНИЯ

Современное приборостроение традиционно сталкивается с серьезными трудностями при необходимости изготовления прецизионных деталей приборов из таких труднообрабатываемых материалов как постоянные магниты или твердые сплавы. В особенности проблематичным является формообразование на таких деталях фасонных поверхностей. Последние годы в промышленности нашел применение метод тонкого алмазного электрохимического шлифования (АЭХШ) обеспечивающий аномально высокую стойкость алмазного инструмента при обработке высокоточных фасонных поверхностей в изделиях из труднообрабатываемых материалов. В условиях указанного метода слои обрабатываемого материала, срезаемые алмазными зернами, имеют предварительное разрушение за счет электрохимического воздействия. Последнее и обеспечивает низкую температурно-силовую напряженность процесса обработки и высокую стойкость фасонного инструмента.

В тоже время, основываясь на результатах работ по механохимии металлов [1, 2, 3], было высказано предположение, что низкие температурно-силовые нагрузки на алмазные зерна могут быть обеспечены не только предварительным разрушением, но и эффектами, имеющими место при взаимодействии различных по своей природе процессов – микрорезания и анодного растворения. Взаимодействие и соответствующие эффекты, возникающие при этом, могут проявляться только при одновременном протекании этих двух процессов.

Для теоретического изучения этого взаимодействия были использованы основные принципы термодинамики необратимых процессов [4, 5]. С учетом последнего были составлены две системы дифференциальных уравнений – уравнения состояния и уравнения переноса. После интегрирования и определения основных и соответствующих перекрестных коэффициентов, были получены уравнения [6], описывающие изменение состояния зоны деформации, вызванное электрохимическим воздействием, а также изменение скорости пластического течения и плотности электрического тока, обусловленных взаимодействием двух указанных процессов.

Полученные уравнения позволили определить изменение интенсивности механических напряжений в зоне деформации, вызванное электрохимическим воздействием, а также температуру и изменение плотности тока, вызванное напряженным состоянием зоны деформации.

Впервые было установлено, что интенсивность напряжений в зоне деформации пропорциональна квадрату плотности тока анодного растворения и обратно пропорциональна толщине слоя, срезаемого отдельными зернами. При высоких плотностях тока интенсивность напряжений в зоне деформации может уменьшаться практически до нуля. Было показано, что плотность тока на поверхности зоны деформации возрастает в несколько раз.

Также было установлено, что наибольшее снижение сил шлифования под влиянием электрохимического воздействия будет иметь место в области малых толщин срезаемых слоев.

Были получены теоретические зависимости составляющих сил шлифования P_Z и P_Y от режимов электрохимического и механического воздействий. Эти зависимости учитывают изменение напряженного состояния под действием электрохимического воздействия. Анализ указанных зависимостей установил, что составляющие сил P_Z и P_Y существенно снижаются при увеличении плотности тока.

Такое снижение сил микрорезания в условиях АЭХШ при определенных режимах должно способствовать уменьшению отжима и износа инструмента, что ведет к повышению точности обработки.

Экспериментальная проверка полученных теоретических закономерностей показала, что эффективность электрохимического воздействия на процесс микрорезания определяется толщиной слоя, срезаемого отдельными алмазными зернами. Исследования проводились в условиях АЭХШ торцом круга. При этом установлено, что при наиболее благоприятных режимах АЭХШ значения сил шлифования в 20–30 раз меньше, чем при обычном алмазном шлифовании.

Установлено, что при толщинах срезаемых отдельными алмазными зернами слоев, не превышающих 0,08–0,12 мкм, абсолютные значения сил шлифования достаточно низкие и мало зависят от толщины срезаемого слоя. При увеличении указанной толщины свыше 0,08–0,12 мкм происходит резкое увеличение составляющих сил P_Z и P_Y . При этом, на участке зависимости $P = f(a_Z)$ соответствующей малым толщинам срезаемых слоев, коэффициент шлифования резко уменьшается, а при дальнейшем увеличении толщины среза остается практически неизменным.

Экспериментально было установлено, что при толщинах срезаемых слоев не превышающих 0,08–0,12 мкм, удельные значения сил шлифования составляют 0,05–0,15 Н/мм². Полученные результаты позволяют предположить, что высокая стойкость алмазного инструмента в условиях АЭХШ может быть получена не только за счет предварительного разрушения, но также и за счет хемомеханического эффекта (электрохимического воздействия), имеющего наибольшее проявление при режимах АЭХШ, обеспечивающих малые значения толщин срезаемых слоев и высокие плотности тока.

Теоретический анализ глубинного АЭХШ и многопроходной схемы АЭХШ при обработке плоских поверхностей, а также врезного АЭХШ при обработке отверстий показал, что производительность глубинного АЭХШ при срезании отдельными алмазными зернами тонких слоев будет в несколько раз выше, чем многопроходного или врезного АЭХШ.

В связи с этим, в дальнейшем рассматривались только процесс глубинного АЭХШ при обработке точных фасонных поверхностей с прямолинейной направляющей профиля, а также некруглых отверстий в изделиях из труднообрабатываемых материалов.

Лабораторные и промышленные исследования, проведенные с использованием статистических методов планирования эксперимента, показали, что как при обработке плоских поверхностей, так и внутренних некруглых поверхностей методом глубинного АЭХШ, в указанных условиях наблюдается практически полное отсутствие износа обрабатывающего инструмента.

Проведенные экспериментальные исследования по измерению микротвердости поверхностного слоя после обработки методом глубинного АЭХШ установили, что при использовании постоянной подачи в течение опыта микротвердость поверхности при больших подачах превышает исходную. При использовании специально разработанной системы автоматического управления процессом (САУ) микротвердость поверхностного слоя не отличается от исходной. Исследования в этих условиях шероховатости обработанной поверхности показали, что шероховатость в наибольшей степени зависит от зернистости инструмента.

Экспериментальные исследования касались обработки прецизионных фасонных изделий из таких материалов как термически обработанная сталь марки У8, магнитный сплав ЮНДК–24, металлокерамические твердые сплавы групп ТК и ВК. На наш взгляд, полученные результаты открывают перспективы успешной обработки практически любых прецизионных деталей приборных устройств, выполненных из труднообрабатываемых токопроводящих материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алехин В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. – М.: Наука, 1983. – 280 с.
2. Гутман Э.М. Механохимия металлов и защита от коррозии. – М.: Металлургия, 1981. – 271 с.
3. Каданер Л.И., Котляр А.М., Головкин А.Д. О влиянии электрического потенциала, рабочей среды и анодного процесса на некоторые характеристики абразивного разрушения металла // Электрофизические и электрохимические методы обработки. – 1970. – № 1. – С. 12–16.
4. Onsager L. Phys. Rev. V. 37. P. 405–426, V. 38. P. 2265–2270.
5. Вейник А.И. Термодинамика необратимых процессов. – Минск.: Наука и техника, 1966. – 259 с.
6. Васильев А.Ю., Печенкин А.В. Термодинамическая модель глубинного абразивного электрохимического шлифования // Сборник научных трудов НГТУ. – 2006. – № 3.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТОКСИЧНОСТИ И ВОСПЛАМЕНЯЕМОСТИ НЕКОТОРЫХ ПЕРСПЕКТИВНЫХ НЕОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

В последнее время возрос интерес к металлоподобным бескислородным неорганическим соединениям, таким например, как карбиды, бориды, силициды, нитриды, магниты и другие. Сначала эти вещества обнаруживали при создании новых сплавов в виде фаз, существенно влияющих на физико-химические и технологические свойства.

Затем начали систематическое исследование этих интересных веществ, получая их различными методами специально.

Особенно плодотворны были результаты работ в этой области школы выдающегося деятеля науки Григория Валентиновича Самсонова, к которой принадлежат и авторы данной публикации.

Не останавливаясь подробно на областях возможного применения указанных веществ, а они чрезвычайно обширны – от общего машиностроения и приборостроения до космоса, – отметим недостаточность экспериментального материала по свойствам, определяющим безопасность работы с ними, как на стадии получения, так и использования.

Получающиеся в ряде технологических операций мелкодисперсные частицы этих веществ могут быть источниками образования аэрозолей конденсации и дезинтеграции и оказывать вредное влияние на организм работающих.

Если токсичность аэрозолей металлов исследована довольно основательно, то биологическая активность смесей и постоянно появляющихся новых соединений – явно недостаточно.

Проведение токсикологических исследований – дело весьма трудоемкое и вряд ли в ближайшем обозримом будущем здесь можно ожидать серьезный «научный прорыв».

Гораздо вероятнее использование предварительных прогнозов.

Весьма плодотворной идеей служит здесь сопоставление токсичности веществ с их кристаллическими свойствами, зависящими, в свою очередь, от электронного строения веществ в конденсированном состоянии и стабильности химических связей, возникающих между атомами при образовании неорганических соединений [1].

Было отмечено, что у соединений, как и у элементов, биологическая активность коррелирует с температурой плавления, химической стойкостью и другими физико-химическими свойствами, определяемыми, прочностью внутренних связей, зависящих, в свою очередь, от типа кристаллической решетки.

Поэтому для предварительной оценки токсичности химических соединений целесообразно использовать имеющиеся данные о их физических и химических константах и характере кристаллической структуры [2].

Очевидно, что более высокой токсичности соответствует более низкая температура плавления, теплота плавления и образования, а также низкая симметрия кристаллической структуры.

Авторы на протяжении многих лет занимались преимущественно магнидами, боридами, силицидами, нитридами, поэтому, естественно, была сделана попытка установить выше указанные связи на этих веществах.

Например, для соединения магния с элементами IV в подгруппы, с кислородом и халькогенами, а также с галогенами, в которых особенно четко наблюдается зависимость физико-химических свойств от кристаллического и, следовательно, электронного строения можно предположить увеличение токсичности, оцениваемой интегральной характеристикой ПДК, в направлении роста атомного номера элемента в подгруппе (см. табл. 1).

Сведений о воспламеняемости магнидов в литературе практически нет, а по боридам, карбидам и другим соединениям они весьма фрагментарны и пока не позволяют выявить даже тенденции. (см. табл. 2 и 3)

Совершенно очевидно, что необходимы систематические исследования свойств веществ, полученных из чистых материалов и в сопоставимых условиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Самсонов Г.В., Прядко И.Ф., Прядко Л.Ф. Конфигурационная модель вещества. – Киев: Наукова думка, 1971. – 231 с.
2. Брахнова И.Т. Токсичность порошков металлов и их соединений. – Киев: Наукова думка, 1971. – 223 с.
3. Перминов В.П., Неронов В.А. Проблемы экологии и безопасности при металлотермическом получении металлов и сплавов // Вест. СГГА. 2001. – Вып. 6. – С. 118–221.
4. Неронов В.А., Перминов В.П. Вопросы безопасности при получении и использовании тугоплавких соединений // Вест. СГГА. – 2001. – Вып. 6. – С. 121–124.

© В.П. Перминов, В.А. Неронов, 2007

УДК 621.923(924):681.7.023.7

А.Н. Соснов, Н.К. Соснова, С.В. Критинина

СГГА, Новосибирск

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОЧНЫХ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Общие положения

Известно, что при изготовлении крупногабаритной прецизионной оптики традиционно возникают серьезные трудности технического и технологического характера, препятствующие решению основной задачи обработки – получению точной поверхности, заданной уравнением, на всей площади заготовки. Эти трудности определяются, прежде всего, следующими факторами:

- Несовершенством оптического станка и ошибками в его настройке;
- Неоднородностью твердости материала в различных точках заготовки;
- Сложными температурными процессами в зоне обработки;

– Неопределенностью характера распределения давления по поверхности заготовки и его эволюции в процессе обработки.

В результате формообразование оптических поверхностей во многом определяется опытом и интуицией рабочего, а не точными научными сведениями о сущности процесса, и технология изготовления детали не является сходящейся, т. е. в процессе работы оптик некоторое время улучшает качество поверхности, а часть времени непроизвольно тратит на ее ухудшение. По этой причине материальные и временные затраты на изготовление крупногабаритной оптики оказываются неоправданно большими и качество готовой детали зависит в основном от квалификации оптика. Это вносит значительный субъективный элемент в оптическую технологию.

Выходом из создавшегося положения может стать автоматизация процессов формообразования деталей с применением специализированных станков и средств вычислительной техники, на основе разработки математических моделей данных процессов. В этом случае технология станет строго сходящейся, т. е. за каждый сеанс обработки оптическая поверхность будет только улучшаться (независимо от личного опыта специалиста). Следующим, более высоким уровнем решения данной проблемы должно стать создание полностью автоматизированных технологических комплексов для изготовления оптических прецизионных деталей самых различных профилей, обеспечивающих автоматическую обработку поверхности и ее контроль в реальном времени, связанных обратной связью. Широкие возможности для решения указанных выше задач открывает развитие вычислительной техники. Хорошо известно, что применение ЭВМ вызвало революцию в вычислительной оптике [1–3] и привело к существенным изменениям методов исследований оптических элементов и систем.

Прежде всего, это относится к созданию и анализу математических моделей процессов обработки различных оптических поверхностей. Подавляющее большинство всех попыток промоделировать механизм шлифования и полирования основано на известной гипотезе Престона [4–5].

С изменением взаимного положения притирающихся поверхностей картина распределения скоростей также меняется, поэтому скорость является еще и функцией времени t :

$$V = V(\rho, \varphi, t) \quad (1)$$

– Удельное давление ρ распределено по поверхности контакта неравномерно и характер этого распределения непрерывно изменяется при движении центра верхнего звена. Поэтому ρ также является функцией координат и времени, а если учесть, что характер давления зависит от эволюции притирающихся поверхностей, то станет очевидной следующая функциональная зависимость:

$$\rho = \rho(\rho, \varphi, t, h_{\text{инстр}}, h_{\text{детали}}) \quad (2)$$

– Вращение верхнего звена чаще всего кинематически не определено и является результатом фрикционных связей с нижним звеном. Поэтому угловая

скорость ω верхнего звена зависит от характера распределения давлений и относительных скоростей, от величины коэффициента трения f и от времени:

$$\omega = \omega(p, V, f, t) \quad (3)$$

– Указанное обстоятельство увеличивает количество параметров от которых зависит величина V относительной скорости:

$$V = V(\rho, \varphi, t, p, f) \quad (4)$$

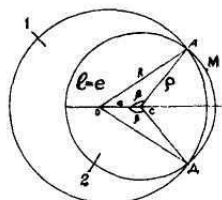


Рис. 1

– Классическая технология формообразования предусматривает обработку с так называемым "выходом за край", при котором часть поверхности заготовки не все время находится в контакте с инструментом.

Таковы лишь основные трудности задачи, вынуждающие исследователей идти по пути разработки упрощенных решений ее частных проблем (определение характера распределения относительных скоростей во времени по обрабатываемой поверхности, изучение влияния

на характер износа неравномерности распределения относительных скоростей и "выхода за край", исследование динамики свободного вращения верхнего звена, оценка влияния неравномерности распределения давлений по поверхности на характер износа и т. п.). Часть из них до сих пор не решена, другие исследованы и описаны, например, в [6–9]. Уместно вспомнить, что теоретические вопросы создания управляемых процессов формообразования оптических поверхностей одними из первых начали разрабатывать советские ученые. В МВТУ им. Баумана эти работы в 50-е года начал М.Н. Семибратов. Он классифицировал притир заготовки и инструмента как кинематическую пару 3-го класса с силовым замыканием и выделил в качестве независимых параметров процесса притирки траекторию и скорость движений инструмента и заготовки и геометрию их рабочих поверхностей, а также предложил 10 параметров для управления процессом [10]. Он же впервые ввел так называемый коэффициент покрытия, ставший одним из основных понятий для теоретических исследований "оптического направления". Суть сказанного понятна из рис. 1. Два плоских круглых диска-инструмента (1) радиуса R и деталь (2), произвольная точка M которой определяется радиусом ρ , вращаются с постоянными угловыми скоростями вокруг своих центров – точек "O" и "C" и скользят друг по другу с переменным эксцентриситетом e . Если зафиксировать расстояние l , то относительное время нахождения точки "M" детали, выходящей за край инструмента, в контакте с последним (это и есть коэффициент покрытия), будет равно:

$$\phi = \frac{t_2}{t} = \frac{2\beta}{\omega} \cdot \frac{2\pi}{\omega} = \frac{\beta}{\pi}, \quad (5)$$

где: t_2 – эффективная часть промежутка времени, t – его полная продолжительность, 2β – центральный угол, соответствующий эффективному промежутку, ω – угловая скорость детали. Для инженерных расчетов пользуются развернутым выражением коэффициента покрытия:

$$\psi_s = \frac{1}{\pi T} = \int_0^T \alpha \tau c \cos \frac{\varphi^2 + \ell^2 - R}{2 \varphi \ell} dt, T = \frac{2\pi}{\omega}, \quad (6)$$

где ψ_s – средний коэффициент покрытия для зоны ρ , в которой определяется износ. Просчитанные авторами значения коэффициента для случаев обработки плоских и сферических поверхностей могут использоваться до решения производственных задач.

В 60–70-х годах С.И. Винокуром была предпринята попытка учесть распределение давления в зоне контакта двух плоских взаимно-притирающихся поверхностей и связанное с ним взаимное влияние распределения износа одной поверхности на износ другой. Он получая систему двух интегродифференциальных уравнений, определяющих эволюцию формы поверхностей [11].

Первая удачная попытка реализовать в условиях реального производства задачу автоматизации процесса обработки крупногабаритной прецизионной оптики принадлежит английской фирме Grubb & Parson, производящей астрономические зеркала. Ей разработан математический аппарат, создана математическая модель процесса полирования оптических поверхностей полноразмерным инструментом и отлажена программа получения от ЭВМ рекомендаций для назначения оптимальных режимов доводки профиля [12].

При создании математической модели сотрудники фирмы исходили из условия использования полноразмерного инструмента, основное достоинство которого они видели в способности получать и сохранять осесимметричный профиль на поверхности заготовки. Для исключения из модели сложно программируемого фактора "выхода за край" максимальное смещение инструмента относительно центра детали ограничивали несколькими процентами от величины ее диаметра. Разработанная программа состоит из четырех разделов и оперирует с исходными данными, поступающими от оператора и из банка ЭВМ. Трудно, однако, согласиться с ориентацией авторов на использование полноразмерного инструмента и классической схемы обработки, поскольку при этом очевидны два момента, серьезно ограничивающие применимость методики:

- Значительная сложность (практически невозможность) исправления местных ошибок;
- Сложность создания инструмента, само назначение которого требует от него совокупности сложно-сочетаемых свойств (он должен быть достаточно эластичным для обеспечения надежного и полного контакта с заготовкой в течение всего процесса обработки и одновременно жестким для получения точной осесимметричной поверхности и ее сохранения).

Именно поэтому большинство технологических комплексов, создаваемых для автоматизированной обработки оптических деталей, при управлении ею от ЭВМ, успешно использует малоразмерный инструмент [13–14], который значительно более удачно, чем полноразмерный, "вписывается" в систему

четырёх технологических факторов, позволяющих регулировать ход шлифования и полирования заготовок.

Управление процессом формообразования за счет времени обработки

Обзор исследований в данной области следует начать со ставших классическими разработок М.Н.Семибратова.

Так, описанный им инструмент для местной ретуши асферических поверхностей, рабочая поверхность которого представляет собой "лепестка" определенной конфигурации, осуществляет формообразование заданного профиля за счет управления временем обработки. Аналогичный принцип заложен в каблучный инструмент того же автора и в устройство, предложенное сотрудниками Крымской обсерватории [15], а также является основой так называемого метода масок [16–19]. Обработка по способу программирования времени заложена и в станки, разработанные в МВТУ им. Н.Э.Баумана [20–21]. Не останавливаясь подробно на достоинствах и недостатках всех описанных выше разработок, заметим лишь, что они, реализуя по существу квазисвободный притир, обеспечивают машинную обработку поверхностей с точностью в 2–4 интерференционных кольца.

Управление процессом формообразования за счет скорости инструмента

Скорость имеет три составляющие: скорость вращения заготовки, скорость вращения инструмента и скорость перемещения верхнего звена. Для случая обработки крупногабаритной оптики ввиду большой инерционности системы управление скоростями затруднено, и на сегодня этот принцип реализован только в станках "Старт". Очень интересно поэтому устройство [22], предназначенное для получения радиально-симметричной поверхности (рис. 2). На вращавшейся планшайбе (I) устройства закрепляют заготовку (2). Центральная плата (3) вращается на оси суппорта (4). Инструмент (5), ось которого пропущена через плату, приводится во вращение двигателем (6) через приводной ремень (7) и шкив (8).

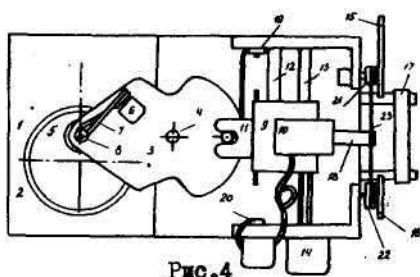


Рис. 2

На основании станка установлен управляющий механизм, состоящий из каретки (9), чувствительного элемента (10) и хомутика (II). Каретка скользит по направляющей (12); движение осуществляется с помощью ходового винта (13) от двигателя (14). Блок управления состоит из двух кулачков (15) и (16) и протяженного источника света (17).

Фотоприемник в чувствительном блоке предохраняется от боковой засветки трубкой (18). На боковых стойках станка установлены концевые выключатели (19) и (20), предотвращающие поломку станка в случае выхода из строя чувствительного блока. Электрическая схема устройства собрана так, что каретка движется в одном из направлений до тех пор, пока фотоприемник освещен. Когда один из кулачков экранирует источник, электрическая схема переключает направление вращения электродвигателя (14) на обратное и каретка начинает двигаться в противоположном направлении до тех пор, пока другой кулачок не экранирует, в свою очередь, источник (17).

Инструмент совершает при этом возвратно-поступательное движение по поверхности заготовки. Желаемое соотношение съема стекла достигается непрерывным изменением по заданному закону амплитуды и скорости радиальных перемещений инструмента за счет придания кулачкам определенного профиля.

Значительный интерес представляет и станок, описанный в [23] и предназначенный для исправления местных ошибок поверхности.

Управление процессом формообразования траекторией движения инструмента

На наш взгляд, данный способ является наиболее оптимальным. К сегодняшнему дню он реализован уже в нескольких зарубежных технологически комплексах. Исключительный интерес представляет здесь работа сотрудников американской фирмы R. Aspden и др. [24]. Траектория перемещения инструмента рассчитывается, исходя из величины времени, необходимого для снятия припуска в различных зонах поверхности. Удачный выбор метода контроля позволил устранить проблемы стабильности установки, посторонних вибраций, потоков воздуха и т. п. Анализ интерферограмм проводился по методике, описанной в [25], и обеспечивал объективную оценку точности обработки с выдачей количественных значений отклонений поверхности от идеальной в различных ее точках (до 1 000 точек). На фирме функционирует два автоматизированных комплекса: в первом заготовка вращается, во втором – расположена неподвижно. Для подсчета времени нахождения инструмента на различных участках поверхности и для определения траектории его перемещения необходимы два типа данных:

- Набор данных, детально описывающий количество материала, подлежащего удалению с различных участков поверхности (его получают в результате компьютерного анализа интерферограмма);

- Данные, необходимые для инженерного описания процессов шлифования и полирования и для прогнозирования величины съема материала за один проход инструмента. Технологические закономерности механизма обработки были заимствованы из [26–27]. Схема технологического цикла формообразования может быть укрупнено представлена следующим образом:

- На основе заложенной в компьютер математической модели последний вычисляет количество раз, которое центр инструмента должен пройти через каждый гексагон поверхности заготовки для исправления ее ошибок и определяет непрерывный путь, обеспечивающий полировальнику такое перемещение;

- В соответствии с координатами пути, записанными последовательно на магнитную ленту, моторы перемещают инструмент по поверхности, обеспечивая ее целенаправленную обработку. На описанных комплексах обработан ряд асферических поверхностей, в том числе внеосевых, диаметрами от 500 до 700 мм, причем была достигнута точность $\lambda / 40$.

Точность, в два раза большая, обеспечивается при работе на технологическом комплексе фирмы Perkin-ElmerCorp.[28–29]. Его отличительной чертой является использование двухэлементного инструмента,

состоящего из двух близко расположенных полировальников, шарнирно связанных с поперечиной, совершающей эпициклическое движение, инструмент перемещается по поверхности по заранее определенной траектории, причем сам путь и скорость перемещения контролируются микрокомпьютером, связанным с интерфейсом. Информацию о положении обрабатывающей головки получают с кодирующего устройства и обратной связью передают в компьютер.

Важным достоинством описанных комплексов можно считать возможность обрабатывать любые профили с точностью, отвечающей критериям Рэлея и Шеффлера [30], а основной недостаток – необходимость иметь специальный станок с кинематикой, отличающейся от классической – не представляется принципиальным при условии, что оптика изготавливается в достаточно больших количествах.

Заключение

Представленный (далеко не полный) критический обзор отечественных и зарубежных работ по автоматизации технологии изготовления крупногабаритных оптических деталей свидетельствует об исключительно высоком интересе к этой проблеме со стороны ведущих коллективов и специалистов-оптиков. Авторы надеются, что их работа поможет правильно оценить перспективы и спланировать дальнейшее исследования в данном направлении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Леонова В.Б. Автоматизация расчетов оптических систем / В.Б. Леонова. – М., Машиностроение. 1970.
2. Hopkins B.E.-Journ.of Opt.Soc of America, 1962, N11, p. 1218.
3. Слюсарев, Г.Г. Расчет оптических систем. – Л., Машиностроение, 1975.
4. Preston I".W.-"J.of the Soc.of Glass Techn. ", 1927, 11, p. 214.
5. Preston F.W.-"Hashlnee J.of the Soc.of Glass Techn.y 1927, 2o, N HZ.
6. Винокур С.И. Оптико-механическая промышленность. – 1976.- № 2.- С. 45.
7. Абрамов Ю.Т., Перец М.И. В сб.: Вопросы механики машиностроения. Вопросы технологии машиностроения. Вып.4, РПИ, Рига, 1973, с.40.
8. Wagner R.E., Shannon R.H.-"Appl.Opt", 1974, vol.13, N7, p.1683.
9. Бобашов В.В. - Оптико-Механическая промышленность.-1976.- № 1. - С. 17
10. 10 Семибратов М.Н. -Оптико-механическая промышленность.- 1958.-№9.- С. 37.
11. Винокур СИ,- Оптико-механическая промышленность' 1974, №2, с.22.
12. 12 Brown D.S.-ESO/CERN Conf.on large telescope design. Genevi March 1-5, 1971, p. 273.
13. Лысянный Ю.К. - Оптико-механическая промышленность.-1974.- №5.- С.21.
14. Лысянный Ю.К. - Оптико-механическая промышленность.-1972. -№ 7.- С.5.
15. 15.Попов Г.М., Попова М.Б. -Оптико-механическая промышленность.-1970. -№ 8.- С.46.
16. 16.Голованова М.Н. и др.- Оптико-механическая промышленность.-1968.-№4.- С.40.
17. 17 Лысянный Ю.К., Цеснек Л.С. - Оптико-механическая промышленность.- 1973.- № 7.-С.51.

18. Богданов А.П., Цеснек Л.С. - Оптико-механическая промышленность.- 1976. -№ 3.- С.42.
19. Савостин Т.Д. - Труды МВТУ им. Баумана. М., МВТУ.- 1972.- №155.-С.88.
20. Заказнов Н.П., Савостин Т.Д. Авт. свид. СССР №427837, Бюл.изобр.-1974.-№18.
21. Mayo M.J. Patent USA,1973, № 3.735.534 , № 3.769.762.
22. Aspden R. Patent USA, 1971, № 3.556.574.
23. Патент США № 3566544, 1970.
24. Aspden R. et al.-"Appl.Optics",1972,vol.11 ,№12,p.2739.
25. Rummer M.P., King C., POx D.-"Appl.ppt.", 1972, vol.11, №12, p.2790.
26. Meuser L.H.-"J.of Opt. Soc.of America", 1971, vol.61, p.651 (A).
27. Rupp W.-"J.of Opt. Soc. of America", 1971, vol.61, p.651 (A).
28. Jones R.A.-"Appl. Opt. n, 1977, vol. 16. №1, p.218.
29. Jones R.A.-"Appl. Opt.", 1978, vol.17, №12, p.1889.
30. Витриченко Э.А. Методы исследования астрономической оптики. М., Изд.Наука.- 1980.

© А.Н. Соснов, Н.К. Соснова, С.В. Критинина, 2007

О ХАРАКТЕРИСТИКАХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОЛНЕЧНОГО СВЕТА С ПОЛИМЕРНЫМИ ВОЛНОВОДАМИ

Последние десятилетия характеризуются бурным развитием солнечной энергетики. Особенно остро проблема освоения солнечной энергии стоит в связи с глобальным потеплением и повышением цены на природное топливо.

В настоящее время скорость введения мощностей солнечных установок составляет около 1 ГВт в год при темпах роста около 40 % [1].

Основой солнечных элементов является кремний, солнечные модули из кремния имеют эффективность 10–15 %.

Для удешевления солнечных элементов применяют оптические методы концентрации, причем фактор концентрации составляет от 2 до 500 и более. В качестве оптических концентраторов используют обычные линзы, линзы Френеля, параболические зеркала. Большая часть концентраторов фокусируют только прямые пучки. Причем для повышения эффективности концентрации необходимо слежение за солнцем с достаточно высокой точностью.

Наряду с преобразованием солнечной энергии в электричество и тепло используют оптические системы для освещения помещений солнечным светом [2]. Одна из первых конструкций световодов для освещения пороховых заводов в виде полых зеркальных труб была предложена В.Н. Чиколевым в 1874 году. В настоящее время рядом фирм выпускаются различные типы солнечных осветителей. Однако они имеют большие габариты и не могут передавать свет на значительные расстояния.

Для решения этих задач могут использоваться для преобразования солнечного света полимерные волноводы с добавками специальных люминофоров и для доставки света полимерные оптические кабели.

На протяжении последних десяти лет ИЛФ СО РАН и ЗАО «СКБ» занимались исследованием вопросов преобразования оптических сигналов в полимерных планарных волноводах с люминофорами [3–6]. В ЗАО «СКБ» разработаны различные технологии изготовления таких волноводов, площадью до нескольких десятков сантиметров, как для приема быстрых оптических сигналов, так и для преобразования солнечного света. Выполнены расчетные оценки характеристик солнечного преобразователя на базе совокупности планарных полимерных волноводов с различными люминофорами. Параметры волноводов и люминофоров рассчитываются так, чтобы в зоне освещения получить световой сигнал с заданными спектральными свойствами.

Отличительными свойствами оптических систем на планарных (пленочных) волноводах с люминофорами является большие угол поля зрения и апертура, при толщинах пленки от нескольких микрон до нескольких миллиметров. Фактор концентрации солнечного света в определенном

спектральном диапазоне превышает 100, за счет волноводного механизма распространения излучения люминесценции в планарном волноводе.

Для задач передачи оптического сигнала от планарного преобразователя на фотоприемники или в зону освещения исследовались различные типы стыковки с оптическими кабелями. Для создания солнечных осветителей исследовались свойства полимерных оптических кабелей, обладающих большой числовой апертурой и большим поперечным сечением световода. Разработаны несложные методы создания фоконов на торце полимерного волновода, значительно увеличивающих эффективность ввода оптического сигнала из планарного волновода в полимерный оптический кабель.

Как известно, существуют люминофоры с длительным временем послесвечения. На их основе создаются различные рекламные и световые устройства. Такие люминофоры могут накапливать световую энергию, а затем отдавать её в течение сотен минут.

Исследовалась возможность создания подобных источников с неорганическими люминофорами "Пента Л-1" желто-зеленого и голубого свечения. Размер зерна люминофора составляет порядка 10–15 мкм, имеет время послесвечения до 8 часов [7]. Предполагаемый квантовый выход не менее 0,5–0,8 [8]. Измерялись освещенность и оптическая мощность создаваемая люминофорами в различных пленках.

Были изготовлены образцы в виде пленок с люминофорами. В качестве матрицы использовались:

- Акриловая смола, отверждаемая УФ – светом, толщина 1,2 мм;
- Полиметилметакрилат, толщина 1 мм;
- Полиуретан, толщина 1,5 мм.

Проверка аккумулирующих свойств проводилась ясным солнечным днем при освещенности 80 000 Лк (показания люксметра Ю 116). Пленки облучались прямым солнечным светом в течение 10 минут. Измерялась освещенность, создаваемая пленкой. Пленка помещалась непосредственно перед фотоприемником люксметра. Доступ солнечного света во время измерения был полностью исключен.

Результаты показали, что первоначальная освещенность падает в 2 раза через 15 секунд, после облучения. Через 45 секунд, освещенность падает в 5 раз. При достижении уровня освещенности в 10 Лк, скорость падения освещенности замедляется (рис. 1).

Пленки также облучались УФ люминесцентной лампой, в течение 1, 10 и 30 минут. После облучения пленки помещались перед фотоприемником. В табл. 1 приведены энергетические характеристики и время полного послесвечения.

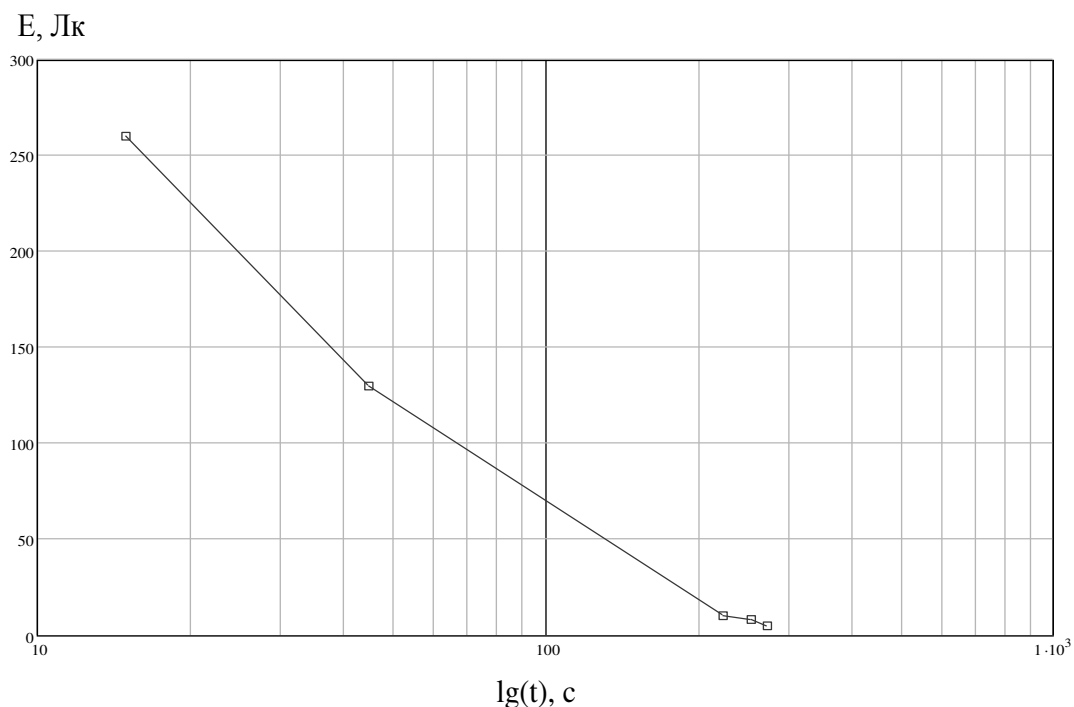


Рис. 1. Зависимость освещенности от времени

Таблица 1. Энергетические характеристики пленки с люминофором и время послесвечения

Время облучения, мин	Мощность, нВт	Время полного послесвечения, мин
1	25	20
10	30	90
30	50	150

Учитывая, незначительную стоимость таких люминофоров и полимерных материалов, оптические системы на их основе могут представлять интерес для создания осветителей помещений в темное время суток и для создания различных информационных систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фотоэнергетика – путь к светлому будущему / Sarah Kurtz, Daniel Friedman // Оптический журнал. – 2007. – Т. 74, № 1. – С. 82–85.
2. Трембач В.В. Световые приборы / В.В. Трембач. – М.: Высш. шк., 1990. – 463 с.
3. Характеристики ультрафиолетового газового излучателя и полимерного преобразователя спектра для лазерных телекоммуникаций / А.А. Голубенков, Б.В. Поллер, А.И. Карапузиков, В.Ф. Плюснин, А.Н. Малов // Доклад на MPLP-2000 г., ИЛФ СО РАН. – Новосибирск, 2000.
4. Голубенков А.А. Приемник УФ излучения на основе раствора люминофора в пленке / А.А. Голубенков, В.Ф. Плюснин, Б.В. Поллер // Сб. докл. 7 МНТК «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж. – 2001.
5. Голубенков А.А. Люминесцентные волноводные преобразователи спектра для оптических приемников / А.А. Голубенков // Сб. докл. 8 МНТК «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж. – 2002.

6. Поллер Б.В. Исследование планарных полимерных антенн с люминофорами для лазерных информационных систем / Б.В. Поллер, Ю.Д. Коломников, Д.Е. Трушенко // Сб. материалов междунар. научн. конгр. «ГЕО–Сибирь – 2006». – Новосибирск, 2006. – С. 176–181.
7. Интернет [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.Penta-91.ru
8. Казанкин О.Н. Неорганические люминофоры / О.Н. Казанкин, Л.Я. Марковский и др. – Л.: Химия, 1975.

© Б.В. Поллер, В.К. Попков, А.Б. Поллер, А.В. Бритвин, Ю.Д. Коломников, Д.Е. Трушенко,
С.Г. Орлов, 2007

УДК 621.384

С.И. Коняев, Е.В. Удальцов, Б.В. Поллер
ИЛФ СО РАН, СГГА, Новосибирск

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ СВЕТОДИОДОВ БЛИЖНЕГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ДИАПАЗОНА

Исследовано быстродействие светодиодов (СИД) ближнего ультрафиолетового (УФ) диапазона с постоянной оптической мощностью достигающей 1 мВт и зависимость пиковой оптической мощности от тока накачки.

Ультрафиолетовая (УФ) область 250–400 нм весьма перспективна для построения систем атмосферной оптической связи (АОС) за счет уменьшения фоновых помех и бликов от Солнца и роста пропускной способности канала связи. Повсеместное использование этой области спектра до сих пор сдерживалось отсутствием эффективных и портативных излучателей. С появлением полупроводниковой техники работающей в этом спектральном диапазоне в качестве источников излучения в АОС могут быть использованы полупроводниковые светодиоды (СИД). Спектральная плотность мощности, эффективность и быстродействие которых достаточны для создания портативных информационных систем работающих на расстояния до 1 км, а масса – габаритные параметры, механическая прочность, надежность, устойчивость к перепадам температур существенно превосходят аналогичные показатели других источников УФ излучения. Срок службы светодиодов 10 000 ч, превышает жизненный цикл большинства установок работающих на открытом воздухе.

В целях получения необходимых данных для создания АОС после предварительного анализа были исследованы несколько типов СИД: RLT360-1.5-30-3CC, NSHU-590, ARL52BVC, L-7113UVC. Их паспортные характеристики представлены в табл. 1 [1].

Обычно производители, указывают оптические характеристики светодиодов работающих в постоянном режиме при типовом значении тока. Вместе с тем импульсные параметры светодиодов не менее важны.

Быстродействие СИД или предельная частота модуляции ограничивается временем жизни неосновных носителей, поэтому при включении и выключении

СИД, световой поток возрастает до максимума и спадает до минимума не мгновенно. Инерционность ограничивает возможности применения СИД при работе с сигналами высокой частоты. Наличие инерционности у СИД приводит к тому, что величина их светового потока зависит от частоты модуляции тока – с увеличением частоты световой поток уменьшается. Поэтому при измерении быстродействия СИД, достаточно увеличивая частоту модуляции найти момент, когда световой поток начнет уменьшаться. Быстродействие также зависит от внутреннего сопротивления и емкости (RC) конкретного образца СИД и может незначительно меняться от температуры.

Таблица 1. Паспортные данные УФ СИД

Паспортные данные	Модель СИД			
	RLT360	NSHU-590	L-7113	ARL52
Длина волны, нм	360	375	395	400
Средний ток, мА	30*3	30	30	30
Напряжение питания, В	5	4	4,2	3,5
Угол излучения, градусы	10*3	10	20	20
Диапазон температур, °С	от -40 до +100	от – 30 до +85	от – 40 до +85	-
Оптическая мощность, мкВт	500*3	750	160 мкКд	200 мкКд

Для измерения быстродействия была собрана лабораторная установка. Напряжение питания подавалось на СИД с генератора прямоугольных импульсов Г5-78 и одновременно – на вход синхронизации осциллографа С1-99. Задавалась частота и длительность импульсов (до 1 нс) модулирующих излучение исследуемых СИД. Светодиод и фотодиод установлены соосно в жесткой пластиковой муфте. Фотодиод ФД-256, с постоянной времени 2 нс, включен в трансимпедансный усилитель разрешающий 0,9 нс. Сигнал с усилителя через согласованный кабель поступает на осциллограф С1-99, который предназначен для наблюдения формы и измерения параметров электрических сигналов длительностью до 50 нс, а с растяжкой до 5 нс. Все измерения были проведены при комнатной температуре +22 °С. Полученные данные показаны на рис. 1. Для сравнения на графике показано быстродействие СИД видимого диапазона, а именно зеленого и красного цветов.

Величина предельного быстродействия УФ СИД лежит в диапазоне от 100–300 нс, что по порядку величины меньше наблюдаемой в цветных и белых СИД видимого диапазона, но больше чем в красных и инфракрасных.

При питании СИД важно установить величину максимально допустимого и разрушающего импульсного тока при больших скважностях, чтобы полностью реализовать их ресурс при максимальной излучаемой пиковой мощности. Яркостью СИД можно легко управлять с помощью скважности, делая неразличимой видимую компоненту излучения СИД, работающих на границе УФ и видимого излучения. Коэффициент модуляции СИД чрезвычайно высок и достигает до 98 %.

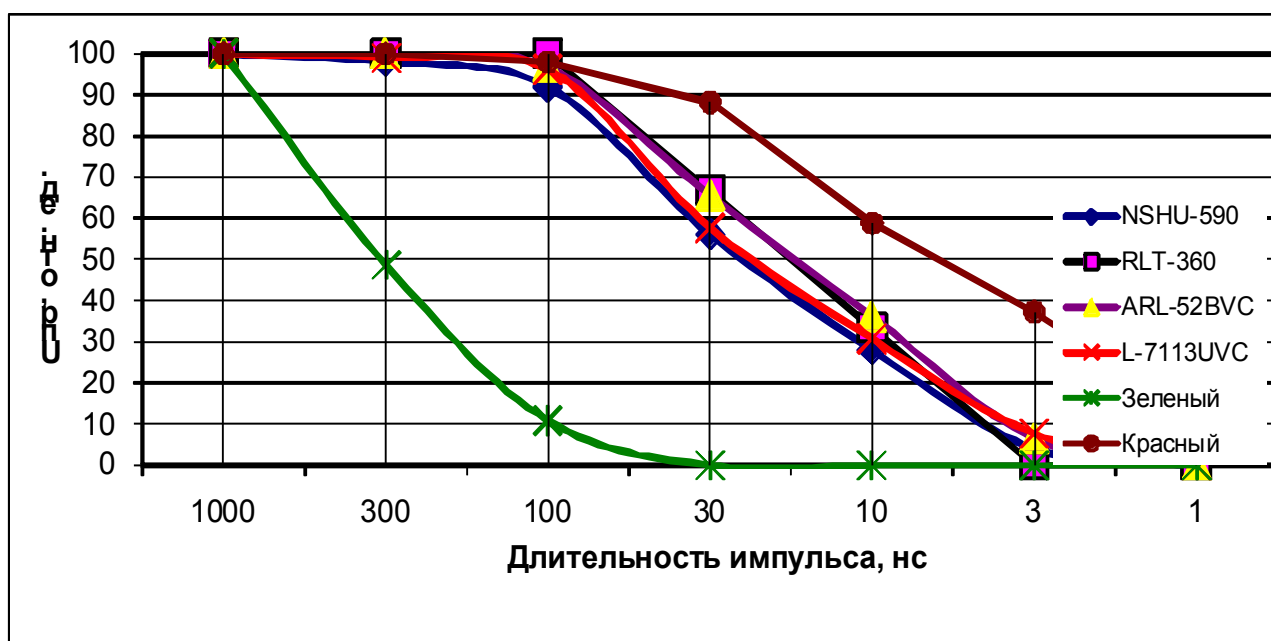


Рис. 1. Быстродействие ультрафиолетовых светодиодов

Измерение импульсной оптической мощности в УФ диапазоне представляет собой весьма сложную задачу, так как специальные радиометрические средства имеют увеличивающуюся с частотой погрешность. Поэтому с их помощью на высоких частотах можно получить только качественную зависимость, а не количественную. Исходя из этого для измерения зависимости импульсной оптической мощности от тока накачки была собрана установка на базе УФ фотодиода ФД-УФ1. Работа проводилась следующим образом: амплитуда сигнала принятого приемником на базе ФД-УФ1 включенном в фотодиодном режиме со смещением 1 В (штатный режим) с нагрузкой 1 Ком регистрировалась осциллографом С1-65, а затем рассчитывалась излучаемая мощность исходя из чувствительности фотодиода на заданной длине волны и угла расходимости СИД. Исследуемый светодиод включался в схему питания и управления, которая позволяла регулировать импульсный ток накачки от 0 до 10 А. Питание схемы управления – $U_{п} = 2-10$ В. На схему с генератора прямоугольных импульсов Г5-63 подавался управляющий сигнал: $T = 10$ мс, $\tau = 30$ мкс, $Q = 333,3$. Напряжение на контрольном сопротивлении $R = 1$ Ом, включенном последовательно с СИД также регистрировалась осциллографом С1-65. Для проверки средний ток через СИД измерялся с помощью мультиметра MAS-838. Расстояние между СИД и фотоприемником задавалось в зависимости от угла расходимости светодиода и принималось таким образом, чтобы на максимальных токах накачки фотодиод не входил в режим насыщения. Также были проведены измерения постоянной излучаемой мощности с помощью данной установки и УФ радиометра ТКА-ПКМ.

В результате получены условия, позволяющие достичь максимальную пиковую мощность излучения светодиодов. На рис. 2 показан сводный график зависимости оптической мощности от импульсного тока накачки для трех УФ СИД: RLT360-1.5-30-3CC; NSHU-590; ARL52BVC.

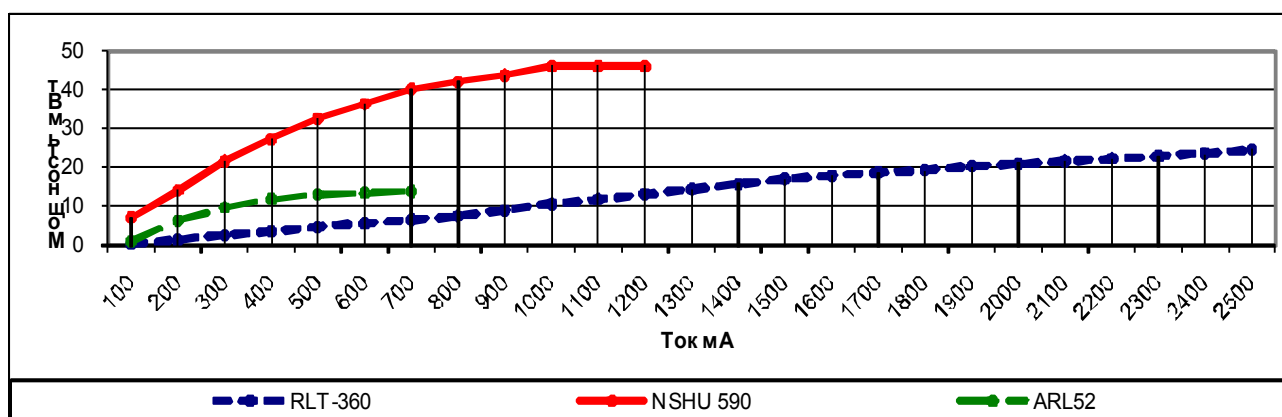


Рис. 2. График зависимости оптической мощности УФ СИД от импульсного тока накачки

Из графика видно, что NSHU-590 излучает большую оптическую мощность на тех же токах, что и другие СИД. Это связано с одной стороны с тем, что данный СИД выполнен более качественно и его эффективность выше, с другой стороны частично это связано с тем, что использовалась монохроматическая чувствительность на длине волны $\lambda = 400$ нм, фотодиода ФД-УФ1, равная 0,11 А/Вт. На спектральной кривой чувствительности ФД-УФ1 видно, что максимум чувствительности приходится на $\lambda = 375$ нм, то есть совпадает с максимум излучения NSHU-590, а на $\lambda = 400$ нм и $\lambda = 360$ нм чувствительность несколько ниже.

В ходе дополнительных измерений было установлено, что динамическое сопротивление при одинаковых токах у ARL52 самое низкое. Несмотря на это свечение видимое глазом в затемненной комнате у NSHU-590 наблюдалось при токах $I = 0,01$ мА и напряжении питания $U = 2,8$ В, у RLT360 при токах $I = 0,45$ мА и $U = 2,8$ В, а у ARL52 при токах $I = 3,3$ А и $U = 2,71$ В. В связи с этим на рисунке 2 можно видеть, что начальный уровень мощности NSHU-590 заметно выше, чем у других светодиодов, а рост мощности от тока более крутой. Это дает дополнительные преимущества по управлению мощностью излучателя на базе NSHU-590, так как увеличивается диапазон регулировки тока накачки для более широкой подстройки мощности в зависимости от внешних условий.

Оптическая мощность у ARL52 достигла насыщения при амплитуде тока $I = 600$ мА, дальнейшее повышение тока через СИД привело к деградации кристалла и уменьшению излучаемой мощности. У NSHU-590 оптический максимум наблюдался на $I = 1\,000$ мА, дальнейшее повышение импульсного тока до 1 200 мА и более не привели к выходу из строя светодиода. Большие токи через RLT360 объясняются тем, что в нем, в отличие от остальных представленных СИД объединены сразу три излучающих кристалла. У данного образца наблюдался постоянный рост оптической мощности, вплоть до импульсных токов превышающих 2,5 А. В области 3 А произошло разрушение двух кристаллов.

При питании рассмотренных СИД постоянным током 22,5 мА средняя оптическая мощность составила: NSHU-590 – $P_o \approx 1$ мВт; ARL52 – $P_o \approx 0,762$

мВт, что соотносится с паспортными данными, а также с измерениями, полученными с помощью УФ радиометра в пределах ошибки измерения 25 %.

Таким образом, нами было показано, что частота модуляции УФ СИД ограничена диапазоном частот ниже 10 МГц. Стоит отметить, что это вполне достаточно для большинства приложений, так как допускает модуляцию на частотах превышающих тепловые шумы. Приведенные мощностные характеристики показали сильное влияние параметров импульса накачки на спонтанные излучательные рекомбинационные процессы в кристалле и выходную оптическую мощность СИД на основе AlGaIn. В ходе измерений было установлено, что в представленных светодиодах при комнатной температуре может быть достигнута непрерывная оптическая мощность до 1 мВт при стандартных токах, что согласуется с паспортными данными и максимальная пиковая оптическая мощность от 15 мВт до 45 мВт. Продемонстрирован характер зависимости оптической мощности СИД от параметров импульса накачки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коняев, С.И. Обзор некоторых характеристик ультрафиолетовых светодиодов для оптических информационных систем / С.И. Коняев, Б.В. Поллер, Е.В. Удальцов // Матер. междунар. конгр. «Гео-Сибирь-2006» – 2006. –Т. 4. – С. 181–183.

© С.И. Коняев, Е. В. Удальцов, Б.В. Поллер, 2007

УДК 621.382.002

В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков, С.Л. Шергин
СГГА, Новосибирск

ТЕХНОЛОГИЯ ЛАЗЕРНОЙ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ *IN SITU*

Целью настоящего сообщения является рассмотрение особенностей технологии «сухого» лазерного удаления с гладких полированных поверхностей посторонних микрочастиц и выявление параметров лазерного излучения, при которых не происходит термического повреждения поверхностей.

Лазерные методы очистки поверхностей подложек, известные по многим публикациям, в основе своей предполагают лазерное нагревание поверхностей импульсами излучения до температуры десорбции молекулярных слоев загрязнений [1], или до температуры, превышающей температуру плавления, при которой может наступить аморфизация поверхности [2].

Ранее [3, 4] были предложены методы очистки подложек импульсным «скользящим» лазерным облучением поверхностей, когда создаются условия для нагревания частиц, а подложка может остаться сравнительно холодной. При нагревании частиц возникает реактивный импульс отдачи паров с освещенной стороны частицы и давление десорбированного с поверхности частицы газа, что приводит к удалению частицы.

В настоящем сообщении обсуждается экспериментальная техника, используемая при лазерной очистке поверхностей, возможности уменьшения теплового воздействия лазерного излучения на поверхности и полученные результаты.

Известно [1], что при нормальном падении лазерного пучка на металлическую поверхность и гауссовом распределении интенсивности по сечению пучка в центре пятна происходит нагревание поверхности на температуру ΔT :

$$\Delta T = \frac{A_0 P_0 \tau^{1/2}}{(\sqrt{2} k_T \rho c_p)^{1/2}}, \quad (1)$$

где A_0 – поглощательная способность поверхности; P_0 – плотность мощности падающего излучения; τ – длительность импульса излучения; k_T , ρ и c_p – коэффициент теплопроводности, плотность и удельная теплоемкость подложки, соответственно.

При падении излучения под некоторым острым углом θ поглощательная способность поверхности для света, линейно поляризованного параллельно ($\parallel$) обратно пропорциональна $\cos \theta$, для поляризованного перпендикулярно ($\perp$) плоскости падения – пропорциональна $\cos \theta$ [5]. Если учесть, что при наклонном падении интенсивность излучения уменьшается в $1/\cos \theta$ раз, можно получить вместо (1) следующее уравнение для перпендикулярной поляризации падающего света:

$$\Delta T_{\perp} = \cos^2 \theta \cdot \frac{A_0 P_0 \tau^{1/2}}{(\sqrt{2} k_T \rho c_p)^{1/2}}. \quad (2)$$

Для параллельной поляризации изменение температуры не зависит от угла падения:

$$\Delta T_{\parallel} = \Delta T \quad (3)$$

Рассмотрим случай, когда загрязняющие частицы сцеплены с поверхностью подложки за счет сил Ван-дер-Ваальса, при этом ускорение, требующееся для отрыва частиц поперечником $3 \div 5$ мкм, может достигать $(10^4 \div 10^9)g$ [6]. Частицы можно считать теплоизолированными от подложки во время импульса облучения, во-первых, в связи с малой площадью их контакта с поверхностью в сравнении с сечением частицы, во вторых, в связи с малым значением длины ℓ_T тепловой волны при наносекундном облучении [1]:

$$\ell_T = \sqrt{\frac{k_T \cdot \tau}{\rho c_p}}. \quad (4)$$

Тепловой поток, возникший при поглощении частицей излучения, не успевает распространиться в области вне частицы; например, значение ℓ_T при длительности $\tau \approx 1$ нс и в случае кремниевых частиц составляет 0,09 мкм [4].

Нагревание системы частиц на поверхности приводит к тепловой десорбции молекул атмосферных газов, адсорбированных на частицах. В зазоре между частицей и поверхностью возникает газовая подушка, давление в которой определяется выражением [4]:

$$p \approx \frac{k\Delta T q_0}{S \cdot d}, \quad (5)$$

где k – постоянная Больцмана; S – сечение адсорбированной молекулы; d – средняя величина зазора между частицей и поверхностью; q_0 – количество монослоев адсорбированных молекул; ΔT – изменение температуры частицы. При числе монослоев $q_0 \approx 5$, $\Delta T \approx 1000$ К, $d \approx 10^7$ м, $S \approx 10^{-19}$ м² (для молекул воздуха) получим $p \approx 7 \cdot 10^6$ Па. Ускорение отрыва частицы

$$a = \frac{p}{\rho h}, \quad (6)$$

при толщине $h \approx 10^6$ м, плотности $\rho = 3 \cdot 10^3$ кг/м³, оказывается равным $a \approx 2 \cdot 10^8$ g, достаточным для преодоления сил адгезии с подложкой.

Нагревание частиц до ещё более высоких температур может привести к процессам их частичного испарения и возникновения реактивного импульса отдачи паров [3]. Анализ в [4] показал, что при этом возникает момент сил, действующих на частицу, и ускорение отрыва частицы оценивается выражением

$$a = \frac{3\alpha_r P_0}{4\rho r}, \quad (7)$$

где $\alpha_r = I/E_0$ – удельный реактивный импульс отдачи; E_0 – энергия лазерного импульса; I – реактивный импульс отдачи паров; r – усредненный радиус частицы.

Экспериментально найденное значение α_r [5] составляет для металлов $(1 \div 5) \cdot 10^{-5}$ Н·с/Дж, для легко испаряющихся диэлектриков $(10 \div 15) \cdot 10^{-5}$ Н·с/Дж.

Расчеты по формулам (2), (5), (6) и (7) показывают, при угле падения излучения $\theta \cong 85^\circ$ и плотности мощности в потоке излучения до $(1 \div 3) \cdot 10^{12}$ Вт/м² дополнительный нагрев подложки не превысит нескольких десятков градусов. При $P_0 = (1 \div 10) \cdot 10^{11}$ Вт/м² и $\tau \approx 10^{-9}$ с преобладает эффект очистки за счет десорбции газа, при этом достижимы ускорения отрыва частиц размером $1 \div 2$ мкм до $(0,5 \div 1) \cdot 10^8$ g; при увеличении мощности до $(1 \div 3) \cdot 10^{12}$ Вт/м² и тех же размерах частиц преобладает воздействие импульса отдачи, и ускорение отрыва частиц может достигать 10^{10} g.

Очистка подложки с помощью лазерного облучения позволяет совместить ее с технологическим процессом нанесения плёночных слоев на плоские подложки. Очистка может периодически повторяться без прерывания основного технологического процесса и без выноса подложки на атмосферу, что позволит практически полностью избавляться от случайных посторонних частиц, встраиваемых в наносимые слои или создающих в них сквозные дефекты.

Оптико-механическая схема устройства, предназначенного для лазерной очистки поверхностей подложек в технологическом процессе вакуумного напыления тонких плёнок, показана на рис. 1. Поток излучения плоского сечения $b \times D$ направляется на подложку 3, освещая всю ее поверхность под

углом падения θ . Излучение должно быть плоскополяризованным в плоскости падения на подложку.

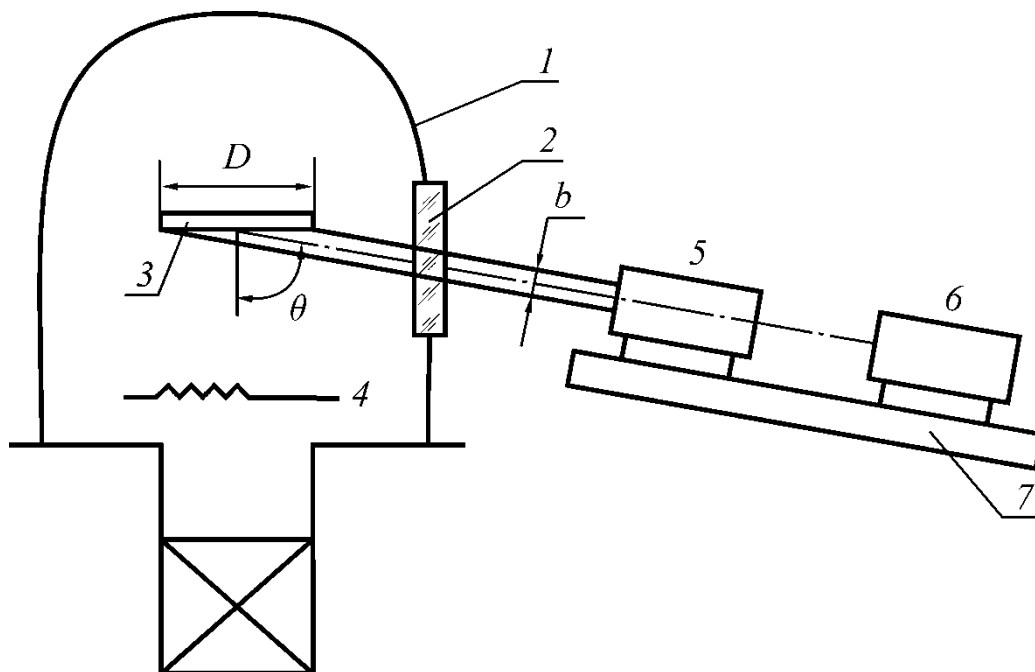


Рис. 1. Схема лазерной очистки подложек непосредственно в процессе вакуумного напыления покрытий – *in situ*:

1 – вакуумированный колпак напылительной установки, 2 – прозрачное окно, 3 – подложка диаметром D , подвергается облучению, 4 – испаритель вещества, наносимого на подложку, 5 – оптический коллиматор, 6 – лазерный излучатель, 7 – станина

При плотности мощности излучения P_0 полная мощность в луче определяется выражением:

$$P = P_0 \cdot b \cdot D, \quad b = D \cdot \sin \theta. \quad (8)$$

Если $D = 5 \cdot 10^{-2}$ м, $\theta = 85^\circ$, $P_0 = 10^{12}$ Вт/см², получим $P \approx 2 \cdot 10^8$ Вт. Полученное значение лазерной мощности в наносекундном импульсе могут обеспечивать серийно изготавливаемые твердотельные лазерные излучатели.

Экспериментальная проверка эффективности лазерной очистки производилась путем облучения поверхностей стеклянных подложек в условиях открытой атмосферы. На подложки предварительно наносились микрочастицы, имитирующие поверхностное загрязнение. Излучение лазера на алюмоиттриевом гранате с удвоением частоты (длина волны 0,53 мкм) носило импульсный характер с длительностью импульса ≈ 5 нс, диаметром пучка ≈ 3 мм и плотностью мощности $6 \cdot 10^8 \dots 2 \cdot 10^9$ Вт/см². Первоначально обрабатываемая поверхность подвергалась лазерному облучению, падающему с обратной стороны стекла под углами $0-85^\circ$ при плотности мощности $6 \cdot 10^8$ Вт/см². Частицы бронзовой пудры, имеющие максимальный размер 20–30 мкм, удалялись полностью за 10–12 импульсов. При угле падения 85° и облучении со стороны атмосферы частицы также удалялись, но при большей плотности мощности – $9,8 \cdot 10^8$ Вт/см². При дальнейшем увеличении плотности мощности,

до $2 \cdot 10^9$ В/см², для удаления частиц было достаточно 2–3 импульсов облучения. Подтвержден вывод о том, что для удаления более крупных частиц требуется большая лазерная мощность. Частицы размером более 30 мкм удаляются на порядок менее эффективно, чем размером в несколько микрометров.

В целом полученные экспериментальные результаты подтверждают модель лазерной очистки, представленную в [4] и уточненную в настоящем сообщении, свидетельствуют об эффективности очистки и возможности ее промышленного применения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лазнева Э.Ф. Лазерная десорбция / Э.Ф. Лазнева. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1990.
2. Коротеев Н.И. Физика мощного лазерного излучения / Н.И. Коротеев, И.Л. Шумай. – М.: Наука, 1991.
3. Чесноков, В.В. Лазерная очистка поверхностей от посторонних частиц / В.В. Чесноков // Изв. вузов. Сер. Приборостроение. – 1993. – № 3. – С. 81-83.
4. Чесноков В.В. Лазерные наносекундные микротехнологии / В.В. Чесноков, Е.Ф. Резникова, Д.В. Чесноков; под общ. ред. Д.В. Чеснокова. – Новосибирск: СГГА, 2003. – 300 с.
5. Взаимодействие лазерного излучения с металлами / А.М. Прохоров, В.И. Конов, И. Урсу, И.Н. Михаэлеску. – М.: Наука, 1988.
6. Зимон А.Д. Адгезия пыли и порошков / А.Д. Зимон. – М.: Химия, 1976.

© В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков, С.Л. Шергин, 2007

УДК 681.7.064.4

В.В. Чесноков, Е.Н. Чесноков, А.С. Сырнева
СГГА, Новосибирск

РАСЧЕТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УЗКОПОЛОСНОГО ФИЛЬТРА ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА СПЕКТРА

Обсуждаются вопросы создания оптических фильтров для дальнего ИК диапазона спектра. Исследования в области разработок таких фильтров ведутся давно [1]. Запуск в ИЯФ им. Будкера лазера на свободных электронах – нового точного источника излучения в терагерцовом диапазоне ИК спектра – увеличивает интерес к подобным исследованиям. Так в работе [2] описаны фильтры в виде интерферометра Фабри-Перо с использованием в качестве зеркала металлических сеток с размером ячеек меньше волны излучения, имеющей на длине волны $\lambda \sim 120$ мкм дисперсионную область $\Delta\lambda/\lambda \sim 2,9 \cdot 10^{-2}$ и разрешение $\lambda/\delta\lambda = 600$.

Представляет интерес рассмотрение возможности использования эффекта нарушенного полного внутреннего отражения при создании фильтров терагерцового диапазона. Такие фильтры для оптического диапазона спектра рассмотрены, например в [3].

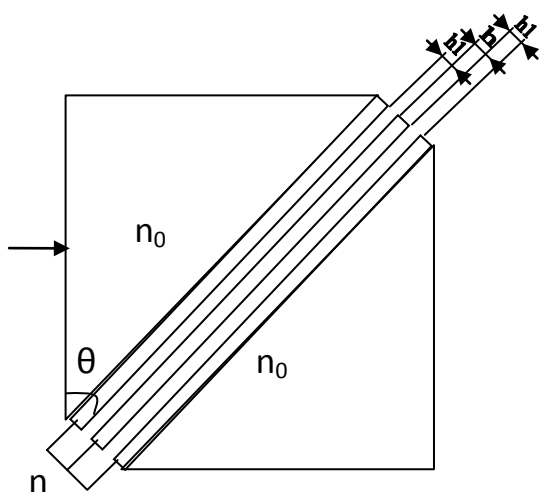


Рис. 1. Схема с нарушенным полным внутренним отражением

Схема рассматриваемого варианта светофильтра с нарушенным полным внутренним отражением изображена на рис. 1.

Между двумя полиэтиленовыми призмами с показателем преломления n_0 расположены три кремниевые пластины с показателем преломления n . Средняя пластина толщиной h отделена от крайних зазорами величиной h_1 , крайние соприкасаются с призмами. Средняя пластина является резонатором Фабри-Перо, зеркала которого – зазоры. Призма обеспечивает угол падения θ_0 излучения на первую по ходу луча пластину кремния; направление луча во всех пластинах характеризуется углом θ . Угол θ выбирается больше угла полного

внутреннего отражения для границы раздела кремний – воздух:

$$\theta > \arcsin(1/n) \quad (1)$$

Из полиэтилена свет проникнет в пластину кремния при любых θ_0 , так как $n_0 < n$.

Основные параметры резонатора Фабри-Перо при наклонном ходе лучей в нем определяются выражениями [4]:

– Длина волны максимума полосы пропускания

$$\lambda_{\max} = \frac{2nh \cos \theta}{m - \zeta / \pi}, \quad (2)$$

– Разрешающая способность

$$\frac{\lambda}{\delta \lambda} = \frac{m \pi \sqrt{T_{cp} R}}{1 - T_{cp} R}, \quad (3)$$

– Дисперсионная область

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} \approx \frac{1}{m}, \quad (4)$$

– Порядок резонатора

$$m = \frac{1}{\lambda} 2h \sqrt{n^2 \sin^2 \theta}, \quad (5)$$

где T_{cp} и R – энергетическая прозрачность среды между зеркалами и коэффициент отражения зеркал, ζ – изменение фазы при отражении от зеркал, n – показатель преломления (для кремния на длине волны ~ 100 мкм $n = 3,42$ [5]).

Коэффициенты отражения R определяются степенью нарушения полного внутреннего отражения при выходе излучения из кремния, которое вызвано помещением соседней кремневой пластинки в приповерхностную зону, в которой наблюдается энергия излучения электромагнитной волны. Таким

образом, выбирая значения h зазора, можно регулировать величину R вплоть до $R = 1$.

Коэффициент $T_{\text{ср}}$ определяется поглощением α излучения в среде на данной длине волны и равен:

$$T_{\text{ср}} = 1 - 2\alpha h. \quad (6)$$

Для получения дисперсной области $\Delta\lambda/\lambda = 0,1$ требуется работа резонатора в порядке $m = 10$. При этом $h \approx m\lambda/2n \approx 150$ мкм.

В соответствие с [5] на длине волны $\lambda = 100$ мкм для высокоомного кремния ($\rho > 40 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) $\alpha \approx 0,8 \text{ см}^{-1}$, получим $T_{\text{ср}} \approx 0,98$. Принимая $R = 0,97$, в соответствие с (3) получим $\lambda/\delta\lambda \approx 630$. Регулируя зазор h_1 , можно управлять величиной R и тем самым, изменять разрешение.

Спектральные характеристики пропускания нами рассматривались численно в соответствии с анализом в [3] по формуле:

$$\frac{R}{D} = \frac{sh_2 2\gamma \cos^2(\alpha + \nu_1)}{\sin^2 \zeta \cos^2 \nu_1}, \quad (7)$$

где R и D – коэффициенты отражения и пропускания фильтра, причем $D = 1 - R$;

$$\gamma = kh_1 \sqrt{n^2 \sin^2 \theta - 1} - \text{набег фазы на зазоре } h_1; \quad (8)$$

ζ – изменение фазы при полном внутреннем отражении;

$\alpha = k \cdot n \cdot h \cdot \cos \theta$ – набег фазы при прохождении лучом средней пластины;

ν_1 – изменение фазы волны на границе между пластиной и зазором; вычисляются по формуле:

$$\text{tg} \nu_1 = \text{th} \gamma \text{tg} \zeta; \quad (10)$$

Для различных поляризаций излучения величина ζ различна:

$$\text{tg} \frac{\zeta_{\parallel}}{2} = \frac{\text{sh} 2\beta}{\sin 2\theta_0}, \quad (11)$$

$$\text{tg} \frac{\zeta_{\perp}}{2} = \text{th} \beta \tan \theta_0, \quad (12)$$

$$\text{где } \text{ch} \beta = n \sin \theta. \quad (13)$$

При расчетах принимались следующие параметры фильтров:

$n = 3,4$; $m = 1$; $h = 13,6$ мкм; $h_1 = 47,6$ мкм;

Результаты расчетов приведены на рис. 2-6.

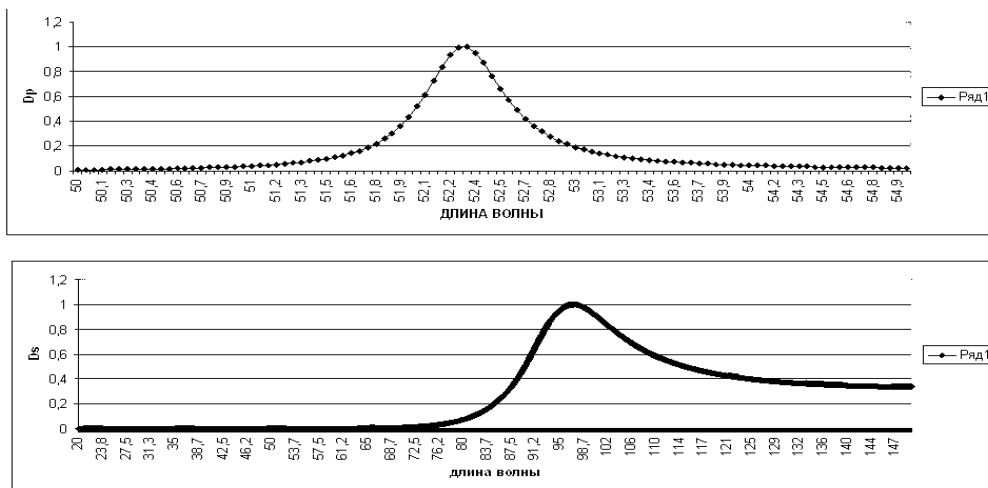


Рис. 2

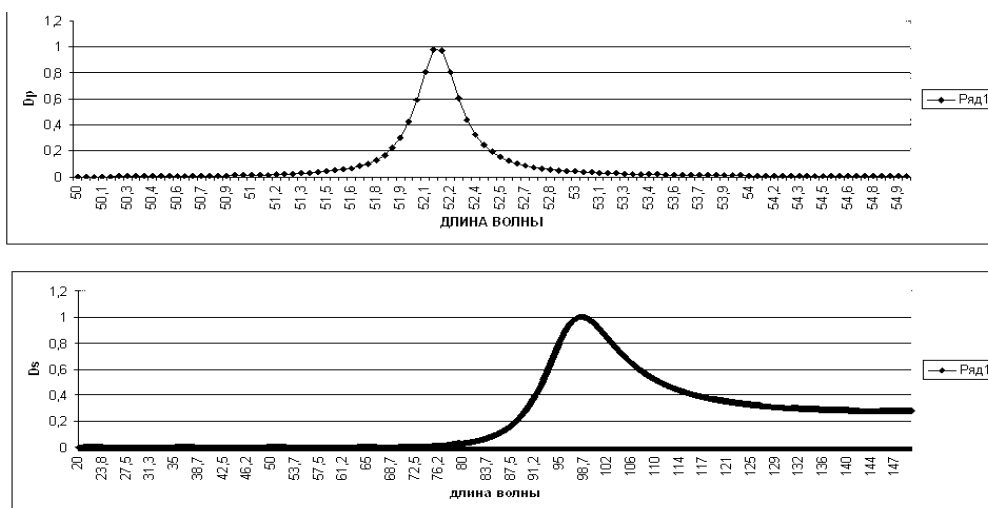


Рис. 3

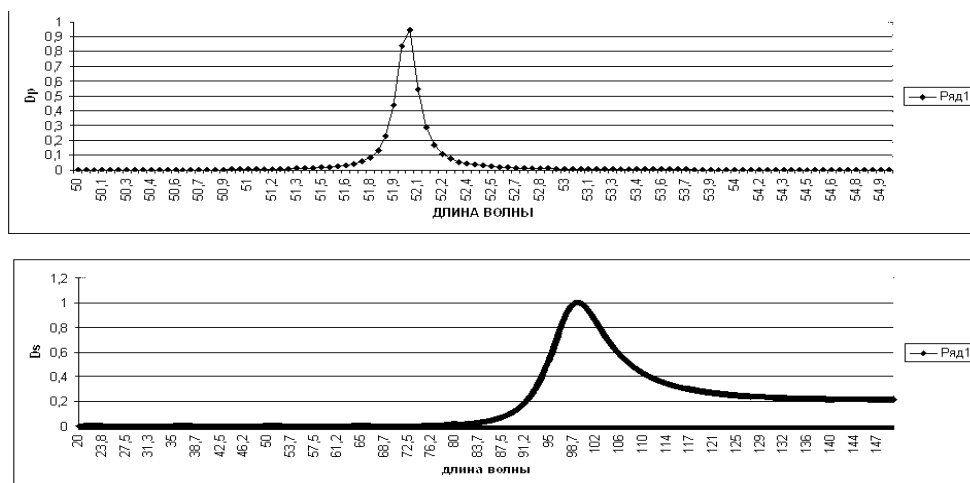


Рис. 4

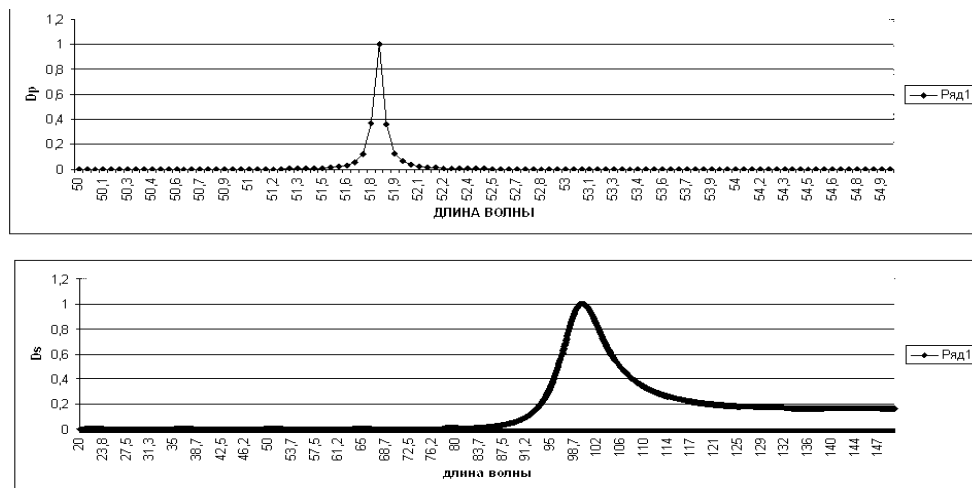


Рис. 5

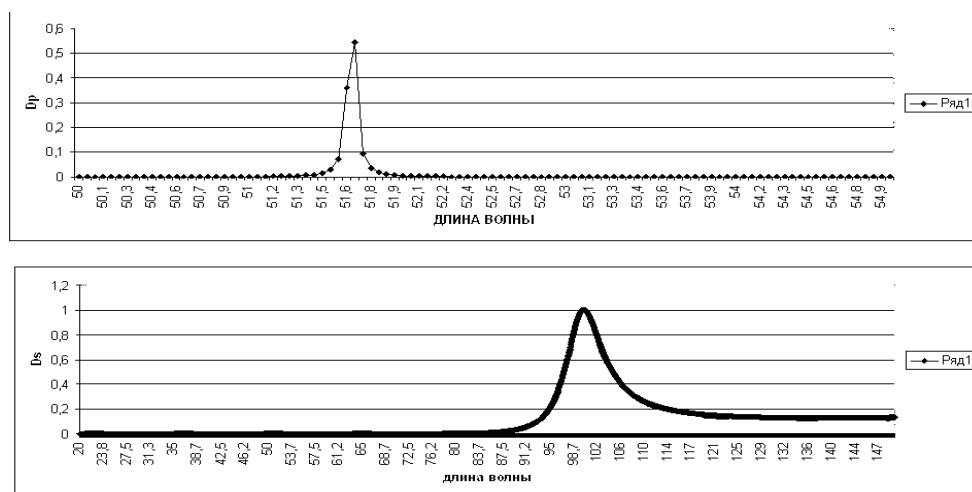


Рис. 6

На рис. 2 угол $\theta = 19^\circ$; на рис. 3 угол $\theta = 19,5^\circ$; на рис. 4 угол $\theta = 20^\circ$; на рис. 5 угол $\theta = 20,5^\circ$; на рис. 6 угол $\theta = 21^\circ$; по вертикальной оси отложены значения коэффициента пропускания светофильтра; по горизонтальной оси отложена длина волны излучения в мкм.

Из рисунков видно, что при $m = 1$ разрешающая способность R поляризации $R = 87,2$ при $\theta = 19^\circ$; $R = 173,8$ при $\theta = 19,5^\circ$; $R = 519,5$ при $\theta = 20^\circ$; $R = 518,6$ при $\theta = 20,5^\circ$; $R = 516,7$ при $\theta = 21^\circ$. Разрешающая способность уменьшится при приближении угла падения к области полного внутреннего отражения. При изменении угла падения излучения на кремний на величину $\Delta\theta = 2^\circ$ линия пропускания фильтра сдвигается на $\sim 0,6$ мкм, при этом угол падения излучения на призму из воздуха изменится на $3,4^\circ$.

Вопрос о диапазоне перестройки линии пропускания фильтра путем изменения угла падения излучения на призму исследуется.

Были проведены также расчеты спектральных характеристик фильтров для значений порядка спектра $m = 5$. Полученные результаты не приведены из-за ограничения на объем публикации. Разрешающая способность таких фильтров больше пропорционально порядку спектра.

Полученные результаты подтверждают возможность разработки узкополосных фильтров с нарушенным полным внутренним отражением для диапазона спектра ~100 мкм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Длинноволновая инфракрасная спектроскопия. Сб. статей / Пер. с англ.; под ред. В.В. Мурзана. – М.: Мир, 1966.
2. E.I. Kolobanov, V.V. Kotenkov, V.V. Kuvarev, G.N. Kulipanov, A.N. Matveenko, A.D. Oreshkov, V.M. Popik, T.V. Salikova, S.S. Serednyakov, O.A. Shevcheko, M.A. Vinokurov. High resolution mesh Fabry-Perot interferometers in experiments on free electron and gas. lasers. IRMMW – THZ 2005, Williamsburg, Virginia, USA.
3. Кард П.Г. Анализ и синтез многослойных интерференционных пленок / П.Г. Кард. – Таллин: Валгус, 1971.
4. Скоков И.В. Многолучевые интерферометры в измерительной технике / И.В. Скоков. – М.: Машиностроение, 1987.
5. Оптические свойства полупроводников: справочник / В.И. Гавриленко, А.М. Грехов, Д.В. Кербутяк, В.Г. Литовчинко. – Киев: Наукова думка, 1987.

© В.В. Чесноков, Е.Н. Чесноков, А.С. Сырнева, 2007

УДК 621.382.002

А.Е. Чесноков

СГГА, Новосибирск

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР УПРАВЛЯЕМОГО РЕЗОНАТОРА ФАБРИ – ПЕРО

Целью исследования является изучение оптических характеристик слоев, составляющих структуру управляемого резонатора Фабри – Перо, и определяющих разрешающую способность микромеханического резонатора на его основе. Конструкция монохроматора и технология его изготовления представлены в работах [1, 2]. Резонатор Фабри – Перо состоит из двух оптически прозрачных пластин, закрепленных с малым воздушным зазором между собой. Обращенные к зазору поверхности пластин являются полупрозрачными зеркалами.

Расчет проводится на основе анализа, приведенного в [1].

Спектральная характеристика резонатора определяется формулой [3]:

$$I = \frac{T^2}{(1-R)^2} \times \frac{I_0}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \frac{\varphi}{2}}, \quad (1)$$

где R – коэффициент отражения; T – коэффициент пропускания; φ – разность фаз между соседними пучками падающего света; I_0 – интенсивность падающего пучка света.

Разность фаз определяется выражением:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} 2dn \cos r. \quad (2)$$

где λ – длина волны излучения, d – расстояние между зеркальными слоями, n – показатель преломления среды между зеркалами, γ – угол падения света.

При прохождении светового пучка через любой отражающий слой, часть его интенсивности поглощается этим слоем в соответствии с условием

$$T + R + A = 1, \quad (3)$$

где A – коэффициент поглощения.

В качестве материала для получения полупрозрачных зеркал резонатора используется Al_{000} . Для изготовления макетного образца фильтра использовалась, главным образом, технология вакуумного напыления (установки ВУ-1А и ВУП4 с интерференционным датчиком контроля толщины). Подготовка образцов производилась по стандартным для технологии интерференционных покрытий методикам [4]. В качестве материала жертвенного слоя при получении воздушного зазора между зеркалами использовался маннит [4], обладающий сравнительно низкими температурами плавления и кипения.

Для исследования оптических характеристик зеркальных покрытий на поверхности прозрачной стеклянной подложки изготавливалась трехслойная структура Al – маннит – Al . Алюминиевые слои были полупрозрачными, слой маннита имеет толщину $d = 215$ нм. Спектральная характеристика измерялась с помощью спектрофотометра СФ – 46 и показана на рис. 1.

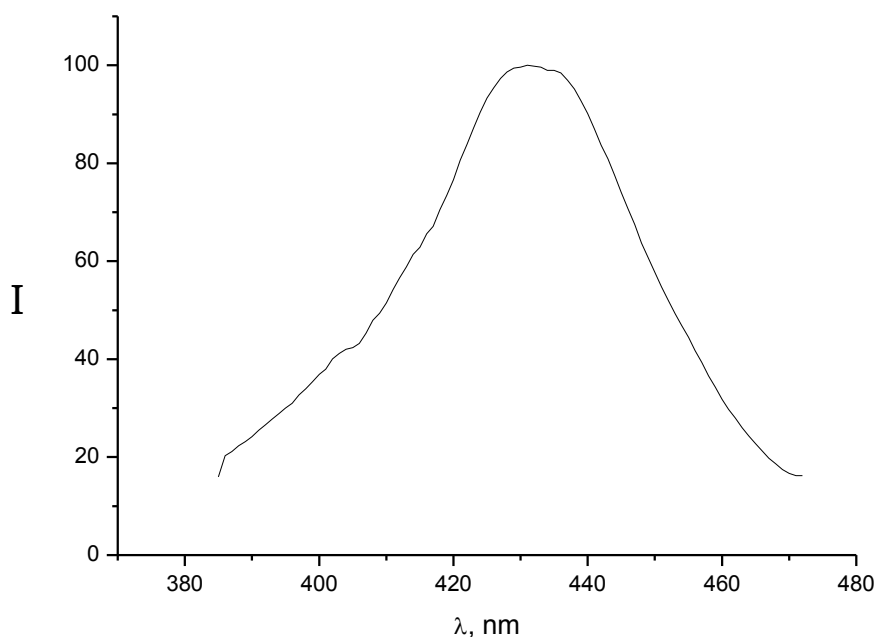


Рис. 1. Спектр пропускания многослойной структуры Al -маннит- Al

Как видно из рис. 1 спектральная ширина полосы пропускания структуры на уровне 0,5 равна ~ 40 нм.

При анализе полученного результата использовалось известное выражения для вычисления ширины пропускания резонатора Фабри – Перо [2]:

$$\delta\lambda = \lambda \frac{1 - T_{cp} \cdot R}{q \cdot \pi \cdot \sqrt{T_{cp} \cdot R}}, \quad (4)$$

где q – порядок спектра, T_{cp} – коэффициент пропускания среды, R – коэффициент отражения зеркального покрытия.

В нашем случае $q = 1$.

Из выражения (3) видно, что ширина полосы пропускания может определяться двумя неизвестными параметрами – поглощением среды и коэффициентом отражения R .

Чтобы разделить влияние этих двух параметров был измерен спектр поглощения маннита (рис. 2).

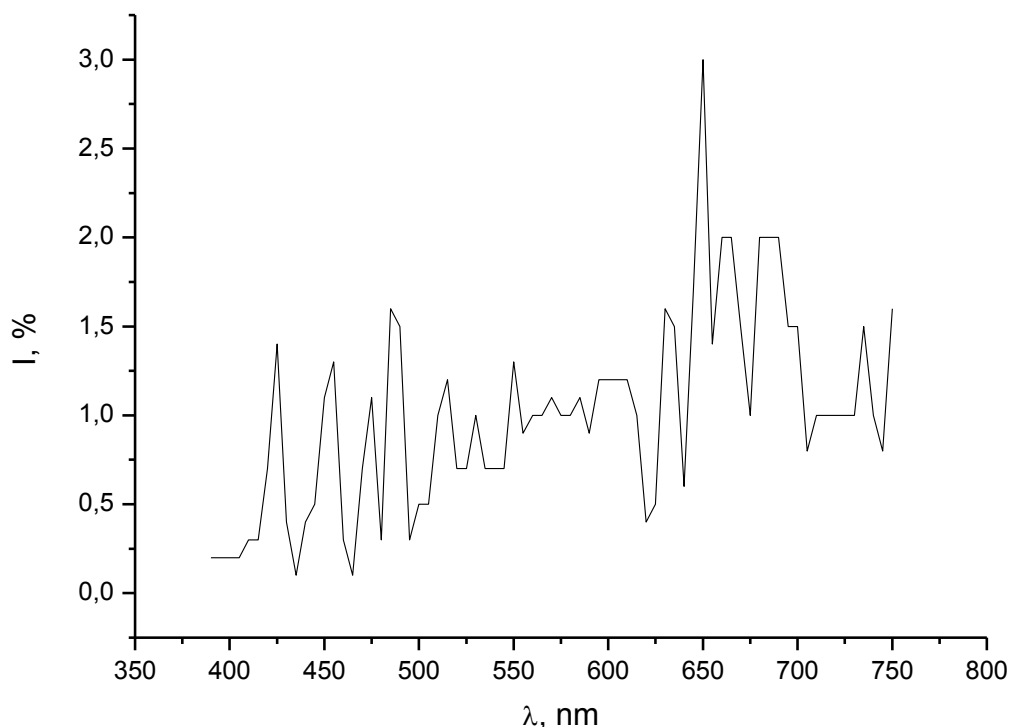


Рис. 2. Спектр поглощения маннита

Как видно из представленного спектра поглощения маннита во всем видимом диапазоне длин волн пренебрежительно мало, т. е. $T_{cp} \approx 1$. Подставим в (3) экспериментальные найденные значения $\delta\lambda = 40$ нм. Получим коэффициент отражения $R = 0,74$.

Обычное значение коэффициента отражения алюминиевого зеркального слоя [5], приготовленного нанесением в вакууме, составляет 0,85–0,9, то есть существенно больше полученной выше из спектральных характеристик величины. Одной из возможных причин малого значения R может быть ухудшение зеркальности слоя металла, наносимого на слой маннита, в связи с предполагаемой зернистостью слоя маннита.

Как нам представляется, проведенное исследование показывает возможность по измеренным спектральным характеристикам фильтров Фабри – Перо делать оценки о состоянии поверхности слоев структуры этих фильтров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чесноков Д.В. Исследование оптических характеристик управляемого микромеханического светофильтра / Д.В. Чесноков, А.Е. Чесноков // Материалы научно-технич. конф. СГГА «Соврем. проблемы геодезии и оптики». – Новосибирск, 2004. – С. 86–89.
2. Чесноков Д.В. Перестраиваемый миниатюрный монохроматор в микромеханическом исполнении для целей экспресс-анализа / Д.В. Чесноков, А.Е. Чесноков // Материалы научно-технич. конф. СГГА «Соврем. проблемы геодезии и оптики». – Новосибирск, 2005. – С. 102–105.
3. Ландсберг Г.С. Оптика / Г.С. Ландсберг. – М.: Наука, 1976. – 928 с.
4. Скоков И.В. Многолучевые интерферометры в измерительной технике [Текст] / И.В. Скоков. – М.: Машиностроение, 1989. – 238 с.
5. Фурман Ш.А. Тонкослойные оптические покрытия / Ш.А. Фурман. – Л.: Машиностроение, 1977. – 264 с.

© А.Е. Чесноков, 2007

УДК 535.34:66

Д.С. Михайлова, Д.В. Чесноков
СГГА, Новосибирск

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ПОГЛОЩЕНИЯ МЕТАЛЛООРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ФОТОИНДУЦИРОВАННОМ ОСАЖДЕНИИ ТОНКИХ ПЛЕНОК

Металлоорганические соединения (МОС) давно и успешно используются в различных отраслях науки и производства, главным образом для получения металлической фракции нужного состава и формы: нано- и микропорошков, тонкопленочных покрытий и т. п. Химическое разложение с выделением атомов металла идет по пиролитическому или фотолитическому сценарию.

Перспективными являются исследования [1] в области лазерографии тонкопленочных рисунков на различных поверхностях из паров МОС, в том числе карбониллов металлов. Метод носит название лазерноиндуцированного парофазного химического осаждения (ПФХО) и имеет устоявшуюся англоязычную аббревиатуру LCVD (Laser Chemical Vapor Deposition).

Большинство имеющихся экспериментальных данных по лазерному осаждению тонких пленок на подложки из паров МОС свидетельствует в пользу пиролитической модели [1], согласно которой лазерное излучение нагревает первоначально поверхность подложки, которая, в свою очередь, передает тепловую энергию адсорбированным молекулам карбонила, вызывая как их разложение на атом металла и газообразный СО, так и их десорбцию.

Однако, эта модель не объясняет факта роста металлических пленок на подложках, прозрачных для используемого лазерного излучения и, следовательно, не нагревающихся от его энергии. Можно предположить, что адсорбированный на поверхности слой карбонила сам поглощает свет на длине волны излучения лазера и разложение идет фотолитически, хотя в доступной

литературе таких данных нет. Возможно, спектр поглощения адсорбированного карбонила (связанного) отличается от спектра объемного материала.

Спектры поглощения металлов давно известны [2–4] однако о спектрах поглощения карбониллов этих металлов в известной литературе сведения не найдены.

Цель данной работы заключается в исследовании спектров поглощения карбониллов некоторых металлов, как в свободном виде (порошок), так и в связанном, например, в растворе.

В качестве исследуемых образцов были выбраны следующие карбонильные соединения: $\text{Mo}(\text{CO})_6$, $\text{Re}_2(\text{CO})_{10}$ и $\text{Cr}(\text{CO})_6$, которые представляют собой бесцветные, легкоплавкие кристаллические вещества. Так, $\text{Mo}(\text{CO})_6$ – вещество, кристаллизующееся в виде орторомбических кристаллов.

Поскольку карбонилы металлов лежат на стыке органических и неорганических соединений, они обладают специфическими свойствами. В табл. 1 приведены физические свойства карбониллов металлов [5].

Таблица 1. Физические свойства карбониллов металлов

Карбонил	Агрегатное состояние	Цвет	Температура, °С				Растворяются в следующих растворителях
			испарения	кипения	плавления	разложения (начало)	
$\text{Cr}(\text{CO})_6$	Тв.	Бесцв.	30	147	153	90	Хлороформ, эфиры, бензол, спирты.
$\text{Mo}(\text{CO})_6$	Тв.	Бесцв.	40	155	148	130	Эфиры, бензол, спирты, гексан.
$\text{Re}_2(\text{CO})_{10}$	Тв.	Бесцв.	140	Р	177	180	μ-гексан, бензол, эфиры, ТГФ, диоксан.

* Р – разложение до достижения температуры кипения.

Исследование спектров пропускания металлорганических соединений проводилось на спектрофотометре СФ-46, работающем в спектре от 190 до 1100 нм.

С начала нами было проведено исследование спектров пропускания металлорганических соединений, а затем были вычислены спектры поглощения этих же материалов по формуле (1).

$$\rho + \tau + \psi = 1, \quad (1)$$

где ρ – коэффициент поглощения, τ – коэффициент пропускания, ψ – коэффициент отражения.

Исследование спектров пропускания проводилось следующим образом: в кюветное отделение спектрофотометра были помещены две кюветы, изготовленные из кварцевого стекла, в одной из которых находилось исследуемое вещество.

Сначала проводились исследования спектров пропускания порошков карбонильных соединений: Mo(CO)_6 , $\text{Re}_2(\text{CO})_{10}$ и Cr(CO)_6 , затем необходимо было исследовать спектры пропускания расплавленных карбонилы металлов. Так как физические свойства исследуемых карбонилы металлов (табл. 1) не позволили получить расплав, то мы исследовали спектры пропускания их растворов.

Из технической литературы известны растворители растворяющие исследуемые карбонилы металлов (табл. 1), доступным растворитель 646. Состав растворителя 646: смесь бутилацетата, этилцеллозольва, ацетона, бутилового спирта, этилового спирта и толуола.

Для проведения исследования спектров пропускания необходимо было получить насыщенный раствор. Экспериментально были установлены следующие концентрации карбонилы металлов в растворителе: для гексакарбонила молибдена 0,83 г/л, для декакарбонила дирения 5,83 г/л, для гексакарбонила хрома 1,67 г/л. Увеличение концентрации карбонилы металлов в растворителе приводило к выпадению осадка.

На рис. 1, 2 и 3 изображены спектры пропускания карбонилы металлов как в порошкообразном виде, так и растворенных в органических растворителях (растворитель 646). Толщина слоя материала в обоих случаях составляла 1 мм.

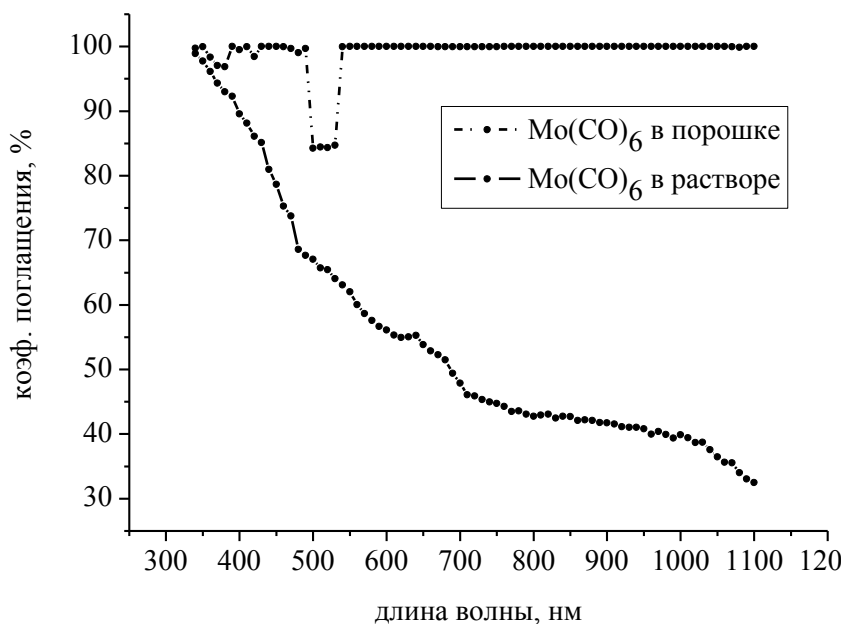


Рис. 1. Спектральные характеристики гексакарбонила молибдена в порошке и в растворе (растворенный в растворителе 646)

Хотя информативность определения коэффициента пропускания такого большого по толщине слоя порошка не ожидалась высокой — в результате многократных актов рассеяния на микрокристаллах карбонила весь свет должен быть поглощен — обнаружены участки спектра, на которых коэффициент поглощения существенно меньше единицы, особенно для карбонила молибдена (рис. 1) в диапазоне 495–530 нм.

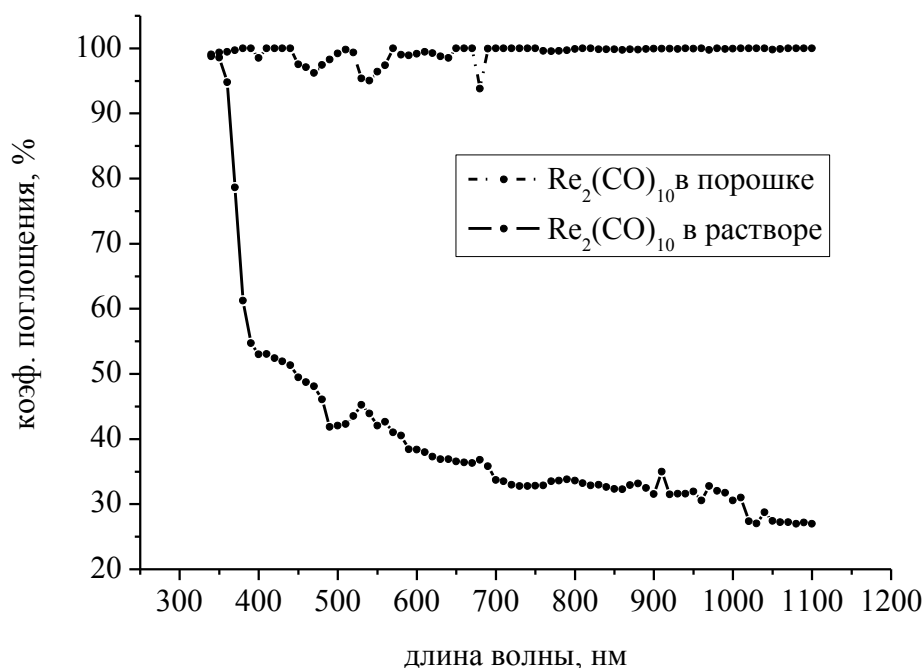


Рис. 2. Спектральная характеристика декакарбонила дирения в порошке и в растворе (растворенный в растворителе 646)

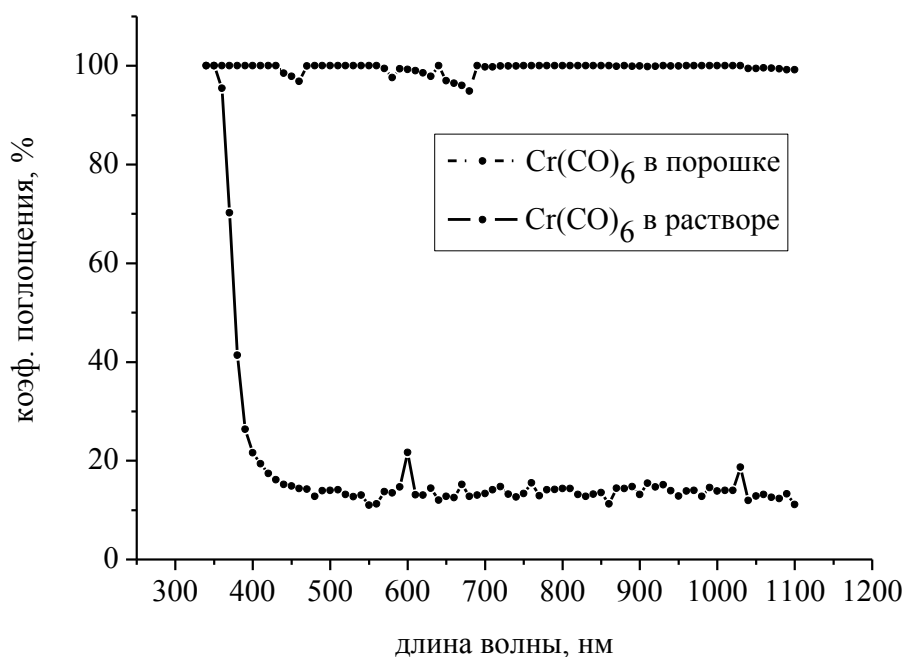


Рис. 3. Спектральная характеристика гексакарбонила хрома в порошке и в растворе (растворенный в растворителе 646)

Можно предположить, что карбонил молибдена имеет линию молекулярного поглощения на этой длине волны и спектр монокристаллического карбонила имел бы в этой области пик поглощения, а не пропускания, как у порошка. Объяснение может состоять в том, что диэлектрики вблизи линий поглощения имеют также область аномальной дисперсии, которой соответствует показатель преломления, равный 1, а слой мелкодисперсного порошка работает как дисперсионный светофильтр [6].

Экспериментально установлено также, что исследуемые металлоорганические соединения в связанном виде, то есть в органических растворителях, поглощают излучение в ультрафиолетовой области излучения.

Эти данные являются абсолютно новыми и требуют тщательной дополнительной проверки, в том числе другими методами. Исследования также будут продолжены для спектров поглощения других МОС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чесноков В.В. Лазерные наносекундные микротехнологии / В.В. Чесноков, Е.Ф. Резникова, Д.В. Чесноков; под общ. ред. Д.В. Чеснокова. – Новосибирск: СГГА, 2003. – 300 с.
2. Физические величины. Справочник / А.П. Бабичев, М.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др, под ред. И.С., Григорьева Е.З. Митликова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
3. Weaver J.H. Optical properties of metals I: the transition metals, $0.1 < h\nu < 500 \text{ eV}$. Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Zr, Nb, Mo, Ru, Rh, Pd, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt n Physics data, Optical Properties of Metals / J. H. Weaver, C. Krafka, D. W. Lynch, E. E. Koch. – Fachin Formation zentrum 7514 Eggenstein – Leopoldshafen 2, Karlsruhe, FRG, 1981. – P.300.
4. Hagemann H.- J. Optical constants from the far infrared to the x-ray region: Mg, Al, Cu, Ag, Au, Bi, C and Al_2O_3 / H.- J. Hagemann, W. Gudat, C. Kunz. // J. Opt. Soc. Am. – 1975. – Vol. 65, N. 6. – P. 742-744.
5. Сыркин В.Г. Карбонилы металлов / В.Г. Сыркин. – М.: Химия, 1983. – 200 с.
6. Лебедева В.В. Экспериментальная оптика / В.В. Лебедева. – М.: Изд-во МГУ, 1994.

© Д.С. Михайлова, Д.В. Чесноков, 2007

УДК 535; 621.375.826.004.14

А.В. Бритвин, Б.В. Поллер, Ю.И. Щетинин
ИЛФ СО РАН, Новосибирск

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО КАНАЛА С РАССЕЯНИЕМ В БЕСПРОВОДНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ И МИКРОСИСТЕМАХ

Оптические инфракрасные (ИК) каналы связи широко применяются для беспроводной передачи данных на расстояниях до нескольких километров и внутри помещений на расстояния до десятков метров. Преимущества таких каналов заключаются в высокой пропускной способности, мобильности и экономичности. В стандарте IEEE 802.11 ИК канал используется для передачи данных внутри помещений со скоростью до 11 М бит/с.

Аналогичный принцип использования рассеянного атмосферой оптического излучения передатчика для передачи данных к приемнику на расстояниях до сотен метров находится в настоящее время на этапе исследований и экспериментальных испытаний [1, 2]. Однако в отличие от ИК диапазона для канала связи с атмосферным рассеянием более эффективно использование ультрафиолетового (УФ) спектра оптического диапазона, поскольку здесь выше сечение рассеяния излучения, а поддиапазон с $\lambda < 290 \text{ нм}$ кроме того является «солнечно – слепым» из-за поглощения этой части солнечного излучения и других небесных тел верхними слоями атмосферы.

Следовательно, можно передавать данные при более низкой мощности оптического сигнала, чем в ИК каналах. К настоящему времени для УФ диапазона созданы достаточно эффективные и малогабаритные полупроводниковые светодиоды и фотодиоды, которые могут использоваться в качестве элементной базы для передатчиков и приемников систем коммуникаций [3, 4].

Геометрия канала связи с рассеянием показана на рис. 1.

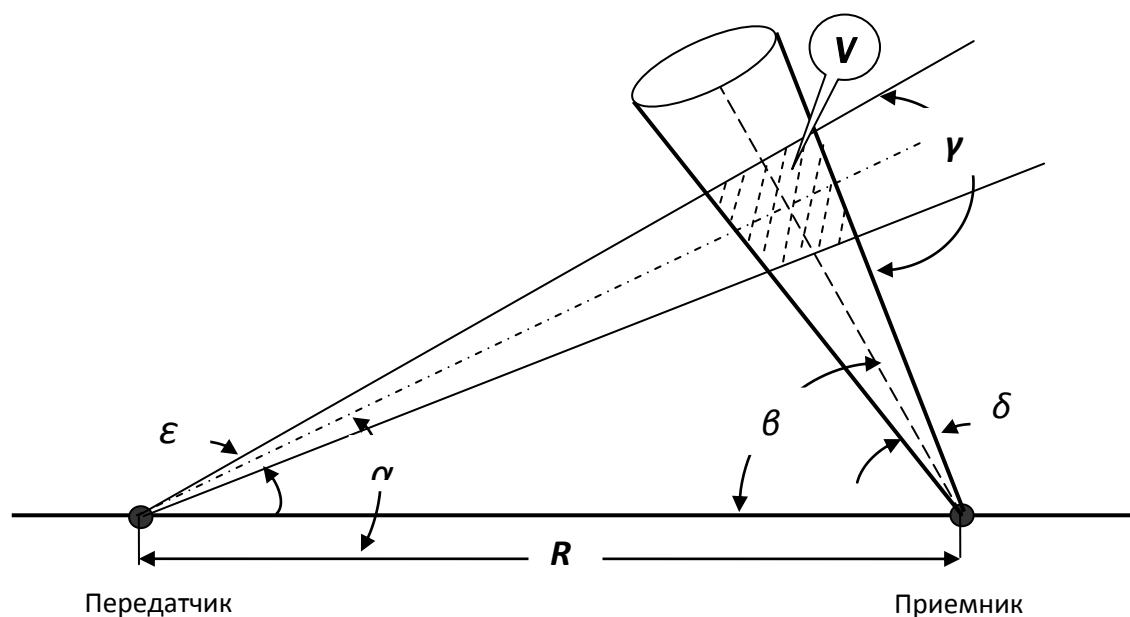


Рис. 1. Геометрия атмосферного канала с рассеянием

Рассеянное объемом V под углом γ излучение от передатчика попадает в фотоприемник, оптический сигнал демодулируется и преобразуется в коммуникационный протокол. Затухание оптического сигнала в среде распространения характеризуется отношением потоков излучения приемника Φ_r и передатчика Φ_t и может быть выражено через расстояние между передатчиком и приемником R , угловые величины и ослабление в атмосфере в виде

$$K = \frac{\Phi_r}{\Phi_t} = \frac{4P(\gamma)}{\pi(1 - \cos(\varepsilon/2))(\cos\alpha - \sin\alpha \cdot \operatorname{ctg}(\alpha + \beta))} \cdot \frac{S_r}{R} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\varepsilon}{2}\right) \operatorname{tg}^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \times \exp\left(-k(\lambda)R\left(\frac{\sin\alpha}{\sin(\alpha + \beta)} + \cos\alpha - \sin\alpha \cdot \operatorname{ctg}(\alpha + \beta)\right)\right) \quad (1)$$

где S_r – чувствительная площадь приемника,

$k(\lambda)$ – объемный коэффициент ослабления (рассеяния) атмосферой излучения с длиной волны λ .

$P(\gamma)$ – функция углового рассеяния на единицу объема и единицу телесного угла (индикатриса рассеивания).

Экспоненциальный член выражения (1) характеризует ослабление излучения в атмосфере. Его часть $\left(\frac{\sin\alpha}{\sin(\alpha + \beta)} + \cos\alpha - \sin\alpha \cdot \operatorname{ctg}(\alpha + \beta)\right)$ при $\alpha = 0^\circ \dots 90^\circ$ и $\beta = 0^\circ \dots 70^\circ$ изменяется в пределах $1 \dots 4$. Таким образом, ослабление в атмосфере оказывает незначительное влияние на передаточную характеристику канала рассеяния $K = \Phi_r / \Phi_t$, пока $k(\lambda)R\left(\frac{\sin\alpha}{\sin(\alpha + \beta)} + \cos\alpha - \sin\alpha \cdot \operatorname{ctg}(\alpha + \beta)\right) < 0,2$ или $k(\lambda)R < 0,05$, что для $R = 50 \text{ м}$ дает $k(\lambda) < 1 \text{ км}^{-1}$.

На рис. 2 показаны зависимости коэффициента ослабления $k(\lambda), \text{км}^{-1}$ от длины волны λ для УФ диапазона при метеорологической дальности видимости (МДВ) 29 км (очень ясная погода), 4 км и 1 км (дымка), рассчитанные по данным [5].

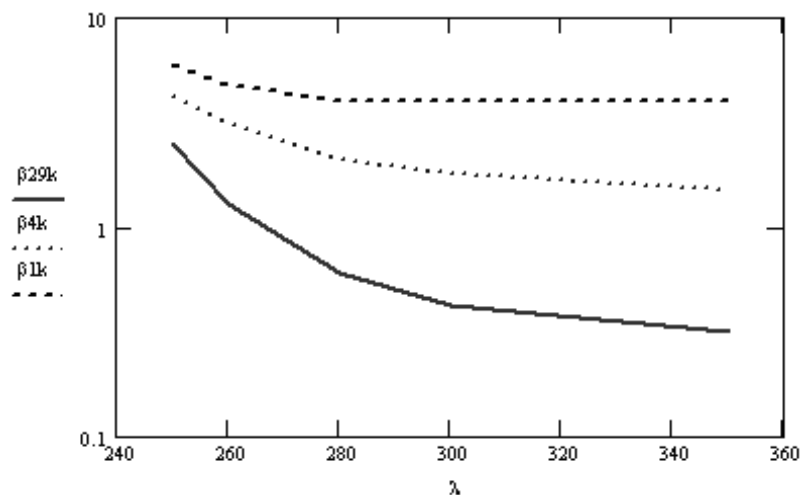


Рис. 2. Зависимости коэффициента ослабления $k(\lambda), \text{км}^{-1}$ от длины волны для УФ диапазона при различной МДВ

Из этих результатов следует, что в условиях ясной погоды и легкой дымки ослабление в атмосфере можно не учитывать по сравнению с геометрическими параметрами канала: расстояние источник – приемник, углы относительно горизонтали, угловая апертура приемопередатчиков.

В выражении (1) наиболее сложной для оценки является функция углового рассеяния $P(\gamma)$, поскольку для рассеивающего объема она зависит от

концентрации, размеров и формы частиц в объеме. Для ясной атмосферы преобладает изотропное молекулярное (релеевское) рассеяние с $P(\gamma) = 1$.

На рис. 3 изображена типичная нормированная зависимость углового рассеяния $P(\gamma)$ для аэрозольной атмосферы со степенной функцией распределения частиц в диапазоне размеров частиц $0,04 \leq r \leq 10$ мкм [6]. Значения $P(\gamma)$ увеличиваются для малых углов рассеяния и могут изменяться на два порядка.

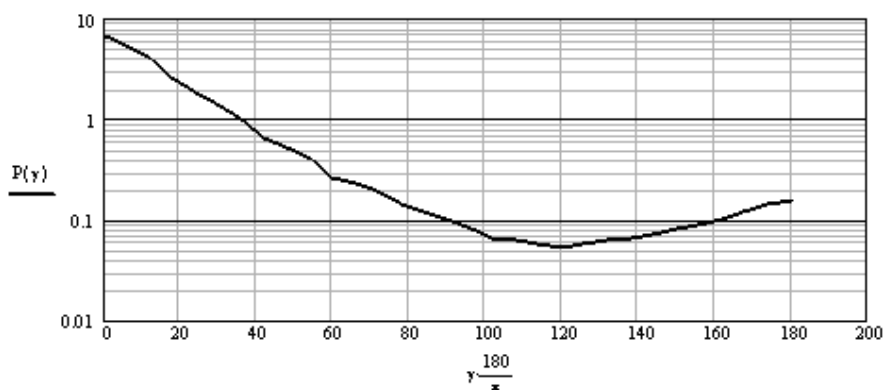


Рис. 3. Нормированная функция углового рассеяния для аэрозольной атмосферы со степенным распределением частиц

Рис. 4 показывает рассчитанную по выражению (1) передаточную характеристику канала рассеяния в зависимости от расстояния источник – приемник R , м для $\lambda = 280$ нм, $k(\lambda) = 0,004$ км⁻¹ (МДВ = 1 000 м), значений углов $\alpha = 60^\circ$, $\beta = 50^\circ$, $\varepsilon = 20^\circ$, $\delta = 30^\circ$, диаметра линзы приемника 6 см.

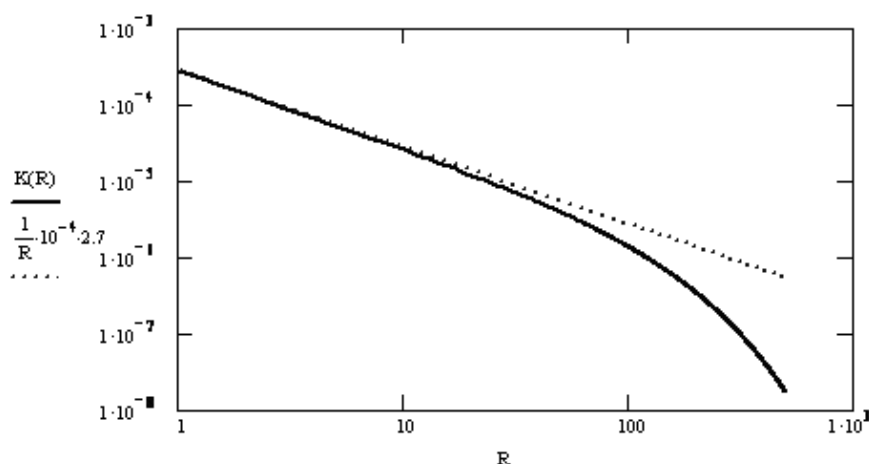


Рис. 4. Передаточная характеристика канала рассеяния в зависимости от расстояния источник – приемник

Как следует из выражения (1), передаточная характеристика канала при $R < 100$ м почти линейно зависит от расстояния, строго линейно – от чувствительной площади приемника, поэтому в таком канале для увеличения чувствительности должны использоваться широкоугольные источники и приемники. В обычном атмосферном оптическом канале прямой видимости при МДВ = 1 км атмосферное затухание составляет величину порядка 20 дБ/км. Такое же по порядку величины затухание для канала с атмосферным рассеянием характерно при расстоянии порядка 100 м, поскольку только малая часть рассеиваемого атмосферой излучения попадает в приемник. Тем не менее современные полупроводниковые УФ фотодиоды с низкими уровнями темнового тока позволяют детектировать такие низкоуровневые оптические сигналы.

Изменение метеорологических условий приводит к изменению передаточной характеристики канала. При этом увеличение аэрозольной составляющей влечет за собой возрастание уровня сигнала. При неравномерном распределении концентрации осадков можно выделить две крайние ситуации: неблагоприятную и благоприятную для канала с рассеянием. При неблагоприятном распределении осадков концентрация осадков в области рассеяния ниже, чем в других областях трассы. При этой ситуации рассеянный сигнал увеличивается незначительно, а потери по пути значительно возрастают. Благоприятная ситуация характеризуется большей концентрацией осадков в области рассеяния. При этом значительно увеличивается рассеяния сигнала, а потери возрастают незначительно.

На рис. 5 представлены расчеты для чистой атмосферы и снегопада с различным затуханием для канала с рассеянием (экспериментальные параметры затухания сигнала в снегопаде большой интенсивности 24.01.2007 г. в г. Новосибирске: $k_{\min} = 3 \text{ км}^{-1}$, $k_{\text{ср}} = 15 \text{ км}^{-1}$; $k_{\max} = 46 \text{ км}^{-1}$). Так как воздушные массы смещаются, идет чередование условий вдоль трассы. Как видно из графика флуктуация рассеянного сигнала возрастают с увеличением расстояния между абонентами.

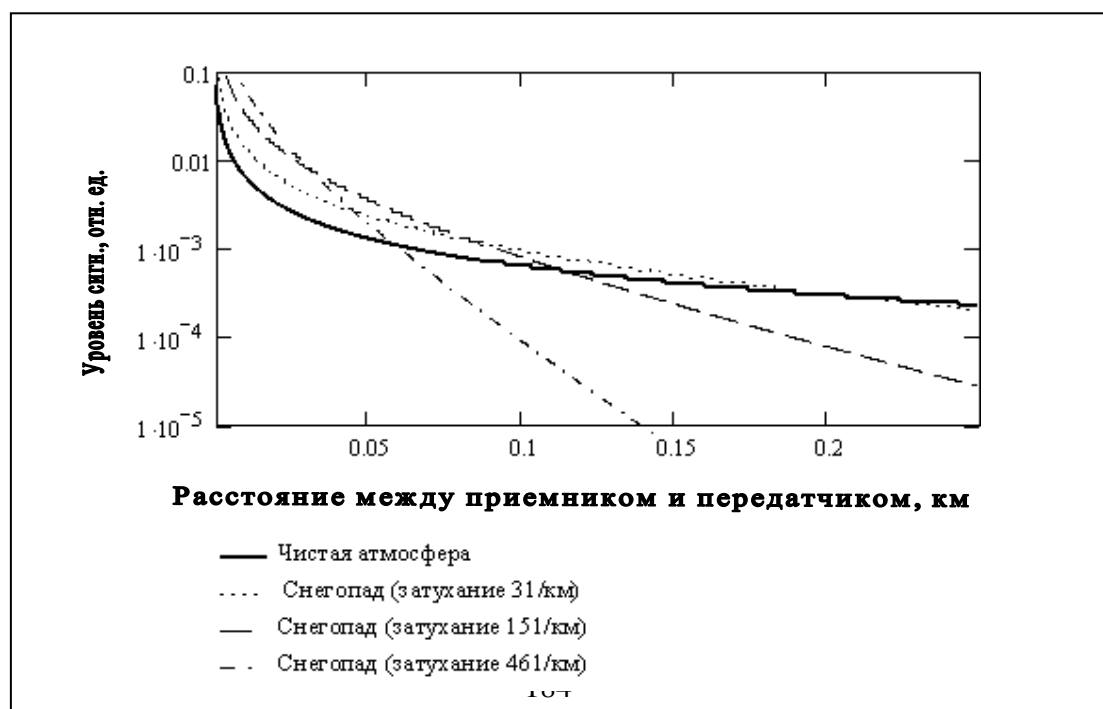


Рис. 5. Уровни сигнала для чистой атмосферы и снегопада различной интенсивности

Исследования затухания на трассе с прямой видимостью показали, что можно выделить три диапазона изменения уровня сигнала. Первый диапазон – медленные изменения интенсивности снегопада. Данные изменения происходят за времена выше десятка минут. Второй диапазон (средний) – изменения на фоне первого диапазона, связанные с порывами ветра и изменением концентрации снега в воздухе. Период изменения составляет 15–50 секунд. Третий диапазон – быстрые изменения сигнала связаны с флуктуацией частиц в луче.

На рис. 6 показаны сценарии возможных приложений канала с атмосферным рассеянием.

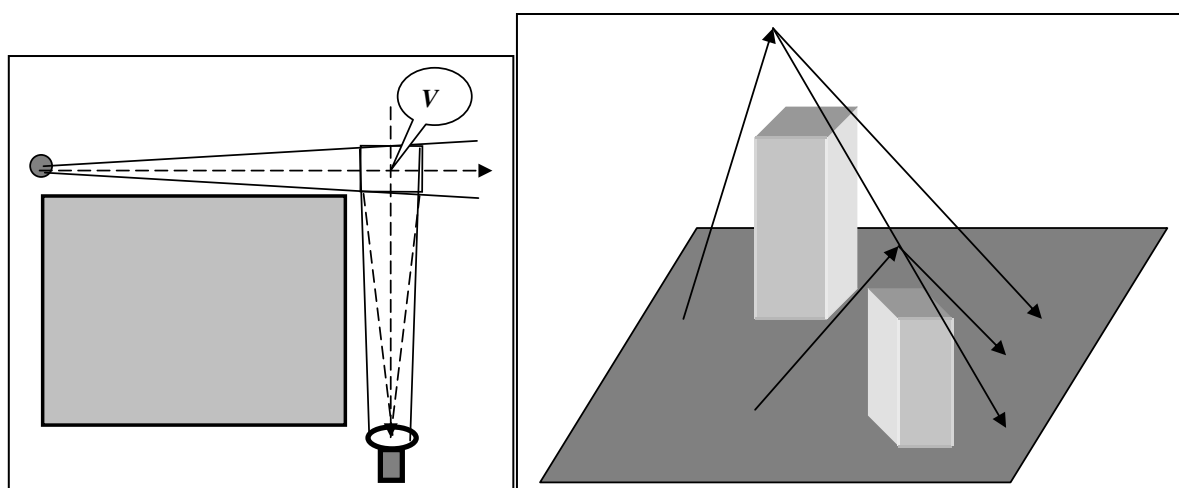


Рис. 6. Возможные приложения канала с атмосферным рассеянием

В подобных приложениях для коммуникаций между передатчиком и приемником может использоваться УФ канал с рассеянием, для которого нет необходимости в обеспечении прямой видимости. Примерами могут быть

коммуникации при наличии естественных преград местности, зданий, сооружений, деревьев и др. По мере увеличения числа мобильных устройств различного назначения, потребности в обеспечении беспроводной связи возрастают.

В [1] сообщается об экспериментальной проверке возможностей характеристик атмосферного УФ канала связи с рассеянием на базе макета системы для передачи речевых сообщений в реальном времени. В передатчике системы применен широкополосный газоразрядный излучатель в диапазоне 250–300 нм, средняя мощность передатчика не превышала 100 мВт. Для передачи речи использовалась частотно – импульсная модуляция. В качестве приемника применялся «солнечно – слепой» фотоэлектронный умножитель с оптическим фильтром и кварцевой линзой. Испытания проводились поздней осенью, при метеорологической дальности видимости 3–6 км. Расстояние между передатчиком и приемником составляло 1 км. Проведенные эксперименты подтвердили возможности передачи речи с высокой степенью разборчивости в УФ канале связи с рассеянием.

В [2] приведены результаты экспериментов по передаче речевых данных с помощью УФ канала на длине волны $\lambda = 275$ нм со скоростью передачи 2,4 Кбит/с.

Перспективно применение УФ канала с рассеянием в микросистемах, когда большое количество миниатюрных приемников размещается на небольших площадях, соответствующих зонам рассеяния УФ сигнала. В этом случае можно получить большое значение отношения сигнал /помеха в микросистеме при использовании излучения в «солнечно-слепом» диапазоне.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поллер Б.В. Телекоммуникационные технологии на основе ультрафиолетового канала связи с рассеянием / Б.В. Поллер, Ю.И. Щетинин // Докл. 9-й междунар. научно-техн. конфер. «Проблемы функционирования информационных сетей». – Новосибирск, 2006. – С. 229–233.
2. Gari A. Shaw, Andrew M. Siegel, Melissa L. Nischan Demonstration System and Applications for Compact Wireless Ultraviolet Communications.
3. Proceedings of SPIE Vol. 5071 (2003).
4. Бланк Т.В. Полупроводниковые фотопреобразователи для ультрафиолетовой части спектра: обзор / Т.В. Бланк, Ю.А. Гольдберг // Вестн. РФФИ. – 2003. – № 4.
5. Коняев С.И. Обзор некоторые характеристик ультрафиолетовых светодиодов для оптических информационных систем / С.И. Коняев, Б.В. Поллер, Е.В. Удальцов // Сб. докл. научн. конгр. «Гео-Сибирь-2006». – Новосибирск: СГГА, 2006. – Т. 4. – С. 181–183.
6. Мак-Картни Э. Оптика атмосферы / Э. Мак-Картни. – М.: Мир, 1979.
7. Справочник по инфракрасной технике / Ред. У. Волф, Г. Цисис. В 4-х т. – Т. 1. Физика инфракрасного излучения; пер. с англ. – М.: Мир, 1995.

© А.В. Бритвин, Б.В. Поллер, Ю.И. Щетинин, 2007

РАСЧЕТ ОБЪЕМНЫХ ГОЛОГРАММНЫХ ЛИНЗ ДЛЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО И МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ДИАПАЗОНОВ СПЕКТРА

Известно, что в устройствах микроскопии для вакуумной ультрафиолетовой и мягкой рентгеновской областей спектра в качестве основных оптических элементов используются пластины с многослойными интерференционными структурами, микронные пластинки Френеля и вогнутые отражающие зеркала [1]. Всем этим элементам присущи существенные недостатки, например, пластины с многослойными интерференционными структурами используются, как правило, в качестве фильтров только в отраженном свете, зонные пластины обладают низкой дифракционной эффективностью и большими хроматическими aberrациями, а значительные aberrации и низкое разрешение отражающих зеркал при скользких углах падения труднопреодолимы. Поэтому понятен интерес разработчиков к применению объемных голограммных линз для построения изображений в ультрафиолетовой и мягкой рентгеновской областях спектра [1–2]. Голограммные линзы отличаются высокой дифракционной эффективностью, высокой пространственной, угловой и спектральной селективностью. В настоящей работе рассматриваются объемные голограммные линзы, концентрирующие свет для освещения заданной области предмета и линзы, предназначенные для формирования изображения предмета. Целью настоящей работы является расчет объемных голограммных линз для ультрафиолетовой и мягкой рентгеновской областей спектра.

Известно, что расчет объемных голограммных линз состоит из двух основных частей: расчет схемы записи и расчет габаритных и оптических характеристик самой линзы. Если габаритный, aberrационный расчет и расчет других оптических характеристик объемных голограммных линз может быть выполнен с использованием компьютерных программ [3], то выбор оптимальных волновых фронтов схемы записи лучше сделать с помощью их зеркально-линзовых моделей. Особенности расчета схем записи объемных голограммных линз рассмотрены в [4].

На рис. 1,а и 1,б представлены схема записи и рабочая схема объемных голограммных линз. Используя эту же схему записи могут быть изготовлены голограммные зонные пластинки Френеля [1]. Точечные источники опорной z_r , объектной z_o волн (рис. 1а), восстанавливающей z_c и восстановленной z_i волн (рис. 1,б), расположены на оптической оси Oz . В общем случае, длины волн λ_c , λ_o , средние показатели преломления n_c , n_o и толщины голографической среды на стадии восстановления и записи различаются.

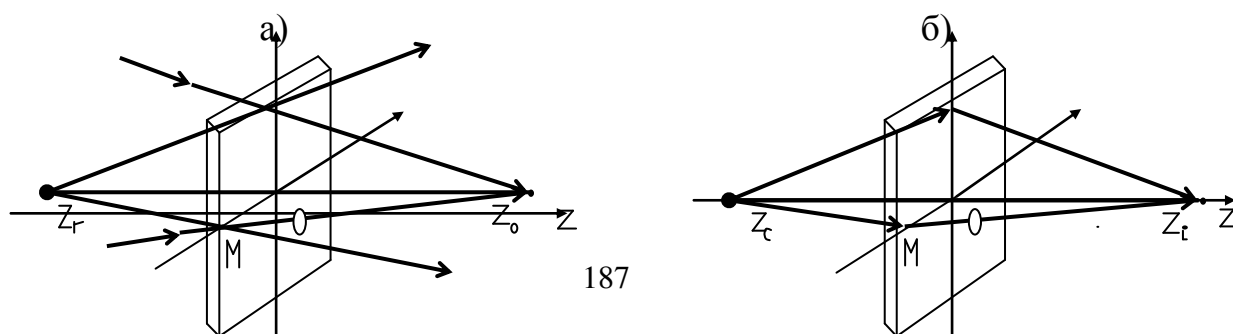


Рис. 1. Схема записи (а) и восстановления (б) объемного осевого ГОЭ

Согласно зеркально-линзовой модели объемные голограммные линзы можно представить в виде комбинации тонкой линзы и отражающего сферического зеркала. Аналитически эта модель описывается формулами [4]

$$\begin{aligned} 1/z_c - 1/z_i &= k\mu(1/z_r - 1/z_o)/m_r^2 = 1/F_1, \\ 1/z_c + 1/z_i &= (1/z_r + 1/z_o)/m_z. \end{aligned} \quad (1)$$

где k – порядок дифракции, m_r – коэффициент усадки в плоскости голографической среды, m_z – коэффициент усадки вдоль толщины среды, μ – отношение длин волн восстановления и записи внутри среды ($\mu = n_o\lambda_c / n_c\lambda_o$), F_1 – фокусное расстояние.

Если же голограммные линзы представляют собой зонную пластинку Френеля, то формулы их зеркально-линзовых моделей имеют вид [5]

$$\begin{aligned} 1/z_r - 1/z_o &= (1/z_c \pm 1/z_i)m_r^2 / k\mu, \\ 1/z_r + 1/z_o &= [(-1/3 + 4k^2\mu^2/3m_r^2 \pm 4k^2\mu^2F^2 / m_r^2z_iz_c)^{1/2} \pm 1]m_r^2/k\mu. \end{aligned} \quad (2)$$

В формулах (2) верхний знак плюс соответствует отражательным рельефным зонным пластинкам Френеля и киноформам, а нижний знак минус – пропускающим тонким зонным пластинкам Френеля.

Решая системы (1) и (2) относительно $1/z_r$, $1/z_o$, получаем

$$\begin{aligned} 1/z_r &= m_r^2(P_c + 1)/2k\mu F_1, \\ 1/z_o &= m_r^2(P_c - 1)/2k\mu F_1, \end{aligned} \quad (3)$$

где параметр $P_c = \pm\mu m_z(z_i / z_c + 1) / m_r^2(z_i/z_c - 1)$ для объемных голограммных линз и $P_c = (-1/3 + 4k^2\mu^2 / 3m_r^2 \pm 4k^2\mu^2F^2 / m_r^2z_iz_c)^{1/2}$ для тонких голограммных оптических элементов (зонных пластин Френеля). Для существования положительных значений во втором случае подкоренное выражение в P_c должно быть неотрицательным, что накладывает дополнительное условие на координаты источников опорной и объектной волн.

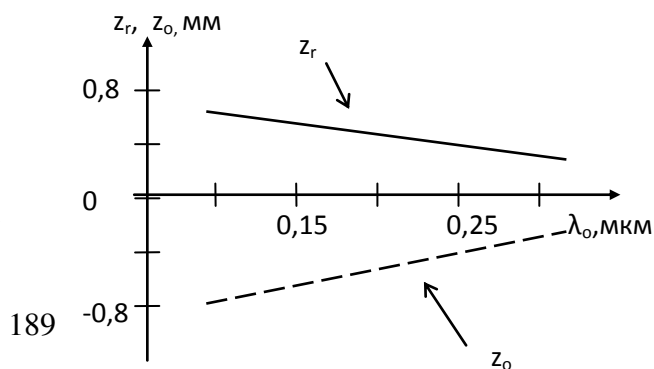
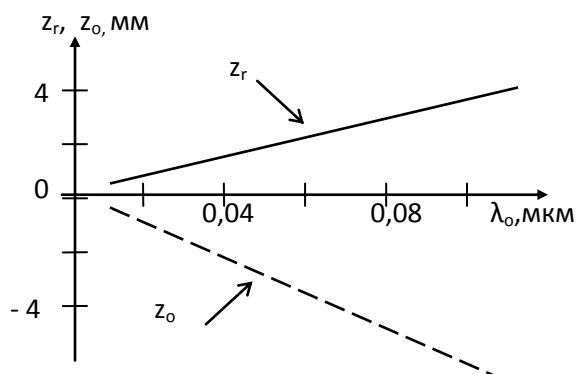
Определить радиус кривизны в центральной области голограммной линзы можно из условия отсутствия сферической аберрации [6]. Пренебрегая изменением радиуса кривизны R голограммной линзы между стадиями записи и восстановления, получаем

$$R = [1/z_c^3 - 1/z_i^3 + k\mu(1/z_r^3 - 1/z_o^3)/m_r^4] / [2/z_c^2 - 2/z_i^2 - k\mu(2/z_r^2 - 2/z_o^2)/m_r^4]. \quad (4)$$

Известно, что объемные голограммные линзы внешне могут быть очень похожи на обычные стеклянные линзы, хотя их внутренние структуры существенно различаются. Это различие вызвано тем, что действие голограммных линз основано на явлении дифракции, а обычных линз – на явлении рефракции. При расчете габаритных параметров голограммных линз определяются их оптимальные радиусы кривизны и толщина. В отличие от обычных прозрачных линз толщина объемной голограммной линзы играет очень важную роль, определяя не только ее дифракционную эффективность, но и пространственную, угловую и спектральную селективности. Кроме этого

пространственная и угловая селективности задают величину поля зрения голограммной линзы, а спектральная селективность – рабочий диапазон длин волн. Также эти характеристики зависят от длин волн записи и восстановления. Фокусное расстояние как тонкой, так и объемной голограммной линзы обратно пропорционально рабочей длине волны, поэтому ее разрешение в первом приближении не зависит от длины волны. Если голограммная линза используется в широком спектральном диапазоне, то ее разрешение при больших длинах волн обычно ограничено aberrациями, а при малых длинах волн – относительным отверстием. Еще одной отличительной особенностью является единственность схемы восстановления. Другие возможные схемы восстановления являются неоптимальными. Расчеты объемной голограммной линзы, в том числе и aberrационные, выполняются только для этой схемы. Одним из главных недостатков голограммных линз является наличие хроматических aberrаций. Именно по этой причине, если для получения изображения в видимом диапазоне спектра используются источники белого света, то изображения получаются окрашенными в разные цвета радуги. Указанные известные особенности расчетов объемных голограммных линз проявляются как в видимой и инфракрасной, так и в ультрафиолетовой и мягкой рентгеновской областях спектра.

Формулы (3) для объемных голограммных линз позволяют выполнить расчеты в более широкой области спектра, чем для тонких голограммных линз. При выполнении расчетов показатель преломления голограммной линзы для мягкой рентгеновской области спектра принимают равным единице, поэтому в первом приближении не требуется учитывать отражения и преломления на поверхностях голограммных линз. На практике чаще всего требуется два типа объемных голограммных линз: конденсорные линзы, концентрирующие свет для освещения заданной области предмета и линзы, предназначенные для формирования изображения предмета. В качестве примера рассматриваются голограммные линзы для вакуумного ультрафиолетового (рабочая длина волны $\lambda_c = 50$ нм) и мягкого рентгеновского (рабочая длина волны $\lambda_c = 4,5$ нм) диапазонов спектра. Расчеты зависимостей координат источников z_r , z_o опорной и объектной волн от длины волны записи для конденсорных голограммных линз в мягкой рентгеновской и ультрафиолетовой областях спектра представлены в виде графиков на рис. 2, 3. В интересующей нас ультрафиолетовой области спектра, зависимости положений источников волн при записи носят линейный характер (рис. 3). Что касается выбора длины волны λ_o записи, то зависимость положений источников от λ_o при записи голограммной линзы для мягкой рентгеновской области спектра линейна (рис. 2).



В отличие от конденсорной голограммной линзы при расчете изображающей голограммной линзы требуется исправление ее аберраций. В общем случае, для этого необходимы аберрированные записывающие волновые фронты. Кроме этого оптимальным выбором длины волны записи и радиусов кривизны голограммной линзы можно дополнительно уменьшить аберрации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рентгеновская оптика и микроскопия [Текст]/ под ред. Г. Шмаля, Д. Рудольфа. – М.: Мир, 1987. – 464 с.
2. Батомункуев Ю.Ц. Аберрации объемных голограмм [Текст] / Ю.Ц. Батомункуев, Е.А. Сандер, С.А. Шойдин // Тез. всесоюз. семинара "Автоматизация проектирования оптических систем". – М., 1989. – С. 101–112.
3. Ган М.А. Теория и методы расчета голограммных и киноформных оптических элементов [Текст] / М.А. Ган. – Л.: ГОИ, 1984. – 140 с.
4. Батомункуев Ю.Ц. Особенности расчета схем записи объемных осевых голографических оптических элементов с неизотропной усадкой [Текст] / Ю.Ц. Батомункуев // Автометрия – 2002. – № 2. – С. 108.
5. Батомункуев Ю.Ц. Расчет голограммных линз на основе зеркально-линзовой модели (Часть 1) [Текст] / Ю.Ц. Батомункуев // Материалы науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2005». – Новосибирск, 2005.
6. Батомункуев Ю.Ц. Особенности аберраций объемного вогнутого голографического оптического элемента / Ю.Ц. Батомункуев // Вестник СГГА. – Новосибирск, 2004. – Вып. 10. – С. 190.

© Ю.Ц. Батомункуев, Н.А. Мещеряков, 2007

УДК 621.315.592

В.И. Наливайко, А.Н. Покровский

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ В ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ ПЛЕНКАХ В ПРОЦЕССЕ ЗАПИСИ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

В настоящее время проводятся интенсивные исследования регистрирующих материалов для оптической записи информации. Поиск новых

регистрирующих материалов обусловлен развитием таких направлений в оптике, как оптические информационные технологии с высокой плотностью записи (CD и DVD диски), новые технологии для создания дифракционной оптики и фотонных кристаллов.

Одним из перспективных материалов для записи оптической информации, синтеза дифракционных элементов и фотонных кристаллов являются пленки халькогенидных стеклообразных полупроводников. Эти материалы интересны тем, что для считывания информации не требуется процесс проявления и информация может считываться одновременно с процессом записи, то есть в реальном времени. Другими достоинствами таких материалов являются:

1. Возможность чисто фазовой записи информации и дифракционных структур, что обуславливает отсутствие амплитудных потерь при считывании информации или восстановлении волновых фронтов дифракционных элементов.

2. В результате фотоструктурных трансформаций в пленках наблюдаются рекордно большие изменения показателя преломления $\Delta n = 0.2$, что позволяет в тонких слоях получать фазовые задержки в несколько длин волн. Например, в сравнении с ниобатом лития (LiNbO_3) халькогенидные пленки имеют преимущество по величине Δn более чем на порядок.

3. Высокая оптическая однородность пленок по толщине при напылении в вакууме на большие поверхности;

4. Пленки халькогенидных стеклообразных полупроводников являются неорганическими фоторезистами и позволяют осуществлять преобразование рельефа показателя преломления в геометрический рельеф с помощью селективного травления поверхности.

Целью настоящей работы является исследование изменений оптических параметров в процессе облучения пленок халькогенидных стеклообразных полупроводников с помощью рентгеноструктурной методики, компьютерное моделирование структуры пленок и построение структурной модели изменения их оптических параметров.

В качестве прямого метода исследования трансформации структуры аморфных пленок использован порошковый рентгеноструктурный анализ, широко применяемый для изучения поликристаллических твердых тел.

В кристаллических веществах основными параметрами структуры являются межатомные расстояния и величины углов химической связи. Знание этих параметров позволяет классифицировать кристаллические вещества с помощью описания их элементарных ячеек, трансляция которых определяет относительное расположение атомов в трехмерной упорядоченной решетке.

Аналогичное описание расположения атомов в некристаллических твердых телах в принципе невозможно. Однако общим свойством некристаллических материалов можно считать наличие ближнего и отсутствие дальнего порядка в относительном расположении атомов.

Существуют некоторые различия, которые позволяют провести разделение состояния неупорядоченных веществ на стекла и аморфные пленки.

Характерный признак стекла – возможность перевода его в расплавленное состояние, из которого, при соблюдении определенных условий охлаждения, можно вновь получить исходное стекло. Пленки, полученные напылением, могут иметь иную, более неравновесную структуру и их относят к аморфным веществам.

Некристаллические материалы обладают рядом характерных структурных признаков, в частности, чрезвычайно малыми размерами областей упорядочения, что резко ограничивает возможности применения известных методов изучения их структуры.

Для исследования структуры халькогенидных аморфных материалов мы использовали порошковый метод рентгеноструктурного анализа с применением синхротронного излучения комплекса ВЭПП-3 в качестве источника рентгеновского излучения.

Трисульфид мышьяка (As_2S_3) относится к числу неупорядоченных соединений, наиболее трудно кристаллизующихся. Обычно As_2S_3 получают из расплава в стеклообразном состоянии. При охлаждении расплава еще в жидком состоянии между атомами мышьяка и серы реализуются прочные ковалентные связи. Это приводит к появлению в расплаве сложных агрегатов с некристаллической структурой и к резкому возрастанию его вязкости. Уменьшение в этом случае подвижности атомов и кластеров в жидкой фазе препятствует достижению дальнего порядка в твердом As_2S_3 , так как требует разрыва многих из уже установившихся начальных связей и существенного перераспределения атомов. Именно поэтому затвердевающий трисульфид мышьяка, проходя через зону кристаллизации, преимущественно реализует только ближний порядок расположения атомов.

Дифракционную картину материала, имеющего ближний порядок в расположении частиц (но не имеющего дальнего порядка) можно рассматривать как картину усредненной интенсивности, возникающей от пространственного расположения атомов не далее одной элементарной ячейки, принимающей все возможные положения в пространстве. Такое рассмотрение аналогично постановке задачи о рассеянии лучей независимыми молекулярными образованиями. В этом случае роль «молекулы» играет элементарная ячейка.

Информация о структуре получена из прямых принципов – на основе сравнения экспериментальных и теоретических дифракционных картин. Теоретическая модель молекулярной структуры вещества строилась с применением программы “Powdercell 2.3”. Интерференционная составляющая дифракционной картины рассчитывались согласно гипотетическим пространственным моделям строения As_2S_3 соответственно межатомным расстояниям As_2S_3 [1] с помощью программы “Paters” по формуле Дебая:

$$I(s) = \sum_i^N \sum_j^N f_i(s) \cdot f_j(s) \frac{\sin(s \cdot r_{ij})}{s \cdot r_{ij}},$$

где $f_{i,j}$ – атомные факторы рассеяния, r_{ij} – межатомные расстояния, $s = (4\pi/\lambda)\sin \theta$, [$\text{\AA}^{-1}$] – импульс отдачи, θ – половина “брегговского” угла дифракции, λ – длина волны рентгеновского излучения.

Методом сравнения теоретических (рис. 1, кривая 1) и экспериментальных (кривая 2) картин рентгеновской дифракции в процессе компьютерного моделирования структуры пленок установлено количество молекул в нанообразованиях (восемь молекул As_2S_3 из 40 атомов), их взаимная ориентация, а также координаты всех атомов.

Структура пленок халькогенидного стекла представлена нами молекулярными образованиями из пяти атомов As_2S_3 , расположенных в пространстве на расстоянии $0,5c$, причем развернутые относительно центра молекулы на 90° . Затем эти молекулы последовательно транслированы на расстояния $0,5b$, $0,37a$ и $0,5c$. Параметры моноклинной элементарной ячейки $a = 11,562 \text{ \AA}$, $b = 9,2607 \text{ \AA}$, $c = 4,267 \text{ \AA}$, $\gamma = 90,82^\circ$ [1]. Сравнение экспериментальных дифракционных картин с теоретически рассчитанными картинками показало, что сильные дискретные отражения при $2\theta = 18^\circ$ в экспериментальных картинах появлялись при существовании трехмерного упорядочения молекулярных образований.

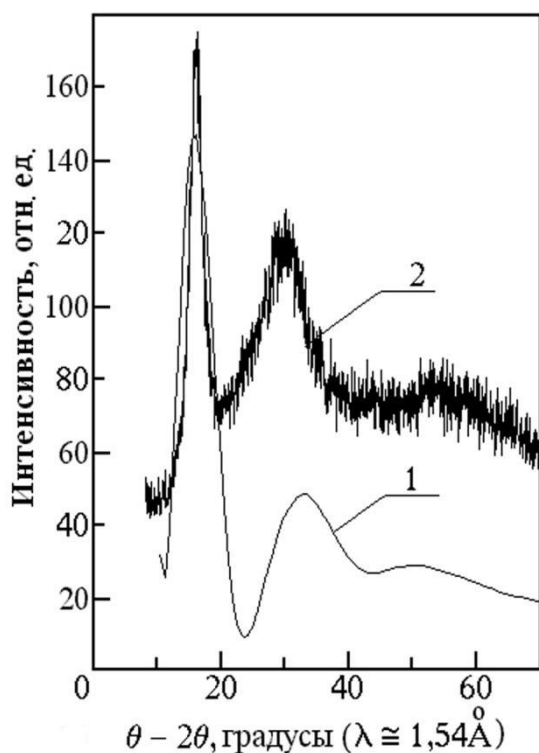


Рис. 1. Экспериментальная (1) и теоретическая (2) картины рентгеновской дифракции для термически напылённых в вакууме пленок As_2S_3 толщиной 5 мкм

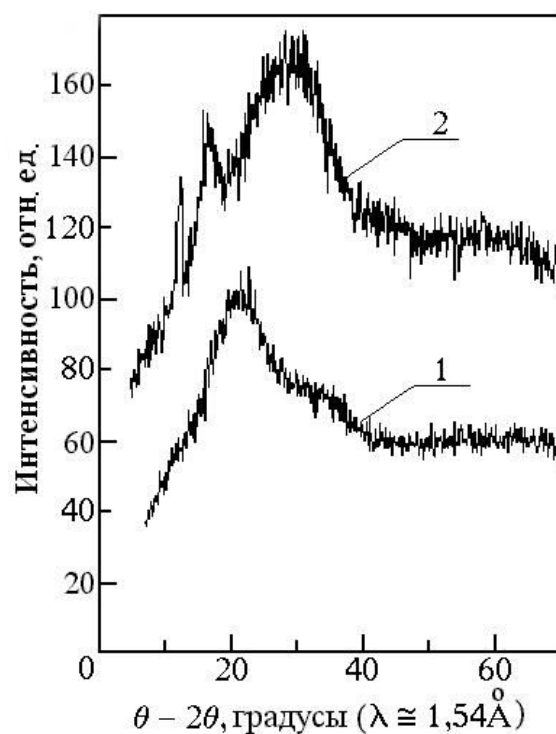


Рис. 2. Экспериментальные картины рентгеновской дифракции для пленках As_2S_3 : 1 – пленки, экспонированные лазерным излучением (плотность падающей энергии – 2 Дж/см^2 , $\lambda = 5145 \text{ \AA}$); 2 – пленки, облученные рентгеновским СИ (плотность падающей энергии – $11,9 \text{ Дж/см}^2$)

Экспериментальные дифракционные картины от тонких слоев (рис. 1) представляют собой картины, характерные для аморфного состояния с внутри- и межмолекулярной дифракцией. Слабо размытое интенсивное отражение при $2\theta = 18^\circ$ соответствует межмолекулярной дифракции на нанообразованиях – неискаженных молекулярных образованиях, причем размытие этого отражения связано с малыми размерами дифрагирующих образований $d = \approx 5 - 6 \text{ \AA}$. Сильно размытые отражения в дифракционных картинах при $2\theta = 30^\circ$, $2\theta = 58^\circ$, $2\theta = 85^\circ$ определяют внутримолекулярную дифракцию на этих единицах, связанных неупорядоченной, непрерывной, единой сеткой межатомных связей.

Главной структурный максимум межатомной дифракции при $2\theta = 30^\circ$ в стеклообразном As_2S_3 расположен на расстоянии, равном сумме ковалентных радиусов атомов мышьяка и серы. Поэтому можно утверждать, что ближайшие соседи в стекле – атомы разных сортов.

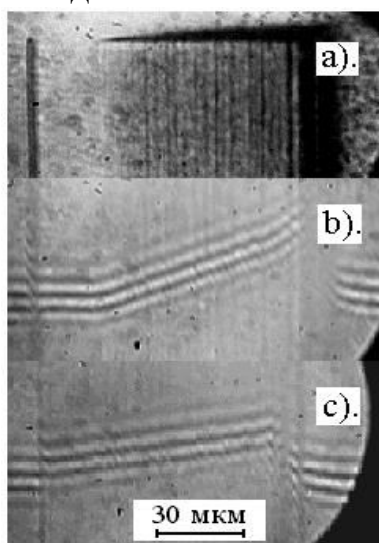


Рис. 3.
Оптическое
изображение (a) и
интерферограммы
рельфа поверхности
пленки (b) и (c)
тестовых записей
пилообразного
профиля в пленке

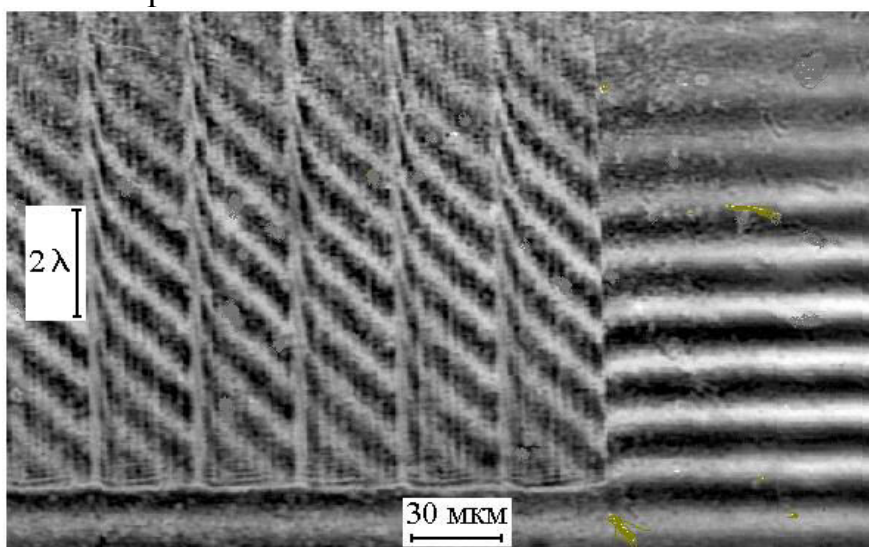


Рис. 4. Интерферограмма в проходящем свете
($\lambda = 0,55 \text{ мкм}$) фрагмента фазовой решетки с
треугольным профилем штриха глубиной 2λ

Такое представление картины позволило понять строение аморфного состояния как характерную для квазикристаллического состояния, другими словами, структура ближнего порядка формировалась из молекулярных образований – квазикристаллов как застывших отдельных образований с кристаллическим ближним порядком при отсутствии дальнего порядка [2, 3].

Установлено направление модификации структуры пленок в процессе взаимодействия с излучением – исходная аморфная пленка с молекулярными субнанообразованиями трансформируется в стеклообразное состояние с диффузным головным максимумом межатомной дифракции (рис. 2). На основании полученных результатов такие пленки можно отнести к

регистрирующим материалам с пространственным разрешением на молекулярном уровне.

Для наноструктурированных пленок As_2S_3 с их новыми механическими свойствами (слабая химическая связь между нанообразованиями и, как следствие, повышенная пластичность) разработана новая технология формирования глубоких фазовых профилей методом лазерного гравирования материала сфокусированным лучом ($\lambda = 0,48$ мкм).

На рис. 3 представлены изображение (а) и интерферограмма (b) поверхности пленки после тестовой записи лучом лазера с линейно нарастающей мощностью от 0 до 180 мВт последовательности дуг (шаг 0,5 мкм) для получения характеристической кривой регистрирующего материала на заданном радиусе подложки. После коррекции уровня мощности излучения, соответствующего началу зоны и пороговой интенсивности записи (50 мВт), был получен (с) линейный пилообразный профиль зоны.

С помощью лазерного гравирования получены киноформные фазовые профили (рис. 4) второго порядка дифракции высокоэффективных фокусирующих элементов ввода/вывода оптических пучков размером 5×5 мм² в планарный оптический волновод.

Работа выполнена при финансовой поддержке СО РАН в рамках программы фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ICSD Collection code № 15239.
2. Nalivaiko V.I., Yuryev G.S. Structural Studies of As_2S_3 Chalcogenide Films by X-Ray Synchrotron Radiation. Proc. of X APAM Topical Seminar and III Conference "Materials of Siberia" – "Nanoscience and Technology", 2 – 6 June, 2003, Novosibirsk, Russia, Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry SB RAS, Novosibirsk, 2003. P. 422–423.
3. Наливайко В.И. Получение фазовых структур в оптических материалах / В.И. Наливайко, Г.С. Юрьев, Б.Г. Гольденберг, М.А. Пономарева // "Поверхность". Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2003. – № 11. – С. 52–55.

© В.И. Наливайко, А.Н. Покровский, 2007

УДК 621.3.072.6; 621.375.826

Б.Д. Борисов, А.С. Дычков

СГГА, ИЛФ СО РАН, Новосибирск

СТАБИЛИЗАЦИЯ ЧАСТОТЫ ОПТИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ БЕЗ МОДУЛЯЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ

Космическая навигация и дистанционные методы зондирования, геомониторинг и другие технологии базируются на системах точного времени и позиционирования типа GPS или ГЛОНАСС, в основе которых находится генератор точного времени (часы) СВЧ или оптического диапазонов частот. Точность и стабильность такого генератора определяют и ограничивают точность и стабильность любой системы с их использованием. Создание оптической шкалы времени на базе фемтосекундных лазеров, привязанной к

опорному высокостабильному по частоте оптическому генератору с относительной нестабильностью частоты до 10^{-15} [1], стимулирует поиск физических и технических методов улучшения стабильности опорной частоты.

В традиционных способах активной стабилизации частоты лазера по экстремуму линии-репера для подстройки частоты резонатора лазера на максимум линии используется генератор пробного гармонического сигнала (ПГС), модулирующий длину резонатора [2], (рис. 1, пунктир)

$$U = \Omega_m \times \sin 2\pi f_m, \quad (1)$$

где Ω_m – амплитуда девиации и f_m – частота пробного сигнала.

Как правило, линия-репер – четная функция и для определения знака подстройки необходимо продифференцировать выходной сигнал. Поэтому выходное излучение резонатора детектируется на приемнике излучения, сигнал которого перемножается в демодуляторе (синхронном детекторе) с пробным сигналом, пропускается через фазочувствительный узкополосный усилитель, выделяющий нужную гармонику пробного сигнала, знак и величина которой пропорциональны градиенту (производной) выходной мощности излучения и используются для подстройки длины (частоты) резонатора с помощью управляющего элемента – пьезокорректора.

Очевидно, что подвергающийся систематической перестройке с частотой f_m и амплитудой Ω_m резонатор испытывает динамические искажения – модуляционное уширение линии и модуляционный сдвиг. В известном выражении «предельной нестабильности» – среднеквадратической ошибки флуктуаций частоты [3]

$$\sigma(\tau) = \frac{1}{\nu_0} \left\{ \frac{\Omega_m^2}{2(1 + \omega_m^2 \tau^2)} + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{[S_p(\omega) + S_n(\omega)] S_{\Lambda}(\omega) d\omega}{[S_{\Lambda}(\omega) + S_p(\omega) + S_{\Pi}(\omega)] (1 + \omega_m^2 \tau^2)} \right\}^{1/2} \quad (2)$$

член, пропорциональный амплитуде девиации Ω_m и круговой частоте $\omega_m = 2\pi f_m$ пробного колебания, вносит прямой вклад в нестабильность частоты, т.к. он не подавляется системой автоматической подстройки частоты (АПЧ). Здесь $S_{\Lambda}(\omega), S_p(\omega), S_{\Pi}(\omega)$ – соответственно спектральные плотности мощности технических флуктуаций оптической длины резонатора, репера и фотоприемника, ν_0 – частота излучения, τ – время.

Были получены оценки величин сдвигов для различных гармоник, сред и типов лазеров для дискриминатора на основе резонанса мощности излучения лоренцевой формы и найдено выражение, определяющее дисперсию сдвига частоты в зависимости от номера гармоники и амплитуды девиации [4, 5]

$$\sigma_v^2 \min = \sqrt{\frac{\bar{S}_{ш}^2 \cdot n!}{[\bar{S}^n(\nu_p)]^2}} + \Omega_m^2/2, \quad (3),$$

где $(\sigma_{v_{min}}^2)/2$ – минимум среднеквадратической ошибки модуляционного сдвига, $\bar{S}_{ш}^2$ – среднеквадратическое значение шумового сигнала, приведенного к входу фотоприемника, $\bar{S}^n$ – n -я производная (гармоника) выходного сигнала дискриминатора, ν_p – центральная частота резонанса. Из (3) видно, что минимум ошибки можно еще уменьшить, если положить $\Omega_m = 0$, $n = 0$, т. е. исключить дополнительный пробный сигнал. Таким образом, для высококачественных, стабильных систем, таких как стандарты частоты, традиционный способ стабилизации ограничивает относительную точность автоматической подстройки частоты, например, в оптическом диапазоне величинами 10-13 – 10-15.

Задача повышения стабильности частоты лазерного излучения за счет увеличения точности настройки резонатора на экстремум линии – репера решается за счет нового способа стабилизации, в котором в качестве пробного используется сигнал, пропорциональный флуктуациям частоты излучения лазера [6]. На рисунке 1 представлена функциональная схема стабилизированного по частоте лазера, реализующего способ. Лазер включает резонатор (1), образованный подвижным зеркалом ЗК1 (2), закрепленным на пьезокорректоре ПК1 (3), и неподвижным зеркалом ЗК2 (4), закрепленным на пьезодатчике ПД (5). Резонатор лазера содержит усиливающую среду и нелинейно поглощающую среду, формирующую узкую линию-репер. Излучение лазера регистрируется фотоприемником ФП (6), сигнал с выхода которого, усиленный в предварительном усилителе ПУ1 (7), подается на вход определителя знака градиента и амплитуды подстройки (8). Пьезодатчик ПД подключен к входу предварительного усилителя ПУ2 (9) и служит датчиком, регистрирующим пробный сигнал, возмущающий резонатор и пропорциональный флуктуациям частоты излучения лазера, который с выхода предварительного усилителя ПУ2 подается на второй вход определителя знака градиента и амплитуды подстройки. Выход определителя знака градиента через высоковольтный усилитель ВВУ (10), связан с управляющим пьезокорректором ПК1.

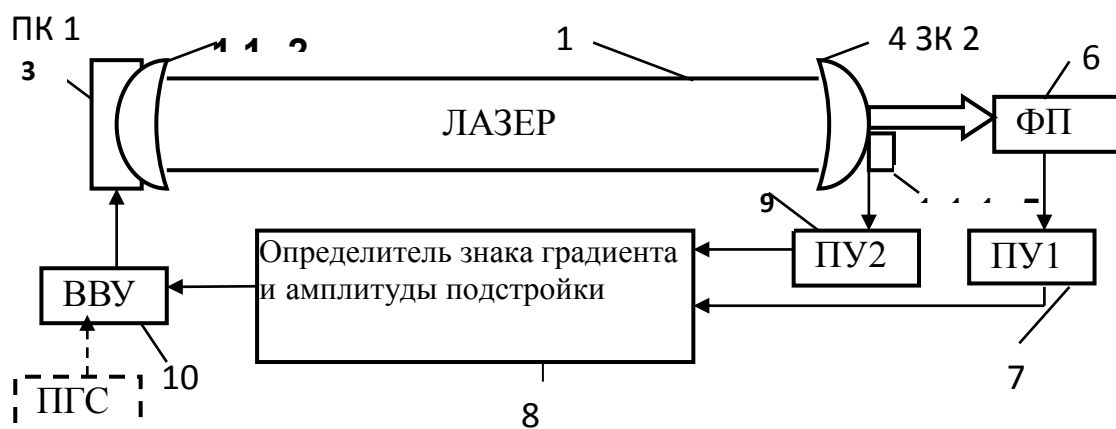


Рис. 1

Резонатор со своими элементами – зеркалами, фиксирующей арматурой, пьезокорректорами образует инерционную механическую систему, на которую действуют возмущения в инфранизком и акустическом диапазонах частот. В этом диапазоне (0.1–12 000 Гц) сосредоточена основная спектральная мощность возмущений, в том числе акустических и микросейсмических полей, поэтому и в известных системах стабилизации частота пробного сигнала выбирается в этом диапазоне. Пьезодатчик ПД закреплён на арматуре резонатора, а на нём, в свою очередь, закреплено зеркало. Механические возмущения, действующие на арматуру, вызывают перемещение зеркала через пьезодатчик. Сила, возникающая за счёт инерции зеркала, приводит к появлению на пьезодатчике (за счёт пьезоэффекта) электрического сигнала, который пропорционален амплитуде перемещения зеркала, следовательно, и изменению частоты лазера. Таким образом, возмущения, испытываемые всей системой резонатора, преобразуются пьезодатчиком ПД в электрический сигнал, несущий информацию о флуктуациях частоты.

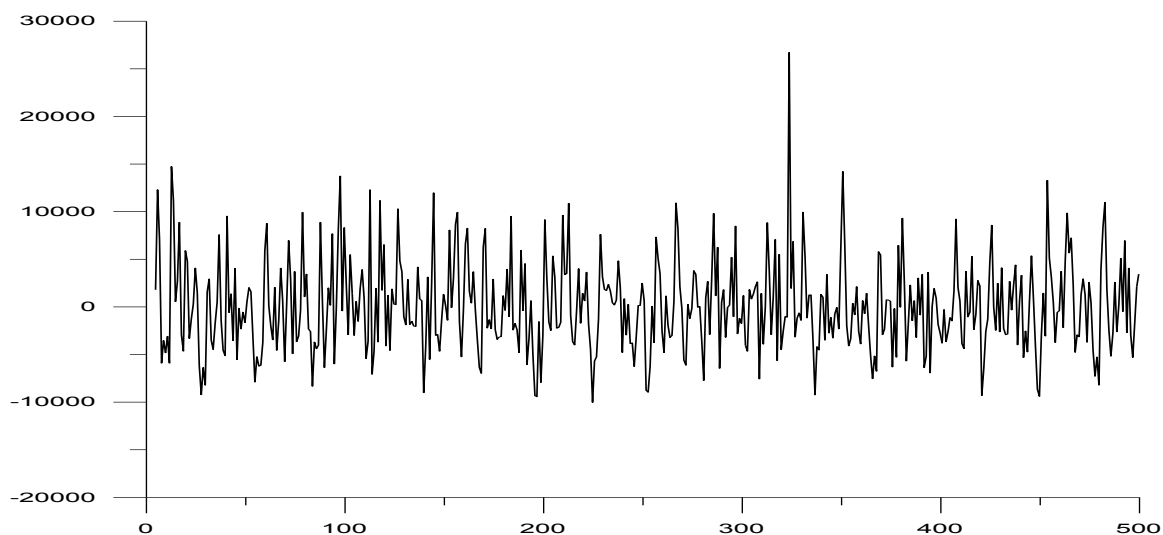


Рис. 2

На рис. 2 представлена динамика сигнала флуктуаций с пьезодатчика ПД He-Ne/CH₄ –лазера на выходе усилителя ПУ2 с $K_{yc} = 10^6$ с, интервал шага отсчета $\Delta n = 10^{-4}$ с и $n = 500$.

В определителе знака градиента, который может быть реализован или в виде программы, или в форме микропроцессора, по сигналам $U_{пу1}$ и $U_{пу2}$ определяется знак градиента $Sign(\partial U_{пу1} / \partial U_{пу2})$. При формировании управляющего сигнала подстройки для исключения высокого уровня вычислительных шумов, возникающих при определении градиента, можно использовать только знак текущего градиента, с учетом которого на управляющий пьезокорректор ПК1 от высоковольтного усилителя ВВУ подается сигнал управления постоянной, определяемой компромиссом между скоростью подстройки и точностью настройки на экстремум линии-репера,

амплитуды a со знаком текущего градиента. Сигнал управления U_n на каждом дискретном шаге подстройки n определялся с помощью алгоритма итерационного типа [7]

$$U_n = U_{n-1} + a * \text{Sign} [\partial U_n (\text{ПУ1}) / \partial U_n (\text{ПУ2})]. \quad (4)$$

На рис. 3 представлена динамика сигнала управления U_n (сигнал ошибки или расстройка Ω относительно требуемого уровня $\Omega_{\max}$) при работе по алгоритму (4) с постоянной амплитудой $a = 500$ Гц / шаг для стабилизации He-Ne лазера с внутренней метановой ячейкой по экстремуму узкого оптического резонанса с полушириной на полувысоте $\Gamma = 30$ кГц. Начальная расстройка $\Omega_0 = 10$ кГц. Для наглядности здесь представлена область расстроек Ω в окрестности экстремума $\Omega_{\max}$. Из левого графика рисунка 3 видно, что примерно за 200 шагов управляющий сигнал выводит и удерживает систему АПЧ на уровень экстремума резонанса $\Omega_{\max}$.

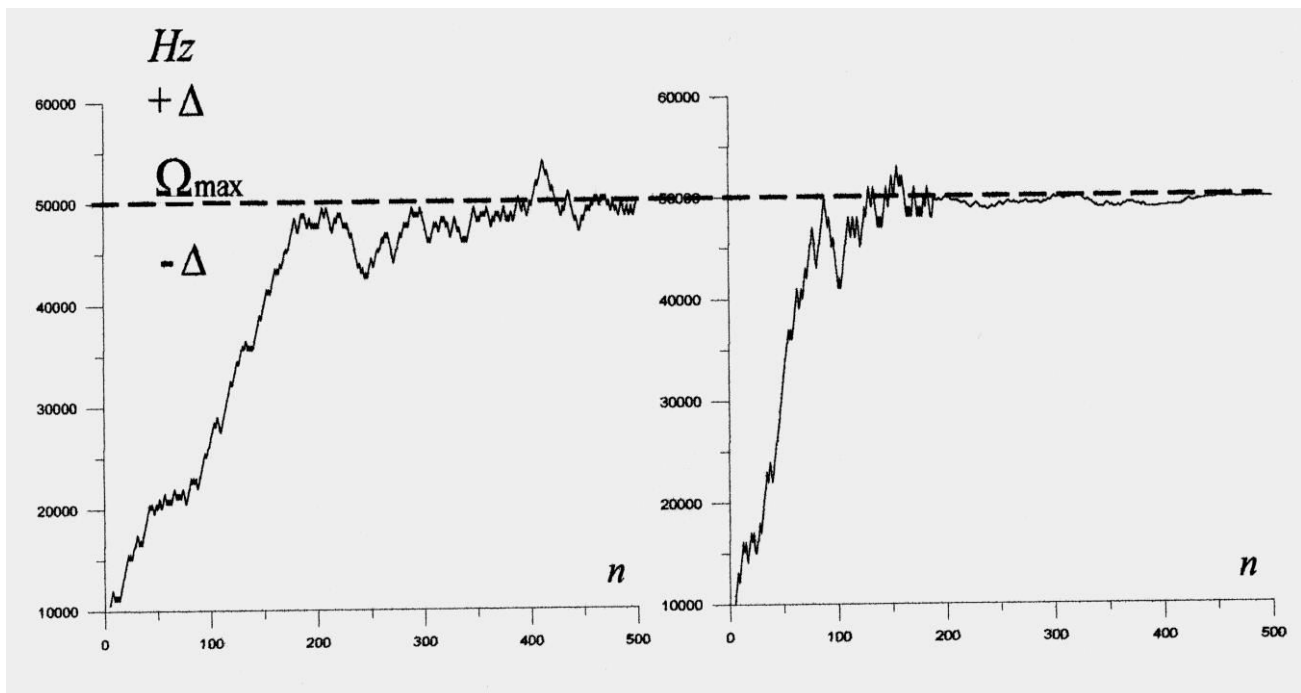


Рис. 3

Однако, при малых значениях амплитуды a скорость сходимости в область экстремума невысока, а при больших — ухудшается точность подстройки, поэтому целесообразно использовать переменную амплитуду сигнала подстройки. На правом графике рисунка 3 представлена динамика сигнала управления U_n при работе по алгоритму (5) с переменной амплитудой. Из этого рисунка наглядно видно, что скорость сходимости в область экстремума и

точность удержания рабочей точки системы АПЧ на уровень экстремума резонанса $\Omega_{\max}$ может быть улучшена по сравнению с работой с постоянным шагом.

Рассмотренный способ стабилизации частоты лазера отличается от известных тем, что не требует дополнительного генератора и пробного сигнала с большой амплитудой девиации, а прямо использует в качестве пробного сигнал, возмущающий резонатор. В формулах (2), (3), оценивающих точность, это соответствует исключению компоненты с амплитудой Ω_m . Так как эта амплитуда на несколько порядков превышает уровни используемых шумов $S_{\Lambda}(\omega), S_p(\omega), S_{\Pi}(\omega)$, это отличие позволяет исключить модуляционный сдвиг частоты, характерный при использовании гармонического пробного сигнала, снизить модуляционное уширение линии и существенно расширить полосу отработки возмущений резонатора, что потенциально приводит к повышению точности подстройки частоты лазера к экстремуму линии-репера и улучшению ее стабильности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Багаев С.Н. Синхронизация частоты излучения диодных лазеров с частотой мод высокостабильного фемтосекундного титан-сапфирового лазера / С.Н. Багаев, В.Ф. Захарьяш, В.М. Клементьев и др. // Квантовая электроника. – 2001. – Т. 31. – № 5. – С. 383–386.
2. Багаев С.Н. Лазерные стандарты частоты / С.Н. Багаев, В.П. Чеботаев // УФН. – 1986. – Т. 148. – Вып. 1. – С. 144.
3. Власов А.Н. Анализ влияния флуктуаций репера и длины резонатора на нестабильность частоты газового лазера и требования к сигналам автоподстройки / А.Н. Власов, В.В. Теселкин // Квантовая электроника. – 1976. – № 6. – С. 1299–1305.
4. Миронов А.В. Исследование сдвигов частоты лазера, стабилизированного по насыщенному поглощению в йоде / А.В. Миронов // Оптика и спектроскопия. – 1985. – Т. 58. – Вып. 5. – С. 1128–1132.
5. Гримблатов В.М. Исследование дискриминатора на основе насыщенного поглощения / В.М. Гримблатов, М.А. Зоммер // Оптика и спектроскопия. – 1986. – Т. 57. – Вып. 3. – С. 532–537.
6. Патент РФ № 266595. Российская федерация. Способ стабилизации частоты лазера и стабилизированный по частоте лазер / Б.Д. Борисов, А.С. Дычков. – Оpubл. бюл. 2005. – № 35.
7. Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах / Я.З. Цыпкин. – М., 1968.

© Б.Д. Борисов, А.С. Дычков, 2007

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Работа посвящена компьютерному расчету модели, описывающей лазерную генерацию как процесс самоорганизации. Такой подход позволяет на уровне модельных представлений решить задачу о динамической эволюции числа фотонов, генерируемых в процессе лазерного излучения.

Лазер (оптический квантовый генератор) – устройство, генерирующее когерентные электромагнитные волны за счет вынужденного испускания света активной средой, находящейся в оптическом резонаторе.

При традиционном рассмотрении принципа работы лазера обычно описываются способы задания инверсной населенности и механизмы вынужденного излучения. В отличие от этого в настоящей работе рассчитывается динамическая эволюция числа генерируемых фотонов, т. е. зависимость числа когерентных фотонов от времени. Это позволяет оценить влияние на процесс лазерной генерации отдельных факторов, например таких, как интенсивность накачки, коэффициент, характеризующий способность активной среды к созданию инверсной населенности, а также коэффициент прозрачности отражающих зеркал, используемых как резонатор. Покажем, что процесс лазерной генерации можно рассматривать как процесс самоорганизации.

Самоорганизация – это самопроизвольное упорядочение пространственных или временных структур в сильно неравновесных открытых системах. Непрерывные потоки энергии или вещества, поступающие в систему, поддерживают ее в состоянии, далеком от равновесия. При таких условиях в системе развиваются собственные (внутренние) области неустойчивого поведения, результатом развития которых является самоорганизация.

Генерация лазерного излучения является примером временной самоорганизации. Лазер непрерывного действия является сильно неравновесной открытой системой, образованной возбужденными частицами (атомами, молекулами) и модами электромагнитного поля в резонаторе. Неравновесность этой системы поддерживается непрерывным потоком энергии от внешнего некогерентного источника (накачкой). При малых интенсивностях накачки излучение системы состоит из несфазированных между собой цугов волн. С повышением интенсивности накачки вплоть до некоторой пороговой величины излучение системы становится когерентным, т. е. представляет собой непрерывный волновой цуг, в котором фазы волн жестко скоррелированы на макроскопических расстояниях от излучателя. При этом взаимосвязь между волновыми цугами обеспечивается резонатором за счет возврата отраженного от зеркал излучения в активное вещество. Переход к генерации когерентных колебаний можно интерпретировать как самоорганизацию. Лазерную генерацию как процесс самоорганизации впервые рассмотрел в конце 70-х годов XX века немецкий ученый Г. Хакен [1].

Математически процесс самоорганизации описывается нелинейными законами. Нелинейная модель, описывающая генерацию фотонов в «простом

лазере» рассмотрена в книге Дж. Николиса [2]. Именно эта модель положена в основу наших расчетов. Составим уравнение, описывающее генерацию фотонов в лазере. Будем рассматривать «простой лазер» т. е. введем существенные упрощения.

На рис. 1 приведена двухуровневая схема квантовой системы и показаны возможные переходы, связанные с поглощением и излучением фотонов.

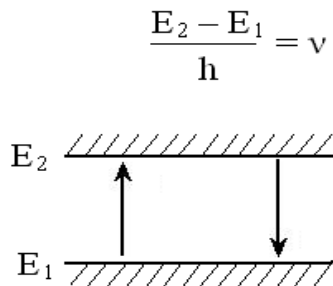


Рис. 1. Двухуровневая схема лазера

Предположим, что атомы активной среды могут находиться в двух различных состояниях E_1 и E_2 с населенностями, удовлетворяющими

распределению Больцмана: $N_2 \sim N_1 \cdot e^{-\frac{E_2 - E_1}{kT}}$. В обычных условиях $N_2 < N_1$ (нет инверсной населенности). С помощью внешней накачки можно создать инверсную населенность, т. е. получить такое состояние, при котором $N_2 > N_1$. Атомы активной среды возбуждаются с помощью внешней накачки на частоте $\nu = (E_2 - E_1)/h$ (рис. 1). Атомы из нижнего энергетического состояния переходят в верхнее,

а оттуда спонтанно переходят в нижнее состояние, испуская один фотон с частотой ν . Нас интересует динамическая эволюция числа фотонов $x(t)$, рождаемых в полости.

Скорость изменения dx/dt числа фотонов в каждый момент времени можно рассматривать как разность между приростом (увеличением числа фотонов в полости, испущенным в результате переходов возбужденных атомов в нижнее энергетическое состояние) и убылью (уменьшением числа фотонов в полости за счет утечки через полупрозрачные стенки полости). Прирост A пропорционален числу фотонов в полости и числу атомов N , возбуждаемых в единицу времени, и, следовательно, пропорционален произведению этих величин. Таким образом, $A = G \cdot N \cdot x$, где G – коэффициент пропорциональности, характеризующий восприимчивость активной среды и интенсивность источника накачки. Убыль B просто пропорциональна числу фотонов в полости: $B = \tau \cdot x$, где τ – коэффициент, характеризующий степень прозрачности отражающих зеркал. Таким образом,

$$dx/dt = G \cdot N \cdot x - \tau \cdot x.$$

Но с испусканием фотонов число возбужденных атомов убывает, поэтому можно записать $N = N_0 - \alpha x$, где N_0 – число атомов, возбуждаемых накачкой

(в единицу времени), α – коэффициент, связанный с восприимчивостью активной среды. Тогда уравнение примет вид:

$$dx/dt = G \cdot (N_0 - \alpha x) \cdot x - \tau \cdot x,$$

или

$$\frac{dx}{dt} = -K_1 x - K_2 x^2, \quad (1)$$

где $K_1 = \tau - G \cdot N_0$ и $K_2 = G \cdot \alpha$. Коэффициент K_2 всегда положительный. Для коэффициента K_1 различают два случая: если число возбужденных атомов N_0 невелико, то K_1 положительная величина, в то время как при достаточно больших N_0 коэффициент K_1 может стать отрицательным. Изменение знака происходит когда

$$G \cdot N_0 = \tau, \quad (2)$$

где $\tau = 1/t_0$ – величина, обратно пропорциональная времени жизни фотона в лазере. Это условие порога лазерной генерации.

Из теории бифуркации следует, что при $K_1 > 0$, или $G \cdot N_0 < \tau$ (слабая накачка) лазерной генерации нет, в то время как при $K_1 < 0$, или $G \cdot N_0 \geq \tau$ (сильная накачка) лазер испускает фотоны.

Численные расчеты уравнения лазерной генерации (1) производились с помощью программы MatLab [3]. В программе MatLab предусмотрены операторы для решения дифференциальных уравнений и построения графиков функций. Поэтому в программе MatLab записываем начальное уравнение

$$\frac{dx}{dt} = -K_1 x - K_2 x^2 \text{ и с помощью операторов, предусмотренных в MatLab,}$$

решаем его. Получаем функцию, которая является решением данного дифференциального уравнения. Затем по найденной нами функции строим график зависимости числа фотонов от времени $x(t)$. Графики, показывающие динамическую эволюцию числа фотонов в лазере в зависимости от интенсивности накачки, представлены на рис. 2. Заметим, что расчеты носят смысловой характер.

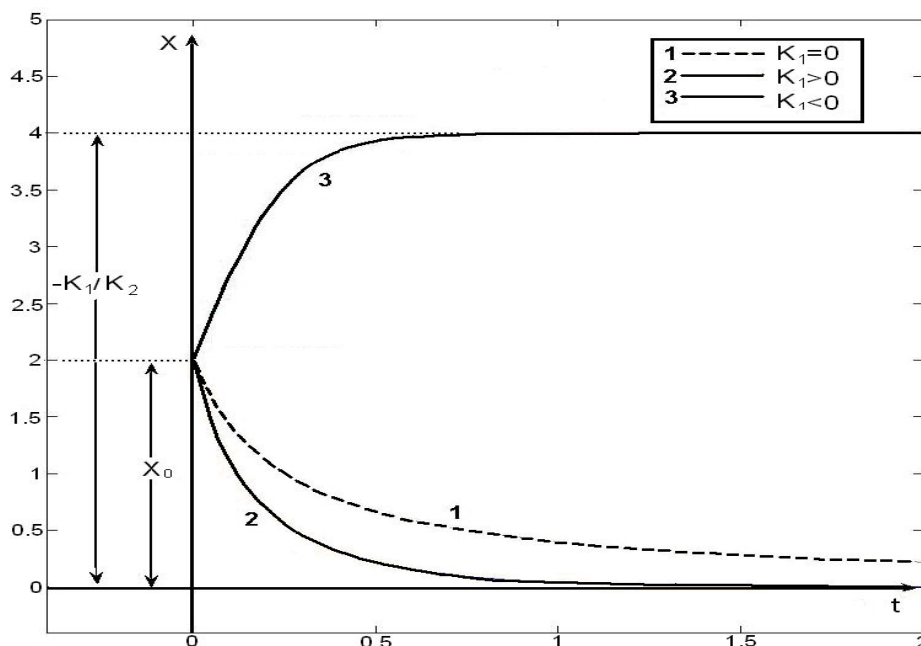


Рис. 2. Динамическая эволюция числа фотонов в зависимости от интенсивности накачки

Как видно из рис. 2, при $K_1 < 0$ и $K_2 > 0$ получается кривая, характеризующая режим лазерной генерации, которая начинается от X_0 и плавно переходит в горизонтальную прямую равную отношению $\frac{-K_1}{K_2}$ (график

3). На данном графике X_0 – это количество фотонов в начальный момент времени, т. е. начальное условие для рассматриваемого уравнения. Коэффициент K_1 , как было показано ранее, равен разности коэффициента, характеризующего степень прозрачности отражающих зеркал τ и произведения коэффициента пропорциональности G , характеризующего восприимчивость активной среды и интенсивности источника накачки, на количество возбуждаемой накачкой атомов. Коэффициент $K_2 = G \cdot a$, где a – коэффициент, связанный с восприимчивостью среды. Отсюда следует, что отношение $\frac{-K_1}{K_2}$

характеризует количество фотонов, рождаемых в полости.

Рассмотрим случай с малой интенсивностью накачки. При $K_1 > 0$ и $K_2 > 0$ кривая также начинается от точки начального числа фотонов и плавно стремится к нулю. При $t \rightarrow \infty$ – это режим обычной лампы. В данном случае количество когерентных фотонов уменьшается с течением времени и обращается в нуль. Также существует кривая, которая называется порогом. Она получается при $K_1 = 0$ и $K_2 > 0$. Ниже и выше порога лазер работает в совершенно разных режимах. Выше – режим лазерной генерации, ниже – режим обычной лампы.

Расчеты динамической эволюции числа фотонов в зависимости от параметров K_1 и K_2 показывают следующее. При увеличении параметра K_1 и постоянном K_2 происходит смещение горизонтального прямолинейного участка кривой в положительном направлении оси X , при этом положение точки X_0 остается неизменным. И наоборот, увеличивая параметр K_2 при постоянном K_1 , получаем смещение горизонтального прямолинейного участка кривой в отрицательном направлении оси X , при этом положение точки X_0 также остаётся неизменным.

Исходя из рассмотрения этих расчетов, можно сделать вывод о том, что положение горизонтального участка кривой зависит от соотношения $\frac{-K_1}{K_2}$.

В качестве примера на рисунке 3 приведены графики, показывающие динамическую эволюцию числа фотонов в лазере в зависимости от начального условия x_0 .

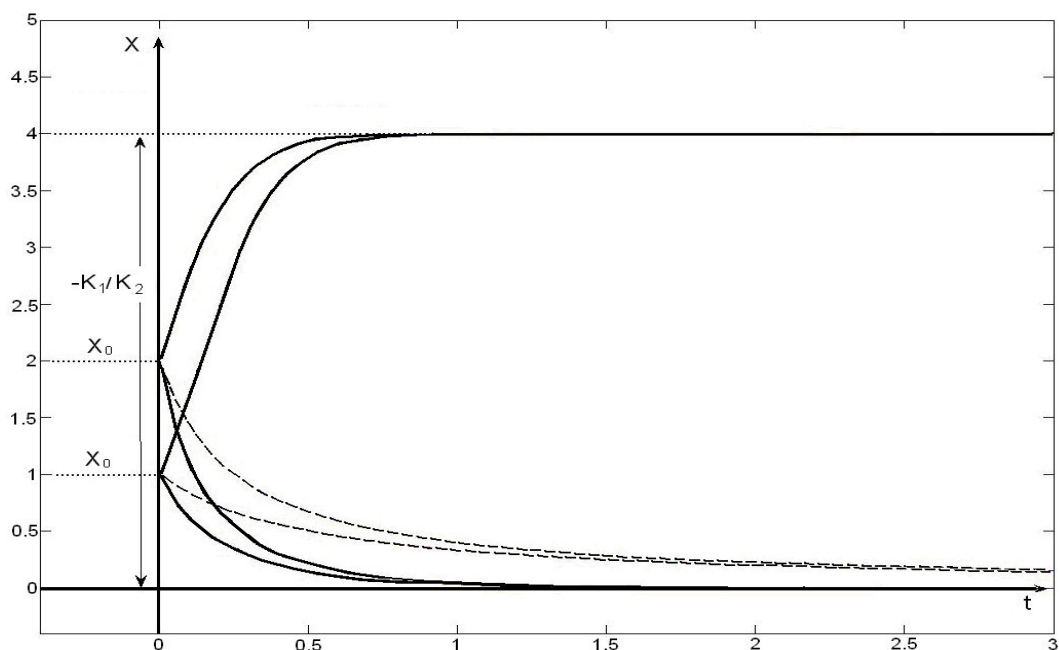


Рис. 3. Динамическая эволюция числа фотонов при различных начальных условиях

Как следует из графиков, при изменении параметра начального условия прямолинейный участок, описывающий лазерную генерацию, не изменяется, а происходит смещение точки X_0 по оси X , а влияют только на начальную стадию динамической эволюции.

Таким образом, рассмотрение явления лазерной генерации как процесса самоорганизации может быть полезно в двух отношениях. В научном отношении это может способствовать дальнейшему развитию модельных представлений, так как позволяет оценить влияние отдельных факторов на процесс лазерной генерации. В методическом отношении включение этих вопросов в соответствующий раздел программы высшей школы даст возможность студентам познакомиться с важным аспектом новых идей и понятий – универсальным синергетическим подходом, который основывается на явлении самоорганизации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хакен Г. Синергетика / Г. Хакен. – М.: Мир, 1980.
2. Николис Дж. Динамика иерархических систем. Эволюционное представление / Дж. Николис. – М.: Мир, 1989.
3. Водлазская И.В. Введение в систему MATLAB: метод. пособие / И.В. Водлазская. – Астрахань, 2004.

© Л.Д. Дикусар, Д.А. Легонцев, А.Ю. Чермошенцев, 2007

УДК 681.7.068

С.Г. Орлов, А.Б. Поллер, Д.Е. Трушенко
ИЛФ СО РАН, СИБГУТИ, Новосибирск

ОБЗОР НЕКОТОРЫХ МЕТОДОВ СИНТЕЗА ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ, СЕНСОРНЫХ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Оптические волоконные волноводы широко используются в информационных системах для передачи информации, волоконные и планарные волноводы используются также в интегральной оптике, в сенсорных и вычислительных системах. Известны сенсорные волоконные световоды чувствительные к различным физическим и химическим воздействиям [1, 2]. Исследуются волоконные и планарные волноводы с добавками люминофоров и микроотражателей для преобразования спектральных, временных и энергетических характеристик оптических сигналов [3, 4]. Использование методов нанотехнологий позволяет получать оптические волноводы с принципиально новыми свойствами, позволяющими создавать микроминиатюрные устройства. Так специалистами университета Беркли [5] разработаны методы химического синтеза планарных волноводов из оксида олова, которые проводят, как свет так и электроны. Длина таких планарных волноводов – нанолент составляет 1 мм, ширина 300–400 нанометров, а толщина десятки нанометров. Они показали, что с помощью капельки жидкости с люминофором, размещенной в углублении на наноленте можно изменять спектр оптического сигнала, проходящего по волноводу.

Любопытный метод синтеза оптических волноводов был получен с помощью живой природы [5]. Берётся паучья нить длиной в сантиметр и обмакивается в раствор ортосиликата тетраэтила. Затем, когда раствор высыхает, его обжигают при температуре 420°C. Паучья нить выгорает, а образовавшаяся трубка сжимается в целых пять раз. В результате возникает полая трубка толщиной всего в один микрометр. Для уменьшения диаметра волновода подыскивали паучка *Stegodyphus pacificus*, плетущего волокна толщиной всего десять нанометров. После обжига, силикатные трубки, сделанные с помощью нитей *Stegodyphus*, уменьшаться до двух нанометров. Благодаря этой технологии можно будет создавать крошечные сенсоры, использующие свойства "супрамолекулярных" химических процессов, происходящих с веществами, когда те оказываются замкнутыми в очень тесном пространстве. Существует также технология получения микроволноводов за счет перетяжки стеклянных волоконных световодов.

Полимерное оптическое волокно имеет более низкую температуру размягчения по сравнению со стеклянными волноводами. Поэтому можно осуществить получение микроволноводов намного проще. Для перетяжки нами использовались полимерные волноводы диаметрами 0,5 мм и 0,75 мм с числовой апертурой $NA = 0,5$. Для получения перетяжки волновод нагревался тепловым излучением лампы. Определение размеров перетяжки осуществлялось микроскопом. При хорошей фиксации получается перетяжка с диаметром до нескольких микрон с сохранением структуры волновода. Полимерные планарные однокомпонентные волноводы могут выполняться толщиной до нескольких микрон и взаимодействовать с микроволоконными волноводами.

Такие небольшие размеры оптических волноводов позволяют резко уменьшить размеры оптических систем для многоканальной фильтрации и спектрального преобразования оптических сигналов. Позволяют производить временные преобразования оптических сигналов для микросистем распределенной обработки.

Как справедливо отмечено в [2] технология волоконной оптики не нуждается в сверхчистых помещениях и требует небольшого количества специалистов средней квалификации, вместе с тем с её помощью можно изготавливать микро и нано структуры, недоступные по своей геометрии другим технологиям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Световодные датчики [Текст] / Б.А. Красюк, О.Г. Семенов, А.Г. Шереметьев и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.
2. Суховеев С.П. Волоконные микро- и наноэлектромеханические системы. В кн. Нано- и микросистемная техника. Сборник статей [Текст] / С.П. Суховеев. – М.: Техносфера, 2005. – С. 540–553.
3. Характеристики ультрафиолетового газового излучателя и полимерного преобразователя спектра для лазерных телекоммуникаций: докл. на MPLP-2000 [Текст] / А.А. Голубенков, Б.В. Поллер, А.И. Карапузиков, В.Ф. Плюснин, А.Н. Малов. – ИЛФ СО РАН. – Новосибирск, 2000.
4. Б.В. Поллер. Исследование планарных полимерных антенн с люминофорами для лазерных информационных систем [Текст] / Б.В. Поллер, Ю.Д. Коломников, Д.Е. Трушенко // Сб. докл. междунар. научн. конгр. «ГЕО – Сибирь – 2006». – Новосибирск, 2006. – С. 176–181.
5. Интернет [электронный ресурс]. – Режим доступа: [www. lbl.gov](http://www.lbl.gov).

© С.Г. Орлов, А.Б. Поллер, Д.Е. Трушенко, 2007

**ДИФРАКЦИЯ СВЕТА НА УПРУГИХ ВОЛНАХ В ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ
МЕМБРАННЫХ СТРУКТУРАХ**

Рассматриваются тонкопленочные акустооптические устройства управления световыми потоками, являющиеся тонкопленочными аналогами Брэгговских акусто-оптических модуляторов. В отличие от последних, тонкопленочные устройства функционируют на медленных объемных волнах в мембране [1,2], что потенциально обеспечивает им меньшее на порядки величин энергопотребления и компактность.

В известной литературе имеются только отдельные упоминания об исследованиях по разработкам приборов на упругих волнах в мембранах. В работе [3] описан измерительный преобразователь, использующий пьезоэлектрическое возбуждение и считывание изгибных волн в кремниевой мембране.

На рис. 1 показана схема акустооптического устройства модуляции светового потока с помощью упругих волн, образующих периодический рельеф на поверхности тонкопленочной полосковой мембраны.

Монохроматический световой поток P_0 падает нормально на тонкопленочную мембрану, в которой электростатически [4] возбуждены изгибные бегущие гармонические волны, имеющие длину волны Λ , скорость v и амплитуду h_0 :

$$h = A_0 \cos(\omega t + k_{изг} x), \quad (1)$$

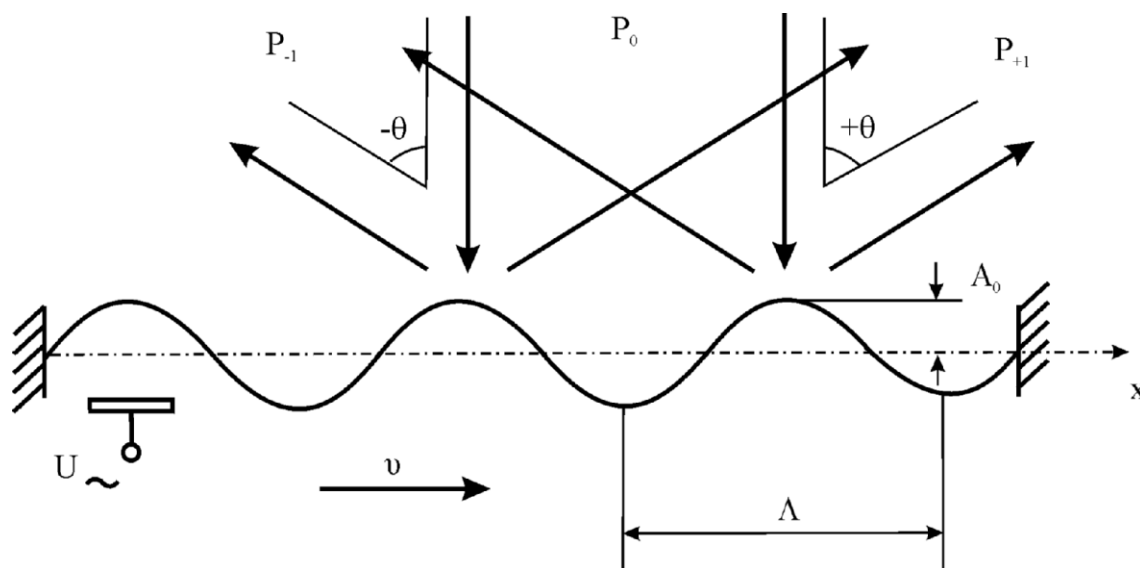


Рис. 1. Схема акустооптического устройства модуляции светового потока с помощью упругих волн

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота колебаний, $k_{изг} = \frac{2\pi}{\Lambda}$ – волновое число упругих волн.

Поверхность мембраны отражающая, и свет на синусоидальном рельефе испытывает дифракцию; дифракционная картина имеет только два +1 и -1 порядки дифракции [5]. Углы дифракции при нормальном падении светового потока равны:

$$\theta = \pm \frac{\lambda}{\Lambda}, \quad (2)$$

где λ – длина световой волны.

Эффективность дифракции света определяется выражением:

$$\frac{I(\theta)}{I_m} \approx |r_{\pm 1}|^2 \left\{ \frac{\sin^2 \left[\left(\theta + \frac{\lambda}{\Lambda} \right) \frac{\pi D}{\lambda} \right]}{\left[\left(\theta + \frac{\lambda}{\Lambda} \right) \frac{\pi D}{\lambda} \right]^2} + \frac{\sin^2 \left[\left(\theta - \frac{\lambda}{\Lambda} \right) \frac{\pi D}{\lambda} \right]}{\left[\left(\theta - \frac{\lambda}{\Lambda} \right) \frac{\pi D}{\lambda} \right]^2} \right\} \quad (3)$$

где D – освещенная ширина синусоидального рельефа, $r_{\pm 1}$ – коэффициент, учитывающий влияние на дифракцию света высоты рельефа. В [6] этот коэффициент для случая малости синусоидального рельефа h_0 в сравнении с длиной Λ упругой волны ($h_0 \ll \Lambda$) определяется выражением:

$$|r_{+1}| = |r_{-1}| = \frac{2\pi A_0}{\Lambda} \quad (4)$$

По направлению максимумов ± 1 порядка уравнение (3) упрощается:

$$\frac{I(\theta)}{I_m} \approx |r_{\pm 1}|^2 = \left(\frac{2\pi A_0}{\Lambda} \right)^2 \quad (5)$$

При электростатическом возбуждении бегущей изгибной волны в тонкопленочном волноводе, упругость которого обеспечивается натяжением, на электрод подается переменное напряжение (рис.1) и в зазоре между поверхностями электрода и мембраны создается электрическое переменное поле:

$$E = E_0 \cos \left(\frac{1}{2} \omega t \right). \quad (6)$$

При этом амплитуда волны определится выражением [4]:

$$A_0 = \frac{N \varepsilon_0 E_0^2}{64 \pi f^2 \rho h}, \quad (7)$$

где N – число электродов возбуждения, установленных вдоль волновода с шагом, кратным $\frac{\Lambda}{2}$; ρ – плотность волновода, h – полутолщина волновода.

При выводе уравнения (7) принято, что электрод имеет ширину, равную ширине полосы волновода, и длину, равную четверти длины Λ . Длина волны определяется уравнением:

$$\Lambda = \frac{1}{f} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}. \quad (8)$$

В качестве примера рассмотрим алюминиевый волновод ($\rho = 2,7 \cdot 10^3$ кг/м³) толщиной $2h = 0,1$ мкм, имеющий натяжение $\sigma = 5 \cdot 10^6$ Па, возбужденный напряженностью $E_0 = 10^7$ в/м на частоте $2 \cdot 10^6$ Гц.

При числе электродов $N = 50$ амплитуда изгибной волны равна $A_0 = 0,4 \cdot 10^{-6}$ м, длина волны $\Lambda = 21,5$ мкм, углы первых порядков $\theta = \pm 1,32^\circ$, (при длине световой волны $\lambda = 0,5$ мкм), дифракционная эффективность $(r_{\pm 1})^2 \approx 1,4 \cdot 10^{-2}$; при длине световой волны $\lambda = 5$ мкм, частоте возбуждения $0,5 \cdot 10^6$ Гц имеем $\theta = 3,3^\circ$, $(r_{\pm 1})^2 = 0,22$.

Результаты расчетов подтверждают эффективность оптико-акустического взаимодействия в тонкопленочных мембранных устройствах на медленных изгибных упругих волнах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исследование возбуждения и распространения упругих волн в тонкопленочных мембранах структур микромеханики: отчет НИР (промеж.) / СГГА; рук. Чесноков В.В.; исполн. Чесноков Д.В. – Новосибирск, 1996. – Г.Р. 0195. 0007125. – Инв. № 0297.0002753.
2. Чесноков В.В. Информационные возможности динамических микромеханических устройств / В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков // Вестник СГГА. – 2000. – Вып.5. – С. 113–116.
3. Фрайден Дж. Современные датчики: справочник / Дж. Фрайден. – М.: Техносфера, 2005.
4. Чесноков Д.В. Электростатическое и лазерное возбуждение упругих волн в тонкопленочных полосковых волноводах. / Д.В. Чесноков, В.В. Чесноков, Д.М. Никулин // ГЕО-Сибирь-2007 : сб. материалов междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2007», 25–27 апр. 2007 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2007.
5. Ахманов С.А. Физическая оптика : учебник / С.А. Ахманов, С.Ю. Никитин. – М.: изд-во Моск. ун-та, 1998.
6. Хаус Х. Волны и поля в оптоэлектронике / Х. Хаус. – М.: Мир, 1988.

© Д.В. Чесноков, В.В. Чесноков, Д.М. Никулин, 2007

УДК 534.1:534.29:534.8:536.4:539.384

Д.В. Чесноков, В.В. Чесноков, Д.М. Никулин

СГГА, Новосибирск

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ И ЛАЗЕРНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ УПРУГИХ ВОЛН В ТОНКОПЛЁНОЧНЫХ ПОЛОСКОВЫХ ВОЛНОВОДАХ

В настоящем сообщении рассматриваются вопросы электростатического и лазерного возбуждения и последующего распространения объемных упругих волн в тонкопленочных полосковых волноводах. Применение таких механических волн в устройствах микросистемной техники – для переноса и преобразования информации, в исполнительных механизмах имеет преимущества по сравнению с традиционными решениями – в плане энергопотребления и массогабаритных характеристик. Так, в работе [1] приведено описание измерительных преобразователей, основанных на использовании изгибных волн в тонкопленочной мембране, возбуждаемых пьезоэлектрическим тонкопленочным преобразователем. В [8] рассматривается

оптический дефлектор, использующий крутильные колебания полосковых микрзеркал, возбуждаемые магнитоэлектрическим способом.

В работах [2, 3] представлены основы общей теории распространения упругих волн в пластинках и мембранах.

В наших работах [4–7] исследуется концепция приборов МОЭМС, использующих упругие объемные волны в тонкоплёночных волноводах для передачи и обработки информации, в том числе рассмотрены гибридные устройства, обеспечивающие фазовую модуляцию световых потоков. Показаны преимущества применения изгибных и крутильных упругих волн в полосковых тонкоплёночных волноводах, обусловленные сверхмалой скоростью волн и значительной амплитудой колебаний в них, что объясняется малой массой и малой жесткостью тонкоплёночных волноводов. Рассмотрены параметры акусто-оптической связи изгибных волн со световыми потоками при дифракции света на фазовом периодическом рельефе, индуцированном изгибной волной. В настоящем сообщении отражаются вопросы методов расчета микроустройств на объемных волнах в тонкоплёночных полосковых волноводах, в том числе анализируются методы возбуждения волн в волноводах – электростатический и лазерный термооптический.

Рассмотрим изгибные волны в полосковом волноводе типа натянутой струны (рис. 1).

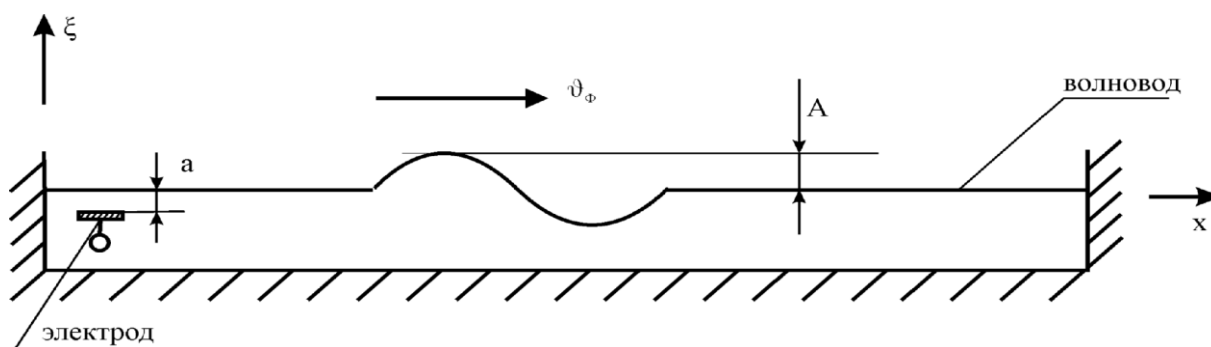


Рис. 1. Распространение возбуждения в полосковом волноводе

Упругая возвращающая сила, создающая возможность колебаний частиц волновода при возбуждении в нем внешними силами волнового движения, создается натяжением N_0 полоски по оси X . Механическое напряжение в полоске σ , создаваемое силой N_0 , равно

$$\sigma = \frac{N_0}{2l \cdot h},$$

где h и l – полутолщина и ширина полоски волновода.

Фазовая скорость изгибных волн определяется выражением [2]:

$$v_\phi = \sqrt{\frac{N_0}{m}} = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_0}}, \quad (1)$$

где ρ_0 – плотность струны; m – ее погонная масса.

Одним из методов создания натяжения N_0 в струне является использование материалов подложки и волновода с различными коэффициентами термического расширения. Если волновод изготовлен напылением на подложку при температуре T и охлажден до комнатной температуры, то, если его коэффициент термического расширения больше, он испытает натяжение с напряжением σ_T :

$$\sigma_T = \Delta\alpha\Delta T \cdot E_{Ю}, \quad (2)$$

где $\Delta\alpha$ – разность коэффициентов термического расширения подложки и волновода; ΔT – изменение температуры в ходе изготовления волновода; $E_{Ю}$ – модуль Юнга материалов волновода и подложки, который считается у них для простоты расчетов одинаковым.

Характеристический импеданс изгибных волн в струне определяется выражением [3]:

$$Z_{cmp} = \frac{N_0}{v_\phi}. \quad (3)$$

Подставим в (3) значения N_0 и v_ϕ , получим:

$$Z_{cmp} = 2l \cdot h \sqrt{\sigma \cdot \rho}. \quad (4)$$

Приложение к волноводу поперечной переменной силы с амплитудой F_0 приведет к появлению у элемента струны поперечной скорости с амплитудой $v_{0\perp}$

$$v_{0\perp} = \frac{F_0}{Z_{cmp}}. \quad (5)$$

В случае гармонического закона изменения силы с частотой ω справедливо соотношение $v_{0\perp} = A_0\omega$, где A_0 – амплитуда волны. Можно найти:

$$A_0 = \frac{F_0}{\omega Z_{cmp}}. \quad (6)$$

Длина Λ гармонической волны в волноводе определяется выражением $\Lambda = v_\phi / f$, где $f = \frac{\omega}{2\pi}$.

Для кремниевого волновода ($\rho = 2.33 \cdot 10^3$ кг/м³, $\Delta\alpha \approx 4,1 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹, $E_{Ю} = 3 \cdot 10^{11}$ Па) на подложке из плавленного кварца при технологическом изменении температуры $\Delta T = 100$ К получим значение: $v_\phi \approx 230$ м/с.

Для волновода толщиной $2h = 0,5$ мкм и шириной $l = 20$ мкм характеристический импеданс изгибных волн равен $Z_{cmp} = 5,35 \cdot 10^{-6}$ м³·с⁻¹. На частоте $f = 10^6$ Гц длина волны в волноводе равна $\Lambda = 230$ мкм.

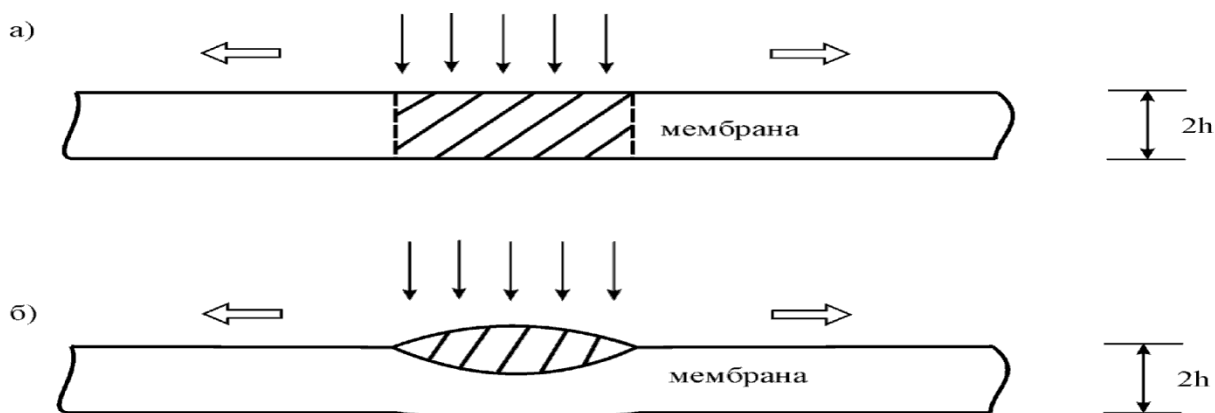
Рассмотрим электростатическое возбуждение волны путем создания между электродом на рис. 1 и волноводом в зазоре a электрического переменного поля напряженностью $E = E_0 \cos\left(\frac{1}{2}\omega t\right)$.

При этом на поверхность волновода действует сила

$$F = \frac{\varepsilon_0 E^2 \cdot S}{2} = \frac{\varepsilon_0 S E_0^2}{4} (1 + \cos \omega t), \quad (7)$$

имеющая постоянную и переменную составляющие. Переменная составляющая силы равна

$$F_{\sim} = \frac{\varepsilon_0 S E_0^2}{4} \cos \omega t = F_0 \cos \omega t, \quad (8)$$



где S – площадь поверхности электрода; $F_0 = \frac{\varepsilon_0 S E_0^2}{4}$ – амплитуда возбуждающей волну силы. Если создать в зазоре a переменное электрическое поле с амплитудой напряженности $E_0 = 10^7$ В/м, принять $S = \frac{1}{4} \Lambda \cdot l$, то амплитуда A_0 изгибных волн равна:

$$A_0 = \frac{F_0}{\omega Z_{сmp}} = \frac{\varepsilon_0 E^2}{64 \pi f^2 \rho h} = 7,6 \cdot 10^{-9} \text{ м.} \quad (9)$$

Возможно также лазерное возбуждение колебаний и упругих волн в тонкоплёночных волноводах.

Лазерное термооптическое возбуждение упругих колебаний в твердых средах исследуется многими авторами в связи с разработками источников и приемников звука с дистанционно управляемыми характеристиками. Обзор исследований и основные закономерности формирования акустических сигналов приведены в [9]. Известны также исследования вопросов возбуждения звука в телах под воздействием мощного лазерного излучения, приводящего к испарению вещества и разрушению тел (например, [10–12]).

Рассмотрим схему термооптического воздействия лазерного излучения на тонкие полоски и мембраны. Такое воздействие прямо или косвенно может приводить к возникновению колебаний и волн (рис. 2).

Рис. 2. Схема термооптических воздействий лазерного излучения, инициирующих упругие волны в тонких мембранах

Вертикальные стрелки – лазерное излучение; горизонтальные – направления распространения упругих волн; заштрихованы области, нагретые излучением

На рис. 2а период модуляции лазерного излучения таков, что мембрана успевает прогреться на всю свою толщину за время лазерного импульса.

Термическое расширение нагретой области приводит к возникновению в мембране продольных волн, т. е. волн, фронт которых параллелен границе раздела нагревающейся и холодной зон вещества. В дальнем поле и при высокой частоте модуляции излучения упругая волна в полоске волновода приобретет характер двух симметричных волн Рэлея, распространяющихся по поверхности полоски с равными скоростями [9].

На рис. 2б за время длительности лазерного импульса мембрана прогреется только на часть своей толщины. При определенных условиях возникающая продольная упругая волна преобразуется в дальнем поле на высоких частотах возбуждающего излучения в две антисимметричные волны Рэлея [9], распространяющиеся по поверхностям полоски с равными скоростями.

При низких частотах модуляции излучения в полоске возникает изгибная волна.

В работе [9] проведен анализ генерации упругих волн в твердом, обладающем собственной упругостью, волноводе, при поглощении оптического излучения с модулированной по гармоническому закону интенсивностью. Для случая антисимметричных волн Рэлея найдено выражение для зависимости амплитуды B_1 первой нормальной изгибной волны от амплитуды и частоты интенсивности лазерного излучения ([9, формула (5.19)]). В связи с громоздкостью мы приведем это выражение в упрощенном виде, для частного случая медленных изгибных волн, когда скорость изгибной волны пренебрежимо мала в сравнении со скоростями продольной и поперечной волны:

$$B_1 = \frac{m}{\omega} \cdot \frac{1 - i\omega\chi/c_l^2}{1 + \omega^2\chi^2/c_l^4} \cdot \frac{(3 - 4/n^2)\alpha}{16c_p \cdot \rho} \cdot \pi^{3/2} \mu a^3 P_0 \frac{1 - \exp(-2\mu h)}{h} \times$$

$$\times n^2 \exp\left(-\frac{a^2\omega^2}{8c_{изг}^2}\right) \cdot \{I_1[a^2\omega^2/(8c_{изг}^2)] - I_0[a^2\omega^2/(8c_{изг}^2)]\}, \quad (10)$$

где m – модуляции излучения; ω – круговая частота излучения; χ – температуропроводность; α – коэффициент термического расширения; c_p – теплоемкость; ρ – плотность вещества волновода; μ – коэффициент поглощения света; a – размер освещенной области; h – полутолщина волновода; P_0 – интенсивность поглощенного излучения; c_l , c_t и $c_{изг}$ – скорости продольной, поперечной и изгибной волн; $n = c_l/c_t$; I_0 и I_1 – модифицированные функции Бесселя нулевого и первого порядков.

Формула (10) получена для малой частоты ω , когда $\omega \ll c_l/h$ и $\omega \ll c_t/a$.

Формулу (10) можно упростить, приравняв второй сомножитель единице, так как в рассматриваемых далее случаях всегда глубина нагретой области

$\sqrt{\frac{\chi \cdot 2\pi}{\omega}}$ много меньше длины упругой продольной волны $\frac{2\pi c_l}{\omega}$; будем также считать $\mu = \frac{1}{d}$, где d – глубина проникновения излучения в волновод. Получим:

$$B_1 = \frac{m}{\omega} \cdot \frac{(3n^2 - 4)\alpha}{16c_p \cdot \rho} \cdot \pi^{3/2} a^3 P_0 \cdot \frac{1 - \exp\left(\frac{2h}{d}\right)}{h \cdot d} \cdot \exp(-L) \cdot [I_1(L) - I_0(L)], \quad (11)$$

$$\text{где } L = \frac{a^2 \omega^2}{8c_{изг}^2} = \frac{\pi^2}{2} \cdot \frac{a^2}{\Lambda_{изг}^2}, \quad (12)$$

$\Lambda_{изг}$ – длина изгибной волны.

В настоящем сообщении не затронуты вопросы лазерного возбуждения упругих волн в пленочных волноводах, не обладающих собственной жесткостью. Эти вопросы рассмотрены во второй части статьи [13].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фрайден Дж. Современные датчики: справочник / Дж. Фрайден. – М.: Техносфера, 2005.
2. Скучик Е. Простые и сложные колебательные системы / Е. Скучик; пер. с англ.; под ред. Л.М. Лямшева. – М.: МИР, 1971.
3. Крауфорд Ф. Волны / Ф. Крауфорд; пер. с англ.; под ред. А.И. Шальникова и А.О. Вайсенберга. – М.: Наука, 1984.
4. Исследование возбуждения и распространения упругих волн в тонкопленочных мембранах структур микромеханики: отчет о НИР (промежут.) / СГГА; рук. Чесноков В.В. – Новосибирск, 1996. – 25 с. – ГР 0195.0007125; Инв. № 0297.0002753.
5. Исследование физических проблем нано- и микроразмерных функциональных устройств информационных оптоэлектронных систем: отчет НИР / СГГА; рук. Чесноков В.В.; исполн. Чесноков Д.В. – Новосибирск, 2003. – 71 с. – Г.Р. 0199. 0010326. Инв. № 02200 1.03177.
6. Чесноков, В.В. Информационные возможности динамических микромеханических устройств / В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков // Вестник СГГА. – 2000. – Вып.5. – С. 113–116.
7. Чесноков, В.В. Возбуждение крутильных волн в микромеханическом упругом волноводе / В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков // ГЕО-Сибирь-2006. Т. 4. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника: сб. материалов междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2006», 24–28 апр. 2006г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2006. – С. 136–143.
8. Чесноков В.В. Микромеханические модуляторы света / В.В. Чесноков // Изв. вузов. Сер. Приборостроение. – 1990. – № 6. – С. 82.
9. Лямшев Л.М. Лазерное термооптическое возбуждение звука / Л.М. Лямшев. – М.: Наука, 1989.
10. Взаимодействие лазерного излучения с металлами / А.М. Прохоров, В.И. Конов, И. Урсу, И.Н. Михэилеску. – М.: Наука, 1988.
11. Действие излучения большой мощности на металлы / С.И. Анисимов, Я.А. Имас, Г.С. Романов, Ю.В. Ходько. – М.: Наука, 1970.
12. Арутюнян, Р.В. Взаимодействие лазерного излучения на материалы / Р.В. Арутюнян, В.Ю. Баранов, Л.А. Большов. – М.: Наука, 1989.
13. Чесноков Д.В. Лазерное возбуждение изгибных волн в мембранных полосковых волноводах. / Д.В. Чесноков, В.В. Чесноков, Д.М. Никулин // ГЕО-Сибирь-2007.: сб. материалов междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2007», 25–27 апр. 2007г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2007.

ЛАЗЕРНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ ИЗГИБНЫХ ВОЛН В МЕМБРАННЫХ ПОЛОСКОВЫХ ВОЛНОВОДАХ

Данное сообщение является второй частью работы [1]. Рассматриваются вопросы лазерного термооптического и десорбционного механизма возбуждения изгибных волн в тонкопленочных волноводах, упругость в которых создается натяжением.

Физическая картина происходящих при этом процессов иллюстрируется на рис. 1. При импульсном термическом расширении нагретой зоны верхняя поверхность «выпучивается», что приводит к возникновению механического импульса отдачи, направленного вниз. Если выделить замкнутую область, содержащую нагретый участок волновода и прилегающие к нему по краям холодные участки, то центр масс этой зоны при нагревании должен остаться неподвижным, т. е. динамическое выпучивание вверх нагретой области сопровождается динамическим прогибом вниз прилегающих холодных областей. Этот прогиб сопровождается возникновением в полоске упругих сил и инициирует бегущие объемные изгибные волны.

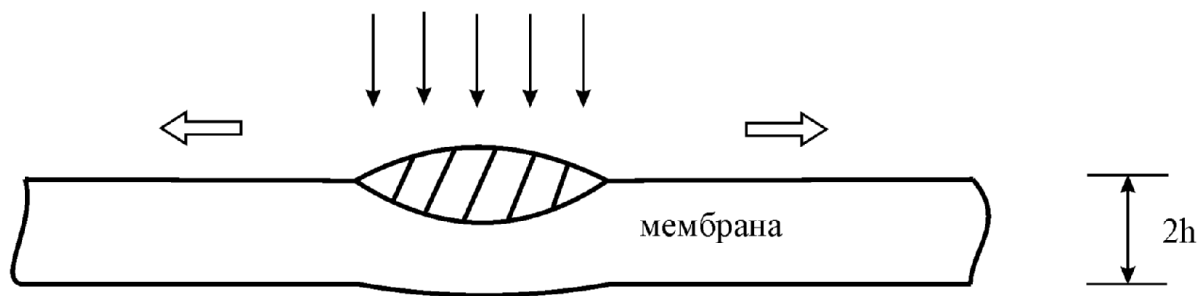


Рис. 1. Схема термооптического воздействия лазерного излучения на тонкие мембраны

Значение импульса отдачи, вызванное неравномерным распределением нагретой области по толщине, определим выражением:

$$P_{отд} = m \cdot v, \quad (1)$$

где $m = \rho \cdot S \cdot h'$ – масса нагретой области; S и h' – площадь и толщина нагретой области; v – скорость средней плоскости этой области, ρ – плотность полоски.

Нагретая область термически расширится на величину:

$$\Delta h' = h' \alpha \Delta T. \quad (2)$$

Скорость средней плоскости нагретой области равна

$$v = \frac{\Delta h'}{2\tau}. \quad (3)$$

Найдем значение импульса отдачи:

$$P_{om\partial} = \frac{\rho S (h')^2 \alpha \Delta T}{2\tau}, \quad (4)$$

и значение механической силы, действующей на волновод и возбуждающей изгибные волны, равно

$$F_{om\partial} = \frac{P_{om\partial}}{\tau} = \frac{\rho S (h')^2 \alpha \Delta T}{2\tau^2}. \quad (5)$$

Полученные результаты применим к мембранному волноводу изгибных волн, в котором упругие силы обусловлены натяжением полоски продольной силой.

Деформацию изгиба можно определить в виде:

$$A_{om\partial} = \frac{F_{om\partial}}{\omega Z_{cmp}} \quad (6)$$

полагая под ω круговую частоту первой гармоники Фурье разложения температурного импульса:

$$\omega = \frac{2\pi}{\tau}.$$

Здесь

$$Z_{cmp} = 2lh\sqrt{\sigma\rho} \quad (7)$$

характеристический импеданс изгибных волн в струне, σ – натяжение полоски, h и l – полутолщина и ширина полоски волновода.

Используя выражение (7) для характеристического импеданса и уравнение (5), найдем деформацию изгиба, примерно равную амплитуде изгибного колебания в месте возбуждения:

$$A_{om\partial} = \frac{\rho S (h')^2 \alpha \Delta T}{4\pi\tau Z_{cmp}}. \quad (8)$$

В качестве примера рассмотрим мембранный волновод из алюминиевой плёнки толщиной 0,5 мкм, прогретый на ΔT лазерным импульсом на половину толщины $h' = 0,25$ мкм. Длительность лазерного импульса $\tau \approx 1$ нс, $Z_{cmp} = 5,35 \cdot 10^{-6}$ м³/с, площадь облучаемого участка $S = 4 \cdot 10^{-10}$ м² (20×20 мкм²).

Для амплитуды изгибного колебания получим значение: $A_{om\partial} = 2,3 \cdot 10^{-9}$ м.

После окончания лазерного прогревания приповерхностного слоя волновода, сопровождаемого расширением толщины нагретого слоя, деформация волновода продолжится: термическое удлинение нагретого слоя приведет к выгибанию вверх всей полоски волновода. Этот процесс характеризуется гораздо большей постоянной времени τ_2 в связи с вовлечением в ход деформации гораздо больших инерционных масс.

Ниже рассматривается расчет амплитуды локального изгиба мембранного волновода, происходящий за характерное время τ_2 .

Если полосковый волновод облучается локально лазерным одиночным импульсом, прогревающим волновод на часть его толщины (рис.1), возникающая деформация имеет форму локального изгиба.

На рис. 2 показана схема этой деформации, использованная при расчете величины возникающей выпуклости.

При нагревании полоски на участке длиной a на глубину i (на половину общей толщины) произойдет термическое удлинение нагретого слоя, в полоске возникнут механические напряжения. Оставшимся холодным слой подвергнется растяжению, горячий – сжатию. Под влиянием напряжений полоска изогнется горячей областью вверх. В первом приближении при равенстве толщин горячего и холодного слоев будем считать, что радиус изгиба R обусловлен тем, что наружная поверхность нагретого слоя оказывается удлиненной на $\Delta a = a\alpha\Delta T$, где ΔT – температура нагревания слоя, средний слой (на рис. 2 обозначен пунктирной линией) удлинится на $\frac{\Delta a}{2}$, наружная поверхность холодного слоя не удлинится.

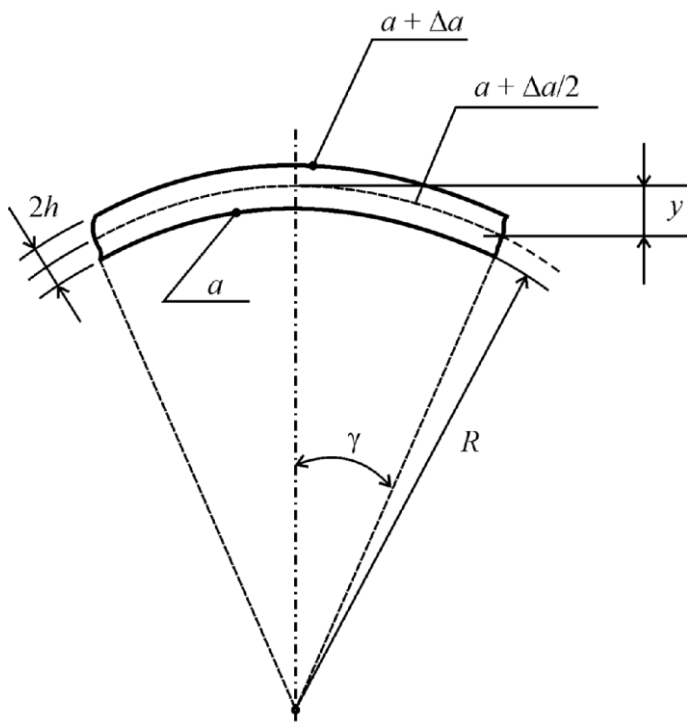


Рис. 2. Схема к расчету термооптической деформации

Из рис. 2 видно, что

$$a = \gamma R, \quad a + \Delta a = \gamma(R + 2h).$$

Раскрывая скобку, получим:

$$\Delta a = 2\gamma h = \frac{2ah}{R}.$$

Подставим значение Δa :

$$R = \frac{2h}{\alpha\Delta T}. \quad (9)$$

Легко найти, что величина y поперечной деформации полоскового волновода равна:

$$y \approx \frac{a^2}{8R} = \frac{a^2\alpha\Delta T}{16h}. \quad (10)$$

В качестве примера определим деформацию волновода толщиной $2h = 0,5$ мкм из алюминия ($\alpha = 23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) локально в области $a = 30$ мкм нагреваемого на $\Delta T = 100$ К. В соответствии с (10) получим: $y \approx 0,5$ мкм.

Рассмотрим десорбционный механизм возбуждения упругих изгибных волн (рис. 3).

На рис. 3, иллюстрируется термооптический десорбционный механизм возникновения упругих волн в полоске. Полоска находится в газовой атмосфере и покрыта в равновесных условиях слоем адсорбированных молекул газа. При лазерном нагревании участка поверхности до температуры десорбции молекул

они «отбрасываются» поверхностью с тепловыми скоростями, что сопровождается импульсом отдачи, действующим на полосу и приводящим локальный объем полосы в движение по направлению, перпендикулярному оси полосы. Вдоль полосы распространяется изгибная волна.

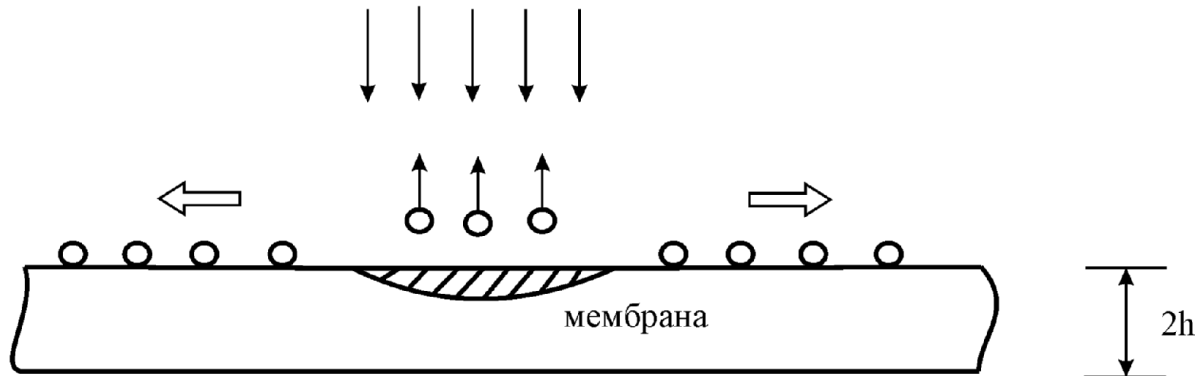


Рис. 3. Десорбционный механизм возбуждения упругих изгибных волн

Импульс всех десорбированных с единицы поверхности при температуре $T = \Delta T + 293$ К молекул равен [2]:

$$P = \frac{q_0}{s \cdot N_A} \sqrt{4RMT}, \quad (11)$$

где s – поперечное сечение десорбированной молекулы (для воздуха $s \approx 10^{-19}$ м²); N_A – число Авогадро; q_0 – число монослоев десорбированного газа;

M – молярная масса десорбированного газа (для воздуха $M = 0,029$ кг/моль); R – универсальная газовая постоянная. Лазерная термооптическая десорбция происходит приблизительно за время τ лазерного импульса, поэтому сила отдачи, действующая на нагретый участок волновода, равна:

$$F_0 = \frac{P \cdot S'}{\tau} = \frac{q_0 \cdot S'}{sN_A \cdot \tau} \sqrt{4RMT}, \quad (12)$$

где S' – облучаемая поверхность. Для получения оценочных результатов можно приравнять: $\tau = \frac{T}{2} = \frac{\pi}{\omega}$.

Если лазерное облучение модулировано частотой ω , и интенсивность адсорбции достаточна для восстановления слоя молекул между циклами десорбции (в воздухе при атмосферном давлении слой молекул восстанавливается за $\sim 10^{-6}$ с), то для расчета амплитуды бегущей волны можно воспользоваться выражениями (7) и (6). Получим:

$$A_{0dec} = \frac{q_0 S \sqrt{4RMT}}{sN_A \pi \cdot Z_{изг}}. \quad (13)$$

Вычисление для $T = 1\,000\text{ К}$, $q_0 = 1$, при облучении в воздушной среде волновода с параметрами, принятыми в примере, приведенном после формулы (6), дает значение $A_{0dec} \approx 3,6 \cdot 10^{-8}\text{ м}$.

Проведенное сравнительное изучение электростатического [1], лазерного термоупругого и лазерного десорбционного методов возбуждения изгибных волн в мембранных тонкоплёночных волноводах и волноводах, обладающих собственной упругостью, показало, что во всех случаях достижимо возбуждение изгибных волн с амплитудами, обеспечивающими достаточно эффективную связь упругих волн со световыми потоками в устройствах типа МОЭМС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чесноков Д. В. Электростатическое и лазерное возбуждение упругих волн в тонкоплёночных полосковых волноводах. / Д.В. Чесноков, В.В. Чесноков, Д.М. Никулин // ГЕО-Сибирь-2007 : сб. матер. междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2007», 25–27 апр. 2007 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2007.
2. Действие излучения большой мощности на металлы / С.И. Анисимов, Я.А. Имас, Г.С. Романов, Ю.В. Ходько. – М.: Наука, 1970.

© Д.В. Чесноков, В.В. Чесноков, Д.М. Никулин, 2007

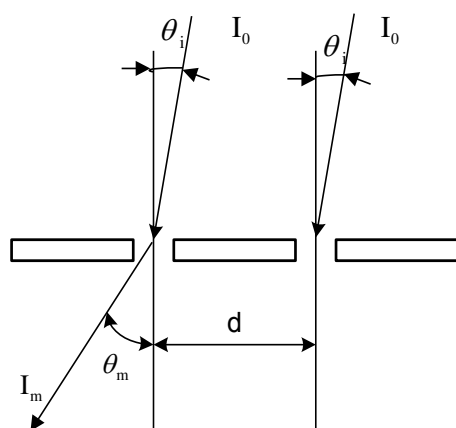
ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ МОДУЛЯТОРОВ И ДЕФЛЕКТОРОВ

Рассмотрены рабочие режимы и оптические характеристики микромеханических модуляторов и дефлекторов с магнитоэлектрическим управлением, теоретически рассчитаны функции пропускания и отражения для этих устройств, построены графические зависимости.

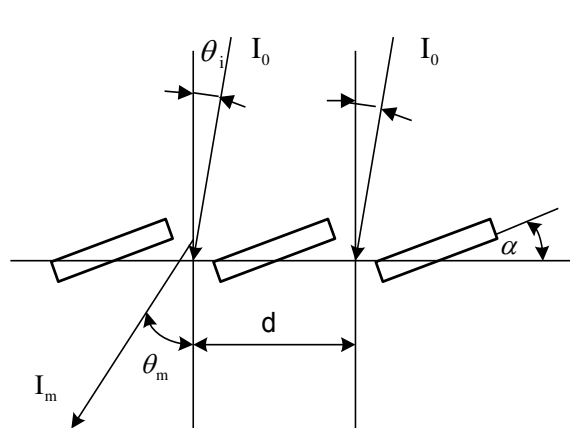
Микромеханическое устройство представляет собой плоскую матрицу микрозеркал, закрепленных концами на неподвижной рамке, и способных поворачиваться вокруг своей продольной оси под действием управляющего магнитного поля. Данное устройство может быть использовано как модулятор проходящего светового потока (рис. 1а,б) или как дефлектор отраженных световых лучей (рис. 1в).

Принципы управления и достижимые параметры этих устройств подробно описаны в [1–2].

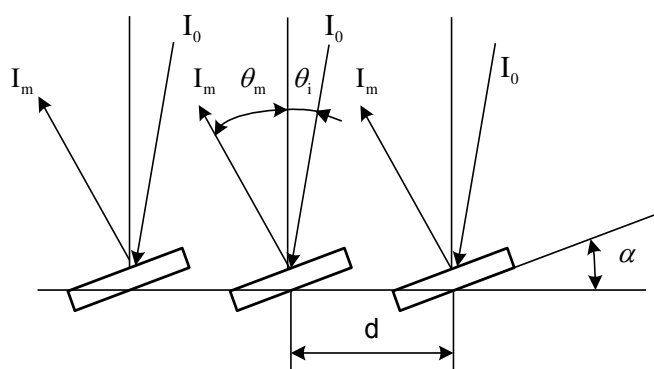
Каждое микрозеркало длиной l , шириной w , толщиной h , b_0 – расстояние между зеркалами в свободном состоянии.



а) $b = b_0$



б) $b = b_0 + w(1 - \cos \alpha) - h \sin \alpha$



в)

Рис. 1. Схема работы микромеханических а),б) модулятора; в) дефлектора (вид в разрезе плоскостью, перпендикулярной оси вращения микрозеркал)

Для анализа оптических характеристик использована теория дифракционной решетки [3–5] и сделаны следующие допущения:

1. Все микрозеркала синхронно поворачиваются на одинаковый угол α ($\alpha \leq 1 \text{ рад.}$), оставаясь при этом параллельными друг другу;
2. Видимый размер щели в средней части устройства равен: $b = b_0 + w(1 - \cos \alpha) - h \sin \alpha$;
3. Параметр дифракционной решетки не изменяется при поворотах микрозеркал и остается равным d , ($d = w + b_0$);
4. Общее число микрозеркал N ;
5. Используется источник монохроматического излучения с длиной волны- λ , который равномерно освещает все микроустройство;
6. Края микрозеркал диффузно рассеивают падающее излучение и не изменяют суммарное распределение интенсивности дифракционной картины;
7. Расстояние от плоскости решетки до экрана- D .

Дифракционная решетка обеспечивает периодическую пространственную модуляцию падающей световой волны по амплитуде и по фазе.

Пространственное распределение интенсивности дифрагировавшего излучения определяется выражением [5]:

$$I(\varphi) = \frac{I_0}{D\lambda} \times \left\{ L \cdot \delta \cdot \frac{\sin(\pi N \varphi)}{N \sin(\pi \varphi)} \cdot \frac{\sin(\pi \delta \varphi)}{\pi \delta \varphi} \right\}^2, \quad (1)$$

где: I_0 – интенсивность падающего излучения, $I(\varphi)$ – интенсивность дифрагировавшего излучения, L – общая длина рабочей части ($L = N \cdot d$), для модулятора $\delta = \frac{b}{d}$, параметр φ – поперечная составляющая волнового вектора:

$$\varphi = \frac{d(\sin \theta_m - \sin \theta_i)}{\lambda} \quad (2)$$

где: θ_i – угол падения; θ_m – направление на интерференционный максимум m -порядка. Углы θ_i и θ_m отсчитываются от нормали к плоскости подложки устройства (рис. 1 а,б). При нормальном падении, когда $\theta_i = 0$,

$$\theta_m = \arcsin\left(\frac{m\lambda}{d}\right). \quad (3)$$

В направлении главных максимумов выражение (1) можно упростить, так как при условии: $\varphi = m$, $\lim_{\varphi \rightarrow m} \left[\frac{\sin(\pi N \varphi)}{N \sin(\pi \varphi)} \right] = N$, тогда:

$$I_m(\varphi) = \frac{I_0}{D\lambda} \times \left\{ b \cdot N \cdot \frac{\sin(\pi \delta m)}{\pi \delta m} \right\}^2. \quad (4)$$

Если рассматривать модуляцию проходящего потока, удобно ввести функцию пропускания $A(m, b)$:

$$A_m = \frac{I(\varphi)}{I_0}. \quad (5)$$

Тогда для функции пропускания получаем следующее выражение:

$$A_m = \frac{1}{D\lambda} \times \left\{ b \cdot N \cdot \frac{\sin(\pi\delta m)}{\pi\delta m} \right\}^2. \quad (6)$$

При увеличении видимой ширины щели, δ – возрастает, а интенсивность излучения в направлении главных максимумов будет модулирована функцией $A_m(m, b)$, $I_m = I_0 \cdot A_m$.

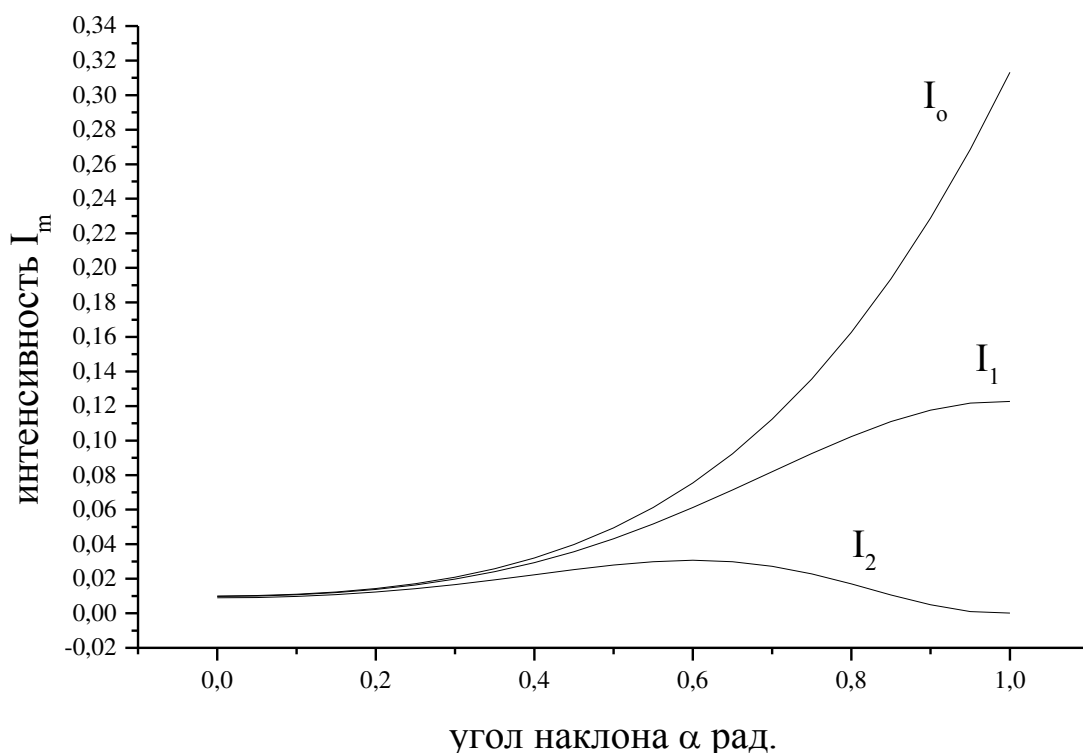


Рис. 2. Зависимость интенсивности излучения I_m в направлении главных максимумов от угла наклона микрозеркал α , для модулятора

Для анализа оптических характеристик микромеханического дефлектора отраженных световых потоков, выражение (1) должно учитывать:

1. Зависимость коэффициента отражения поверхности микрозеркала от длины волны падающего излучения $r = r(\lambda)$;

2. $\delta = \frac{w}{d}$; ($w = w_0 \cos \alpha$);

3. Угол наклона микрозеркал α отсчитывается от плоскости подложки;

4. $\varphi = \frac{d(\sin \theta_i + \sin \theta_m)}{\lambda}. \quad (7)$

Угол наклона микрозеркал α вносит дополнительную разность фаз для потоков излучения, отраженных от соседних микрозеркал, эта разность (рисунок 1в) равна:

$$\psi = w \sin \alpha. \quad (8)$$

Если излучение падает почти нормально к плоскости подложки и углы θ_i , θ_m малы, $\theta_m = \theta_i + 2\alpha$ (рис. 1в), справедливо соотношение:

$$\varphi = \frac{2d(\sin \alpha)}{\lambda}, \quad (9)$$

порядок m^* , на которой приходится максимальная интенсивность дифрагировавшего излучения определится из выражения:

$$m^* = \frac{2d(\sin \alpha)}{\lambda}. \quad (10)$$

Итоговое распределение интенсивности сдвинется на m^* порядков и будет выражаться как:

$$I_m = I_0 \cdot \frac{r(\lambda)}{D\lambda} \times \left\{ N \cdot w \cdot \frac{\sin(\pi N \varphi)}{N \sin(\pi \varphi)} \cdot \frac{\sin(\pi \delta \varphi)}{\pi \delta \varphi} \right\}^2, \quad (11)$$

можно ввести функцию отражения для дефлектора $R(m, \lambda)$:

$$R = \frac{I_m}{I_0 \cdot r(\lambda)}, \quad (12)$$

тогда:

$$R = \frac{1}{D\lambda} \times \left\{ w \cdot N \cdot \frac{\sin(\pi \delta m)}{\pi \delta m} \right\}^2. \quad (13)$$

На рис. 3, 4 представлены зависимости интенсивности излучения $I_m = R \cdot I_0$, от параметра φ и от угла наклона α . Кривая представленная на рисунке 4, представляет собой огибающую максимумов порядка m^* , зеркально отраженных от поверхности микрозеркал.

Все графические зависимости получены для следующих значений размеров микромеханических устройств:

$$l = 0.5 \text{ см}, w = 50 \text{ мкм}, h = 3 \text{ мкм}, b_0 = 5 \text{ мкм}, \lambda = 1 \text{ мкм}, D = 1 \text{ м}, N = 20.$$

Анализируя полученные соотношения и графические зависимости можно сделать следующие выводы об особенностях оптических характеристик микромеханических модуляторов и дефлекторов:

– При изменении угла наклона микрозеркал изменяется интенсивность излучения в интерференционных максимумах ;

– Угловая ширина главных максимумов для модулятора и дефлектора равна:

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{\lambda}{d \cdot N}\right), (0,0009 \text{ рад}), \quad (14)$$

– Угловое расстояние между соседними максимумами равно:

$$\beta = \arcsin\left(\frac{\lambda}{d}\right), (0,018 \text{ рад.}), \quad (15)$$

– Для дефлектора порядок максимума с наибольшей интенсивностью возрастает с ростом угла α , общее количество дифракционных порядков при изменении $\alpha \in [0 \div 1] \text{ рад.}$ определяется из формулы (9) и равно 92.

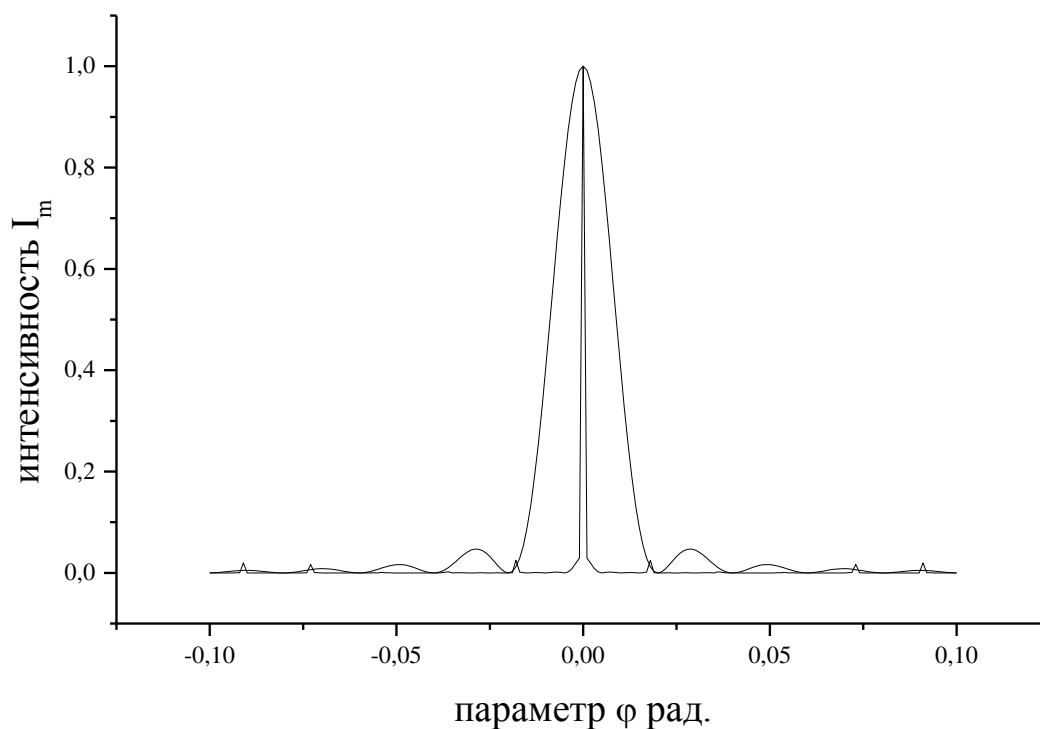


Рис. 3. Зависимость интенсивности излучения I_m от параметра φ

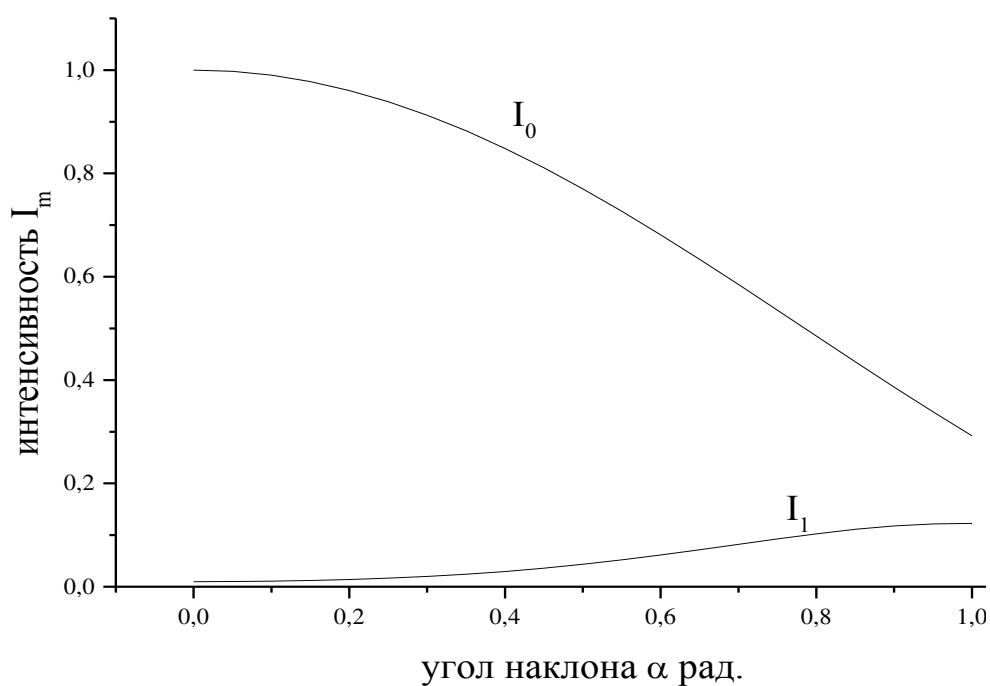


Рис. 4. Зависимость интенсивности излучения I_m от угла наклона α

В настоящее время в СКБ кафедры физики проводятся экспериментальные работы с микромеханическими устройствами подобных типов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чесноков В.В. Микромеханический модулятор света [Текст] / В.В. Чесноков // Изв. вузов. Сер. Приборостроение. – 1990. – № 6.
2. Исследование физических проблем нано-и микроразмерных функциональных механических устройств информационных оптоэлектронных систем [Текст]: отчет о НИР / СГГА рук. Чесноков В.В.; исполн.; Чесноков Д.В.; М-во обр. и науки РФ; – Новосибирск, 2003. – № ГР01990010326.
3. Борн М. Основы оптики [Текст] / М. Борн, Э. Вольф. – М., 1973. – Гл. 8.
4. Калитеевский Н.И. Волновая оптика [Текст] / Н.И. Калитеевский. – М., 1971. – Гл. 5.
5. Liu A.Q. Micro-opto-mechanical-grating switches [Текст] / A.Q. Liu, B. Zhao, F. Chollet, Q. Zou, A. Asundi, H. Fujita // Sensor and actuator.– 2000. – No.86.

© В.С. Корнеев, 2007

ЛАЗЕРНАЯ ПЕРФОРАЦИЯ ТОНКОПЛЁНОЧНЫХ МЕМБРАН

Тонкие металлические пленки в свободном состоянии давно используются в технике вакуумных приборов, например, для создания проводящих отражающих слоев люминесцентных экранов [1], в качестве оптических фильтров [2], для получения вакуумно-плотных окон для пропускания мягкого рентгеновского излучения [3], для изготовления рентгеношаблонов и т. п.

Перспективным представляется получение и использование тонкопленочных мембран с заданным рисунком перфорации, например, для микроэлектромеханических систем, для механической фильтрации газов и жидкостей, в качестве трафаретных масок для вакуумного напыления.

В настоящее время в качестве основы для получения трафаретных масок применяют относительно толстые (до 50 мкм) биметаллические фольги, в которых при помощи фотолитографии травлением формируется сквозной рисунок. Главными недостатками этого метода являются многооперационность и невозможность получения размеров трафаретного рисунка с линиями шириной менее 100 мкм [4].

Задача создания микротрафаретных масок с проектными нормами не хуже 5 мкм может быть разделена на две: изготовление собственно тонкопленочной мембраны и получение в ней сквозных отверстий заданной топологии.

Полупроводниковые или металлические мембраны большой площади и толщиной менее 3–5 мкм изготавливают либо утончением заданной области подложки (например, травлением), либо переносом готовой мембраны с подложки-донора на жесткую рамку.

Последний вариант для рассматриваемой задачи имеет очевидное преимущество – переносимая мембрана первоначально располагается на поверхности подложки-донора и перфорация может быть выполнена на этом этапе, то есть когда непрочность и хрупкость свободной пленки не связывает нас выбором технологии формирования отверстий. В простейшем случае может быть использована фотолитография.

В рамках развития изложенных выше подходов был разработан маршрут изготовления тонкопленочных мембран на основе свободных пленок алюминия, представленный на рис.1.

Подложка-донор была изготовлена из широко распространенного стекла Марк × 40 мм². Поверхность подложки подвергалась стандартным методам подготовки [2], после чего на нее наносилась нитроцеллюлозная пленка (рис. 1, а). Для этого подложку предварительно погружали в сосуд с дистиллированной водой. Затем на поверхность воды наносили каплю не растворяющегося в воде раствора нитроцеллюлозы в бутилацетате. После испарения растворителя на поверхности воды образовывалась твердая пленка нитроцеллюлозы толщиной примерно 0,10–0,25 мкм [1]. Стекланную подложку медленно вытаскивали из воды, при этом нитроцеллюлозная пленка

оказывалась на ее поверхности. Нитроцеллюлозную пленку на стеклянной подложке сушили в термощкафу при температуре 80–100 °С.

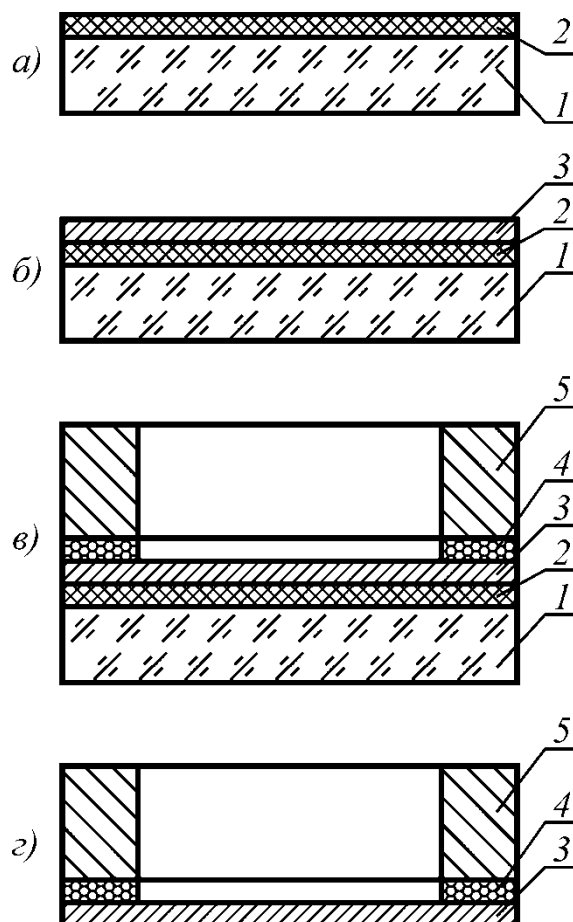


Рис. 1. Последовательность операций получения тонкопленочной мембраны из алюминия.

1 – нитроцеллюлозная пленка; 2 – стеклянная подложка; 3 – алюминиевая плёнка (мембрана); 4 – опорное кольцо; 5 – слой эпоксидного клея

Далее на поверхность нитроцеллюлозной пленки производилось напыление пленки алюминия толщиной около 0,1 мкм в вакуумной установке (ВУ-1А), из проволочного вольфрамового испарителя. Алюминий имеет низкую температуру испарения и, следовательно, низкую температуру паров, поэтому рост слоя металла не приводит к разрушению нитроцеллюлозной пленки (рис.1, б). Подложка с нитроцеллюлозной пленкой при напылении дополнительному нагреву не подвергается.

На следующем этапе к поверхности алюминиевой пленки приклеивают опорное кольцо с внутренним диаметром 7 мм. Для этого его торцевую поверхность, заранее смазанную тонким слоем эпоксидного клея, плотно прижимают к поверхности структуры (рис. 1, в).

После высыхания клея объект погружают в сосуд с ацетоном. Растворение тонкого слоя нитроцеллюлозы происходит со скоростью примерно 1 см² за 60 минут. После растворения нитроцеллюлозы опорное кольцо с пленкой

аккуратно отделяют от стеклянной подложки, чтобы не произошло разрыва металлической пленки. Полученная структура с мембраной показана на рис. 1, 2.

На данном этапе исследований количественный анализ оптических и механо-физических характеристик полученной мембраны не производился, однако тщательный осмотр позволил сделать следующие выводы: – в видимом диапазоне спектра мембрана непрозрачна; – пленка имеет складки и выпуклости, мембрана на натянута, видны следы ее деформации.

В общем случае, задача получения сквозных отверстий в металлической пленке имеет несколькими решений – например, фотолитография. Однако, когда речь заходит о свободно подвешенной пленке толщиной 0,1 мкм, стандартные методы оказываются чересчур разрушающими – толщина фоторезиста во много раз превосходит толщину мембраны, а процесс его нанесения может просто уничтожить пленку.

Более привлекательным представляется одностадийный метод лазерной абляции, при котором единственным объектом, контактирующим с металлической мембраной, является сфокусированный лазерный пучок, одиночный импульс которого обладает энергией, достаточной для практически мгновенного испарения участка пленки заданной формы. Технологические основы лазерной обработки тонких пленок на подложках заложены в работе [5], в соответствии с которой оценочное значение плотности мощности светового потока, соответствующее началу разрушения тонкой пленки короткими импульсами (длительность $\tau=10^{-7}$ с), равно

$$P_D = \frac{\rho c h T_B}{(1 - R)\tau}, \quad (1)$$

где ρ – плотность материала пленки (для алюминия 2710 кг/м^3); c – удельная теплоемкость материала пленки (для алюминия 900 Дж/(кг·град)); h – толщина пленки (10^{-7} м); T_B – температура кипения материала пленки (для алюминия 2740 К); R – коэффициент отражения (условно примем равным 0,5).

Предварительно сформулированным требованиям соответствует несколько типов лазерных излучателей. Для первичной апробации удобно воспользоваться готовым технологическим оборудованием, обладающим набором дополнительных сервисных функций. Так, установка лазерной ретуши ЭМ-551Б оснащена азотным лазером ЛГИ-505 (длина волны $0,334 \text{ мкм}$; длительность одиночного импульса $\tau = 6 \text{ нс}$; плотность мощности в формируемом проекционной системой фокальном пятне до $5 \cdot 10^8 \text{ Вт/см}^2$), двухкоординатным столиком на аэростатической подвеске, системой подсветки мишени «на просвет» и «на отражение», бинокулярной насадкой с увеличением $300\times$, позволяющей наблюдать рабочую область непосредственно в процессе обработки.

Оценим по формуле (1) плотность мощности, которую необходимо обеспечить лазеру ЛГИ-505 для испарения участка алюминиевой пленки толщиной 0,1 мкм за один импульс: $P_D = 2,48 \cdot 10^{11} \text{ Вт/м}^2$ ($2,48 \cdot 10^7 \text{ Вт/см}^2$). Очевидно, что указанный лазер подходит для заявленных нами целей.

Для проведения процесса лазерной перфорации свободных пленок алюминия опорное кольцо с алюминиевой мембраной закреплялось на координатном столе лазерной установки, перемещением которого относительно фокального пятна формировался заданный рисунок микротрафарета. В общем случае, размер и форма сквозных отверстий на пленке определяется размером и формой фокального пятна (квадрат со стороной от 2 до 25 мкм), которое формируется проекционной системой лазерной технологической установки.

Первоначально были получены тонкопленочные алюминиевые мембранные микротрафареты, рисунок которых представляет собой чередующиеся параллельные прямолинейные сплошные и сквозные участки различной ширины (рис. 2). Сплошные участки имеют ширину от 4,8 мкм до 32 мкм, щелевые – от 3,2 мкм до 20 мкм.

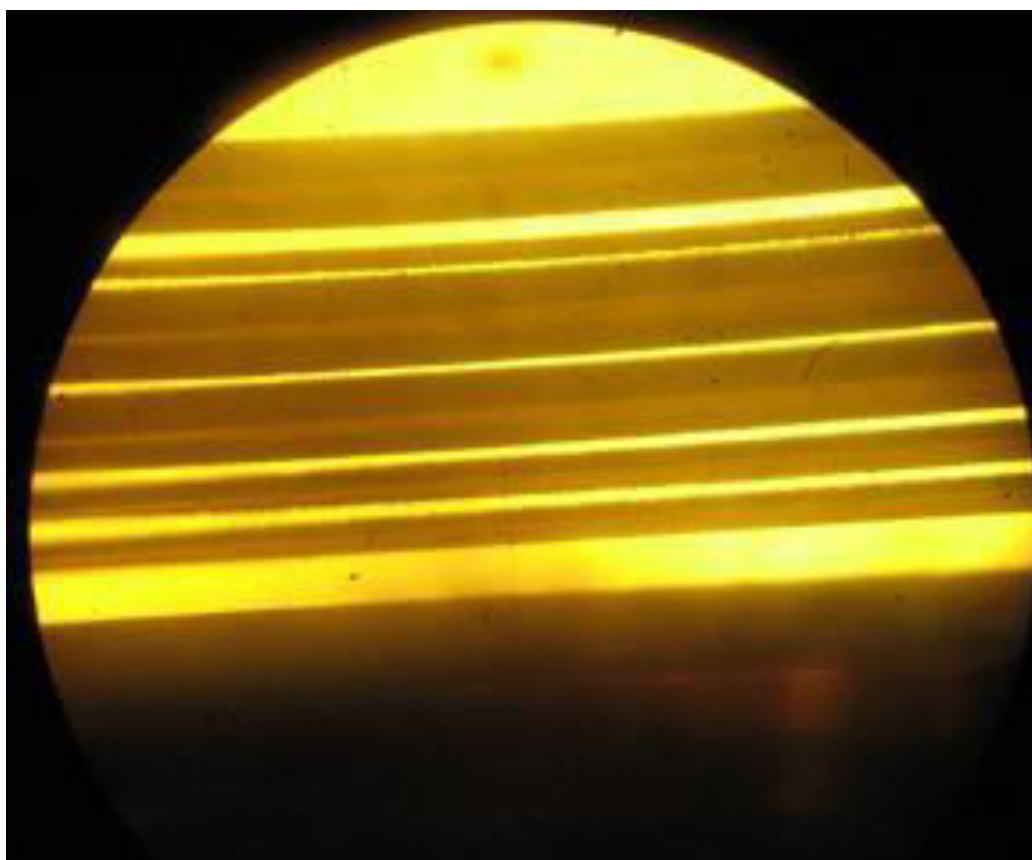


Рис. 2. Увеличенное изображение микротрафарета (светлые линии – щели в трафарете). Минимальная ширина щели 8 мкм. Максимальная ширина щели 42 мкм

На рис. 3 представлена микрофотография участка алюминиевой мембраны, в которой единичным импульсом выполнено сквозное отверстие квадратной формы. Можно отметить несовершенство самой алюминиевой мембраны – в ней много дефектов типа «прокол», а также искажения, как самой формы отверстия, так и гладкости пленки вблизи углов квадрата – своеобразные «морщины».

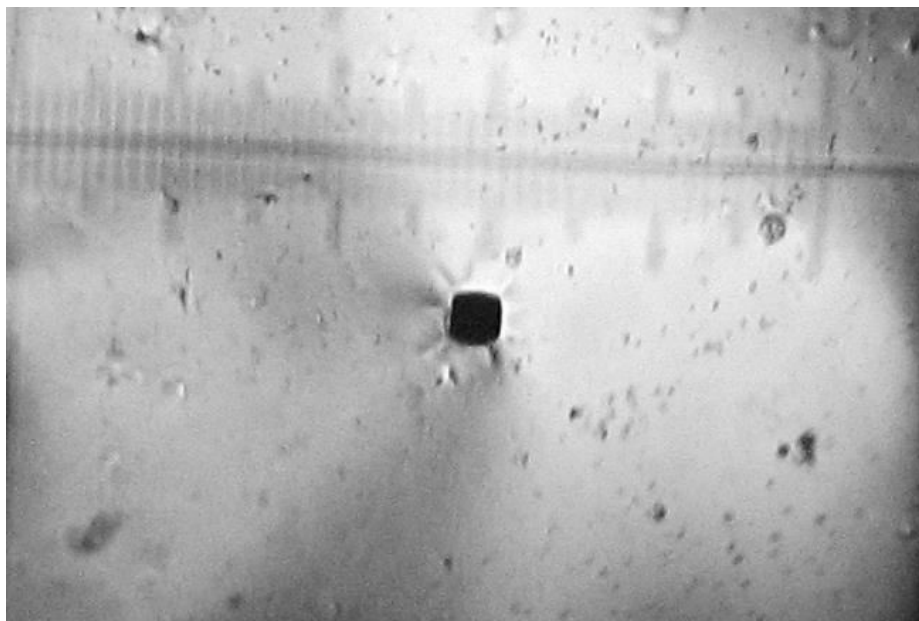


Рис. 3. Увеличенное изображение микротрафарета

Разработанный тонкопленочный мембранный трафарет позволяет формировать трафаретные рисунки с проектными нормами до единиц микрометра, так как имеет мембрану толщиной порядка 0,1 мкм. Жесткость и плоскостность такого мембранного трафарета создается опорным кольцом, изготовленным из материала с высоким коэффициентом термического расширения (алюминий). Такие микротрафареты изготавливаются очень просто и могут применяться для разовых напылений тестовых топологических рисунков. Особенностью таких трафаретов является то, что они требуют аккуратного хранения во избежание повреждений.

Исследования в этом направлении будут продолжены с целью получения мембран большего размера, с высокой жесткостью, с трафаретным рисунком точным по форме и размерам. Планируется замена алюминия, как материала тонкопленочного мембранного микротрафарета, на более тугоплавкие металлы с маленьким коэффициентом термического расширения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гугель Б.М. Люминофоры для электровакуумной промышленности / Б.М. Гугель. – М.: Энергия, 1967.
2. Хасс Дж. Физика тонких пленок. Т. 7 / Дж. Хасс, М.Х. Франкомб, Р.У. Гофман. – М.: Мир, 1977.
3. Chesnokov V.V. Study of SR beam line windows within the range of 17-80 nm / V. V. Chesnokov, V.I. Fedchenko, V.P. Naz'mov // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. – 1991. – A308. – P. 333–335.
4. Данилин Б.С. Вакуумное нанесение тонких пленок / Б.С. Данилин. – М.: Энергия, 1967.
5. Вейко В.П. Лазерная обработка пленочных элементов / В.П. Вейко. – Л.: Машиностроение, 1986.

© Д.В. Чесноков, С.Л. Шергин, Д.М. Никулин, 2007

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСОВ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ МИКРОЧАСТИЦ МЕТАЛЛОВ

Обсуждается программа исследований методов ориентации микрочастиц металлов в различных средах и изучение оптико-физических особенностей таких сред.

В промышленности и при научных исследованиях используют магнитно- и электрореологические жидкости, содержащие ферромагнитные или диэлектрические частицы и меняющие свои механические свойства при наложении магнитного или электрического поля. Изменение оптических свойств прозрачного слоя, в котором равномерно распределены ферромагнитные частицы, при наложении магнитного поля описываются в работах [1, 2].

В проводимых нами работах предполагается изучить методы самоорганизации и электростатической ориентации микро- и наноразмерных частиц металлов, имеющих форму пластинок и погруженных в жидкую и твердеющую среду; исследуется возможность достижения упорядоченного расположения частиц в средах.

Беспорядочно ориентированная в пространстве и гидростатически уравновешенная частица в электростатическом поле испытывает воздействие поворачивающего механического момента (рис. 1).

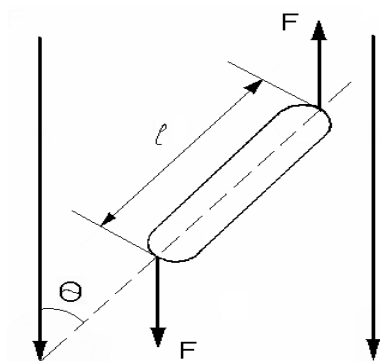


Рис. 1. Схема возникновения поворачивающего момента в электростатическом поле

Металлическая частица в виде пластинки длиной l расположена в пространстве под углом θ относительно электрического поля напряженностью E , изображаемого на рисунке силовыми линиями. Частица в поле поляризуется, и на ее концах возникают индуцированные полем заряды $+q$ и $-q$. Величина этих зарядов определяется выражением:

$$q = \sigma \cdot S = \varepsilon_0 \varepsilon E_n \cdot S, \quad (1)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость среды; ε_0 – электрическая постоянная; $\sigma = \varepsilon_0 \varepsilon E_n$ – плотность заряда на поверхностях S концов пластинки; E_n – напряженность электрического поля на поверхности. Поверхностное поле перпендикулярно поверхности S .

Поле у концов пластинки усиливается на коэффициент k_{yc} , определяемый формой пластинки, ее толщиной d и длиной l . В первом приближении у ровной закругленной по толщине кромки коэффициент усиления поля равен:

$$k_{yc} = \frac{2l}{d}. \quad (2)$$

Результирующее поле у концов пластинки оценивается формулой:

$$E_n \approx k_{yc} \cdot E \approx \frac{2l}{d} \cdot E. \quad (3)$$

Силы F , действующие на каждый конец пластинки

$$F = q \cdot E = \varepsilon \varepsilon_0 S \frac{2l}{d} E^2, \quad (4)$$

направлены противоположно друг другу и образуют поворачивающий момент

$$M = F \cdot l = \frac{2\varepsilon \varepsilon_0 S \cdot l^2 E^2}{d}. \quad (5)$$

Сравним величину этого момента с моментом сил тяжести, стремящимся опрокинуть частицы в горизонтальное положение, если частица оперлась нижним концом о некоторую поверхность. Момент сил тяжести равен:

$$M_T = \frac{1}{2} \rho \cdot l \cdot S \cdot g \sin \theta, \quad (6)$$

где ρ – плотность частицы; g – ускорение свободного падения.

Найдем отношение моментов:

$$\frac{M}{M_T} = \frac{4\varepsilon \varepsilon_0 E^2}{d \rho g \sin \theta}. \quad (7)$$

Проведем расчет этого отношения для параметров: $\varepsilon = 3$, $E = 10^5$ В/м,

$d = 0,1 \cdot 10^{-6}$ м, $\rho = 3 \cdot 10^3$ кг/м³, $\theta = \pi/4$. Получим: $\frac{M}{M_T} = 5 \cdot 10^2$.

Расчет подтверждает возможность ориентации металлической пластинки электростатическим полем по электрическому полю в поле гравитации, стремящемся ориентацию нарушить.

При продолжении работ предполагается экспериментальная проверка полученного результата.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Васильев А. А. Пространственные модуляторы света / А.А. Васильев, Д. Кассент, И.Н. Компанеец, А.В. Парфенов. – М.: Радио и связь, 1987.
2. Реверсная гетерогенная среда для записи изображения на основе перегруппировки наполнителя. – Препринт. – М.: (ИРЭ АН СССР, № 13 (296)), 1980.

© А.С. Сырнева, В.В. Чесноков, 2007

УДК 535.213

Д.Ю. Протасов, В.Я. Костюченко, В.Н. Москвин
СГГА, Новосибирск

**ФОТОМАГНИТНЫЙ ЭФФЕКТ И ФОТОПРОВОДИМОСТЬ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ НА
ВАРИЗОННЫХ ГЕТЕРОЭПИТАКЦИАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ МЛЭ КРТ Р-ТИПА**

Тройной сплав $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (кадмий-ртуть-теллур, КРТ), где x – мольное содержание Cd , является основным полупроводниковым материалом для изготовления фотоприемных устройств (ФПУ) в инфракрасном диапазоне. Свойства ФПУ во многом определяются такими рекомбинационно-диффузионными параметрами, как время жизни и подвижность неосновных носителей заряда (электронов), скорости поверхностной рекомбинации на границах раздела эпитаксиальной пленки.

Ранее фотомагнитный эффект (ФМЭ) и фотопроводимость (ФП) в магнитном поле в геометрии Фойгта ($\vec{k} \perp \vec{B}$ и $\vec{k} \perp \vec{E}$) исследовались для определения рекомбинационно-диффузионных параметров эпитаксиальных плёнок CdHgTe р-типа при Оже-рекомбинации, когда времена жизни электронов и дырок равны друг другу: $\tau_n = \tau_p$ [1, 2]. Однако для ФПУ на основе CdHgTe р-типа при азотных температурах при рекомбинации Шокли-Рида в моделях фотоэлектромагнитных эффектов необходимо учесть, что $\tau_n \neq \tau_p$.

В работе предложена теоретическая модель для фотомагнитного эффекта и фотопроводимости в магнитном поле в гетероэпитаксиальных структурах КРТ р-типа, выращенных молекулярно-лучевой эпитаксией (МЛЭ) с варизонными широкозонными слоями.

Закон изменения состава и ширины запрещенной зоны в варизонных областях плёнки КРТ р-типа можно аппроксимировать линейной зависимостью (рис. 1).

В области I толщиной y_1 ширина запрещённой зоны уменьшается от E_{g1} до E_{g2} , в области II (от y_1 до y_2) ширина запрещённой зоны не меняется и равна E_{g2} («рабочий слой»), и в области III она возрастает от E_{g2} при y_2 до E_{g3} при y_3 (1).

$$\begin{aligned} E_{1y} &= \frac{\partial E_g(x_{Cd})}{\partial x_{Cd}} \cdot \frac{\partial x_{Cd}}{\partial y} \approx \frac{E_{g2} - E_{g1}}{y_1}, \quad E_{2y} = 0, \\ E_{3y} &= \frac{\partial E_g(x_{Cd})}{\partial x_{Cd}} \cdot \frac{\partial x_{Cd}}{\partial y} \approx \frac{E_{g3} - E_{g2}}{y_3 - y_2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Для описания ФП и ФМЭ уравнение непрерывности и транспортные уравнения для плотности токов электронов и дырок в магнитном поле можно записать:

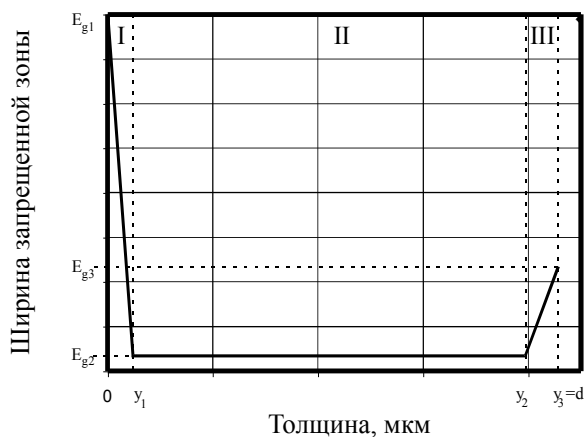


Рис. 1. Профиль края зоны проводимости

$$\begin{cases} \frac{\partial \Delta n}{\partial t} = \beta \alpha G - \frac{\Delta n}{\tau_n} + \frac{1}{e} \cdot \text{div} \vec{j}_n \\ \frac{\partial \Delta p}{\partial t} = \beta \alpha G - \frac{\Delta p}{\tau_p} - \frac{1}{e} \cdot \text{div} \vec{j}_p \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \vec{j}_n = en\mu_n \vec{E} + eD_n \text{grad} \Delta n - \mu_n [\vec{j}_p \times \vec{B}] \\ \vec{j}_p = ep\mu_p \vec{E} - eD_p \text{grad} \Delta p + \mu_p [\vec{j}_p \times \vec{B}] \end{cases}, \quad (3)$$

где e – величина элементарного заряда; μ_n и μ_p , n и p – подвижности и концентрации электронов и дырок; B –

значение индукции магнитного поля; D_n и D_p , τ_n и τ_p – коэффициенты диффузии и времена жизни электронов и дырок; β – квантовый выход; α – коэффициент поглощения; $G = G_0 \exp(-\alpha y)$ – скорость оптической генерации неравновесных носителей.

Для получения полной системы уравнения (1) и (2) следует дополнить условием для полного тока в направлении y и уравнением электронейтральности:

$$j_y = j_{ny} + j_{py} = 0 \quad (4)$$

$$\Delta n[1 + K] = \Delta p, \quad (5)$$

где K – коэффициент пропорциональности между концентрациями неравновесных электронов на ловушках и в зоне проводимости (коэффициент захвата).

Выражения, описывающие поведение неравновесного электронно-дырочного газа в скрещенных электрическом и магнитном полях, получим при следующих предположениях: а) стационарный случай ($\partial \Delta n / \partial t = \partial \Delta p / \partial t = 0$); б) малый уровень возбуждения: $p_0, n_0 \gg \Delta p, \Delta n$; в) толщина образца сравнима с диффузионной длиной неравновесных носителей заряда; г) проводимость имеет дырочный характер: $\mu_n n \ll \mu_p p$; д) магнитное поле является слабым для тяжёлых дырок: $\mu_p B_{\max} \ll 1$; е) тянущее электрическое поле E_x не приводит к дополнительной генерации неравновесных носителей и разогреву образца; ж) коэффициент поглощения достаточно большой, так что $\alpha d \gg 1$, где d – толщина образца.

Для упрощения модели будем считать, что варизонные слои характеризуются некоторыми средними значениями подвижности и времени жизни: μ_{n1} и τ_{n1} для области I, μ_{n2} и τ_{n2} для области II, μ_{n3} и τ_{n3} для области III.

Примем, что концентрация основных носителей одинакова во всём образце.

Коэффициент поглощения в варизонной области равен среднему значению:

$$\alpha_1 = y_1^{-1} \int_0^{y_1} \alpha(y) dy. \text{ Для расчета среднего значения коэффициента поглощения}$$

использовались выражения, полученные в работе [3].

Рассмотрим образец, помещённый в скрещенные электрическое и магнитное поля. В этом случае компоненты векторов электрического и магнитного полей равны: $\vec{E} = (E_x, 0, 0)$ и $\vec{B} = (0, 0, B_z)$. Неравновесные носители заряда генерируются излучением, которое направлено по оси y . Его волновой вектор равен: $\vec{k} = (0, k_y, 0)$.

Из (2)–(5) можно получить уравнения, описывающие поведение неравновесного электронно-дырочного газа в каждой из областей I, II и III (рис. 1):

$$D_{in}^* \frac{\partial^2 \Delta n}{\partial y^2} + V_{id} \frac{\partial \Delta n}{\partial y} - \frac{\Delta n}{\tau_i} = -\alpha_i \cdot \beta \cdot G_i \quad (6)$$

где $i = 1, 2, 3$ номер области, $D_{in}^* = D_{in} / \left(1 + \mu_{in}^2 B^2\right) = D_{in} / \left(1 + \Theta_{in}^2\right)$ – коэффициент диффузии неосновных электронов в магнитном поле; $V_{id} = \mu_{in} \left(E_{iy}^* + (\Theta_{in} + \Theta_p) E_x\right) / \left(1 + \Theta_{in}^2\right)$ – скорость поперечного дрейфа в скрещенных электрическом и магнитном полях для областей I, II и III.

Полные и частные решения уравнений (6)–(8) в общем виде можно записать как:

$$\begin{aligned} \Delta n_i(y) &= C_{1i} e^{\lambda_{1i} y} + C_{2i} e^{\lambda_{2i} y} + A_i e^{-\alpha y}, \\ A_1 &= -\beta \alpha_1 G_0 \left(\alpha_1^2 D_{1n}^* - V_{1d} \alpha_1 - 1/\tau_{1n} \right)^{-1}, \\ A_2 &= -\beta \alpha_2 G_0 e^{-(\alpha_1 - \alpha_2) y_1} \left(\alpha_2^2 D_{2n}^* - V_{2d} \alpha_2 - 1/\tau_{2n} \right)^{-1}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $A_3 = 0$, а λ_{1i} , λ_{2i} – корни соответствующих характеристических уравнений.

C_{1i} и C_{2i} определялись из соответствующих граничных условий. Однако, так как толщина варизонных областей невелика по сравнению с толщиной рабочей области и концентрация неравновесных носителей в них мала, то будем учитывать вклад в ФМЭ и ФП в магнитном только в рабочей области. Неравновесные электроны, созданные падающим излучением в I варизонной области, выталкиваются встроенным электрическим полем в рабочую область. Их можно учесть с помощью введения эффективного темпа поверхностной генерации g_s на передней границе II области. Уход неравновесных носителей заряда из II области в I и III учтём с помощью введения эффективных скоростей поверхностной рекомбинации $S_{1эфф}$ и $S_{2эфф}$. Тогда граничные условия для области II можно записать в виде:

$$\begin{cases} \frac{1}{e} j_{2n}(y_1) = S_{1эфф} \cdot \Delta n_2(y_1) - g_s \\ \frac{1}{e} j_{2n}(y_2) = -S_{2эфф} \cdot \Delta n_2(y_2) \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{где } S_{1эфф} \approx -\frac{k_b T}{q} \cdot \frac{1}{E_{1y} \cdot \tau_{1n}}, \quad S_{2эфф} \approx \frac{k_b T}{q} \cdot \frac{1}{E_{3y} \cdot \tau_{3n}} \quad (9)$$

– эффективные скорости поверхностной рекомбинации на передней и задней границе рабочего слоя;

$$g_s = \beta G_0 \left(1 - e^{-\alpha_1 \cdot y_1} \right) \quad (10)$$

– эффективный темп поверхностной генерации на границе раздела рабочего слоя и передней варизонной области.

Результирующий сигнал фотопроводимости складывается из двух компонент: собственно фотопроводимости $U_{ФП0}$, которая пропорциональна общему числу неравновесных носителей заряда $\int \Delta n dy$ и магнито-диффузионного члена [4] $U_{МД}$, вызванного диффузией неоднородно распределенных по образцу неравновесных электронов. При отсутствии тянущего поля ($E_x = 0$) напряжение $U_{МД}$ совпадает с напряжением ФМЭ: $U_{МД}(E_x = 0) = U_{ФМЭ}$. Выражения для $U_{ФП}$ и $U_{МД}$ приведены в [4].

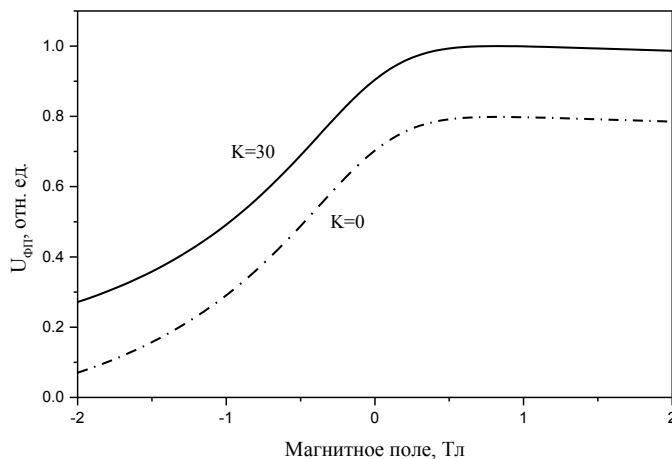


Рис. 2. Теоретические магнитопольевые зависимости фотопроводимости, рассчитанные при следующих значениях параметров: $S_{1эфф} = 0.1$ м/с, $S_{2эфф} = 1$ м/с, $\tau_{2n} = 10$ нс, $\alpha_1 = 2.1 \times 10^6$ м/с, $\alpha_2 = 2.0 \times 10^6$ м/с, $\mu_{2n} = 5.7$ м²/В × с, $\mu_p = 0.057$ м²/В × с, $y_l = 0.5$ мкм, $v_s = 8.5$ мкм. $E_x = 800$ В/м

Следовательно, при определении времени жизни из измерений ФП без учёта коэффициента захвата его значение получается завышенным, так как величина ФП в нулевом магнитном поле пропорциональна времени жизни.

Закключение

Для описания ФМЭ и ФП в магнитном поле в геометрии Фойгта на многослойных структурах МЛЭ р-КРТ необходимо ввести эффективные скорости поверхностной рекомбинации $S_{1эфф}$ и $S_{2эфф}$ на границах варизонных слоёв и эффективный темп поверхностной генерации g_s на освещённой стороне рабочего слоя. Величины $S_{1эфф}$ и $S_{2эфф}$ определяются градиентом ширины запрещённой зоны и эффективным временем жизни в варизонных слоях. Эффективный темп поверхностной генерации обусловлен поглощением излучения в освещённой варизонной области и последующим выносом сгенерированных неравновесных носителей заряда в рабочую область.

При наличии высокой концентрации рекомбинационных центров исключение вклада неравновесных тяжелых дырок в ФП в геометрии Фойгта

На рис. 2 приведены теоретические зависимости фотопроводимости от магнитного поля.

Учёт наличия центров рекомбинации Шокли-Рида увеличивает сигнал фотопроводимости, так как учитывается вклад тяжелых дырок. При большой плотности рекомбинационных центров концентрация неравновесных дырок превышает концентрацию неравновесных электронов: $\Delta p > \Delta n$. Поэтому, несмотря на низкую подвижность ($\mu_e/\mu_p = 100$), тяжелые дырки дают заметный вклад в фотопроводимость.

приводит к завышению определяемого из таких измерений значения времени жизни электронов. Эта ошибка может достигать 20 %.

Авторы выражают благодарности С.А. Дворецкому и Н.Н. Михайлову (ИФП СО РАН) за ценные замечания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Konczak S. and Nowak M. /Some comments to the photoelectromagnetic effect//, *Surf. Sci.*, 1979, V. 87, P. 228–238.
2. Фотомагнитный эффект и фотопроводимость тонких эпитаксиальных слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdTe}$ / С.А. Студеникин, И.А. Панаев, В.Я. Костюченко, Х.-М.З. Торчинов // ФТП. – 1993. – Т. 27, вып. 5. – С. 744–756.
3. Anderson W.W. / Absorbtion constatnt of $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ and $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ alloys// *Infrared Phys.*, 1980, V. 20, P.363–372.
4. Протасов Д.Ю. Фотомагнитный эффект и фотопроводимость в магнитном поле в геометрии Фойгта, исследованные на эпитаксиальных слоях МЛЭ HgCdTe р-типа при доминирующей рекомбинации Шокли-Рида / Д.Ю. Протасов, В.Я. Костюченко // Материалы научн. конгр. «Гео-Сибирь-2006». – Новосибирск: СГГА. – 2006.

© Д.Ю. Протасов, В.Я. Костюченко, В.Н. Москвин, 2007

УДК 621.396

О.П. Кузнецов*, М.М. Куниевский*, Б.В. Поллер**, В.А. Косинов*, О.В. Косинов*, В.А. Васильев**
Группа предприятий «Профиль»*, ЗАО «СКБ»**, Новосибирск

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МАГНЕТРОННОЙ УСТАНОВКОЙ НАПЫЛЕНИЯ НА СТЕКЛА ДЛЯ СТЕКЛОПАКЕТОВ

Группа предприятий «Профиль» имеет большой опыт по разработке технологии и выпуску стекол с теплоотражающими покрытиями (ТОП) для стеклопакетов. Первоначальная технология была в середине 90-х годов заимствована в Германии. Для увеличения устойчивости ТОП было принято решение об использовании пленок на стекле на основе окислов титана, обладающих высокой стойкостью.

В процессе разработки технологии получения покрытий на основе окислов титана был проведен глубокий анализ существующих схем источников питания магнетронов, который опирался на патентный поиск, открытые публикации и собственные исследования [1]. Были рассмотрены более 10 схем и испытанов процессе исследований 6 схем.

В качестве источников питания (ИП) магнетронов обычно используются источники постоянного тока. Традиционно использовались тиристорные управляемые выпрямители в режиме стабилизации тока с напряжением холостого хода от 0 до 750 В и током 0–40 А. В качестве стабилизирующего элемента применялся балластный реостат.

Главный недостаток традиционных ИП: высокая энергия в дуге при возникновении пробоя из-за невозможности прервать питание на магнетроне до момента перехода синусоидального напряжения сети через 0, и как следствие, ухудшение параметров покрытий, низкий КПД.

При разработке ИП, учитывая опыт эксплуатации промышленных магнетронов, была выбрана современная концепция ИП постоянного тока на основе транзисторного коммутатора. К сожалению, отсутствие достоверной информации об оптимальных параметрах ИП для питания магнетронов: оптимальная частота коммутатора, напряжение холостого хода, рабочие токи, привело к дополнительным изысканиям. Например, параметры частоты по разным сведениям варьируются от 4 кгц до 40 кгц, напряжение от 460 В до 3000 В, токи от 25 А до 300 А. Создание такого универсального источника питания сопряжено с высокими финансовыми затратами.

В соответствие с техническим заданием ЗАО «СКБ» был спроектирован и изготовлен компьютеризированный ИП магнетрона на основе IGBT модулей на напряжение 1200 В и токи до 200 А.

Частота следования импульсов задаётся в пределах 2-40 кгц, с интервалом в 1 Гц. Задаётся также: ток стабилизации с точностью 0.1 А. Выполняется автоматическая дугозащита, защита от перегрева модулей. Применяется защита от перенапряжения модулей и от короткого замыкания. Управление транзисторными ключами осуществляется контроллером, имеющим связь с компьютером.

Все органы оперативного управления и индикаторы контроля реализованы программно и отображаются на мониторе. Форма тока контролировалась на цифровом осциллографе.

В процессе проведения экспериментальных работ с титановыми мишенями, были определены физические параметры магнетронного разряда для различных конструкций магнетронов. Были предложены механизмы магнетронного распыления титана и выбраны оптимальные значения состава газовой смеси, рабочего давления, частоты, токов и напряжений. Понимание процессов испарения и конденсации позволило получить покрытия на основе окиси титана с высокими потребительскими свойствами. Опыт эксплуатации высокочастотного источника питания магнетрона показал высокую надёжность, эргономичность, а также возможность оперативно вносить изменения в алгоритм его работы. В дальнейшем компьютеризированный ИП магнетронов планируется органично вписать в систему автоматизированного управления установкой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент № 2109083 Российская Федерация. Способ плазменно-дугового нанесения покрытий в вакууме / В.А. Косинов, О.В. Косинов. – Оpubл. 31.01.97.

© О.П. Кузнецов, М.М. Куниевский, Б.В. Поллер, В.А. Косинов, О.В. Косинов, В.А. Васильев,
2007

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ TiO_2 В ТЕПЛОТЕХНИКЕ, ОПТИКЕ И НАНООПТИКЕ

В целях уменьшения энергопотребления во всём мире широко используются для остекления зданий стёкла с низкой излучательной способностью, так называемая технология LOW E. В нашей стране такие покрытия называют теплоотражающими или энергосберегающими (ТОП).

При получении теплоотражающих покрытий наиболее широко используются просветлённые окислами металлов серебряные покрытия. Из всего многообразия по физико-химическим свойствам для просветления серебряного слоя подходят: окись висмута, окись титана, по литературным данным – нитрид кремния. Другие окислы не проходят либо по физическим свойствам, либо из-за дороговизны. Окись висмута уже более 20 лет используется при производстве стекла с теплоотражающими покрытиями. К сожалению, стекло с ТОП на основе окиси висмута имеет неудовлетворительную химическую стойкость и даже при низкой стоимости исходных компонентов, не может конкурировать с современной продукцией передовых производителей.

Результаты новейших технологических исследований, с параметрами процессов, обычно не публикуются и не обсуждаются. Предлагается либо готовая продукция, либо комплекс оборудования с технологической поддержкой стоимостью в десятки миллионов долларов.

Предприятием «Профиль» в 2004 году были начаты технологические исследования по созданию ТОП с новыми покрытиями. Был проведен патентный поиск, проанализированы технологии и схемы установок для нанесения покрытий на стекла в городах Томске, Москве, Челябинске.

За время проведения исследований было практически опробовано 8 конструкций магнетронов и 6 типов источников питания. Разработана и эксплуатируется компьютеризованная система управления магнетронным напылением покрытий.

В настоящий момент технологически решена задача нанесения на строительное стекло размером $2 \times 3 \text{ м}^2$ покрытия на основе окиси титана. Высокий коэффициент преломления оптического излучения видимого спектра, крайне низкий коэффициент поглощения, высокая степень адгезии с подложкой, высокая химстойкость, высокая производительность и приемлемая себестоимость – вот неполный перечень свойств нового покрытия.

Данная технология позволяет получать покрытия на основе окиси титана с высокой повторяемостью свойств, с толщиной покрытия много меньше рабочей длины волны света. Наиболее перспективным это покрытие является при производстве стекла с ТОП. Полученные опытные образцы стекла с ТОП с окисью титана обладают высокой химической стойкостью. Однослойные

покрытия окиси титана на стекло имеют также и высокие декоративные свойства.

Исследования образцов стекол с окисью титана выполненные в ЗАО «СКБ», показали перспективность их применения в качестве внешних защитных стекол для оптической аппаратуры, длительно эксплуатирующейся вне помещений.

Известны самоочищающиеся поверхности с окисью титана, где используется эффект каталитического разложения загрязнений в присутствии ультрафиолетового излучения. Также обнаружен гидрофобный эффект при покрытиях стекол нанопленками [1].

Область применения разработанной технологии не должна ограничиваться только производством стеклопакетов. Перспективные направления это – самоочищающиеся покрытия, покрытия на рулонные материалы, покрытия для катализаторов и нанооптики. Кроме того, данная технология не ограничена только титаном и для других целей могут быть использованы другие металлы для создания высокостабильных оптических покрытий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Технологии миниатюризации «сверху – вниз» или «снизу – вверх» / В.Д. Вернер, П.П. Мальцев, А.Н. Сауров и др. // Нано и микросистемная техника. – М.: Техносфера, 2005. – 498 с.

© О.П. Кузнецов, М.М. Куниевский, Б.В. Поллер, В.А. Косинов, О.В. Косинов, В.А. Васильев,
2007

УДК 535.411

В.В. Покасов, Б.В. Поллер, С.И. Коняев
СГГА, Новосибирск

О ПОСТРОЕНИИ ЛАЗЕРНОГО ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ МЕДЛЕННЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ДЛЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

В связи с развитием технологий и конструкций малоразмерных объектов (наноструктур) возникла необходимость разработки систем контроля и метрологического обеспечения нового научно-технического направления. Одним из возможных подходов повышения разрешающей способности и точности измерений наноструктур реализовано устройство с фазовой модуляцией несущей.

Устройство предназначено для высокоточных измерений сравнительно медленно изменяющейся разности оптического пути плеч интерферометра Майкельсона. Работа устройства поясняется блок-схемой рис. 1.

Входной оптический блок обеспечивает необходимое согласование волновых фронтов оптического сигнала. Одно из зеркал интерферометра размещается на двух пьезокерамиках (ПМК) одна из них (БПМК) обеспечивает

фазовую модуляцию лазерного излучения, другая компенсирует фазовые приращения оптического сигнала на величину $\lambda/2$ (СПМК).

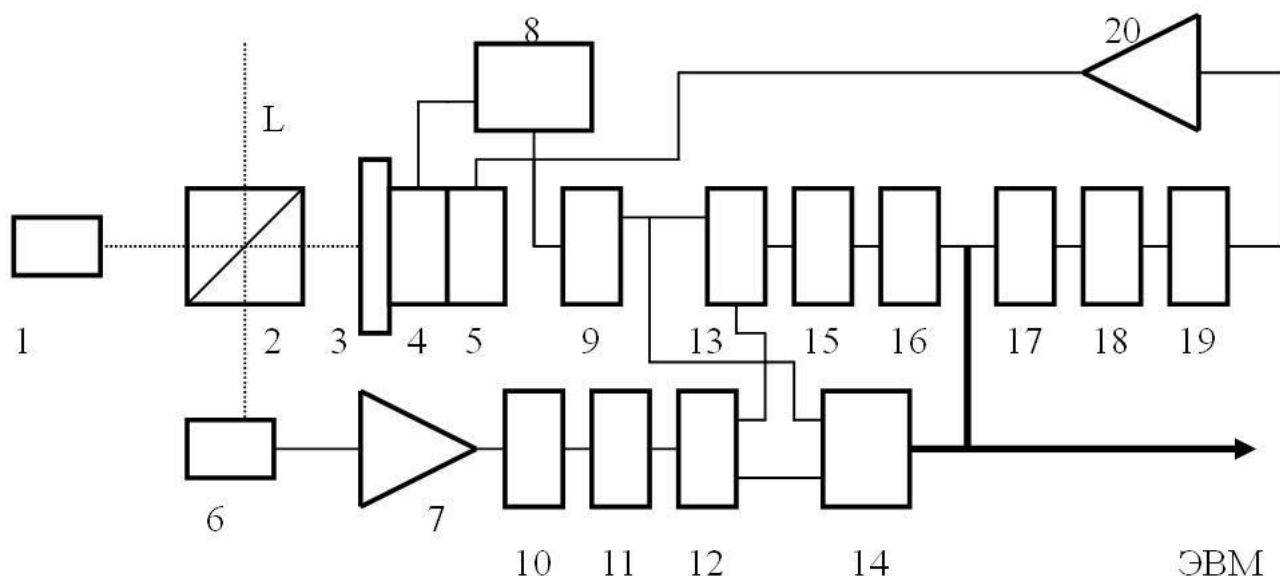


Рис. 1. Блок схема устройства измерения:

1 – лазер, 2 – светоделительный кубик, 3 – зеркало, 4 – БПМК, 5 – СПМК, 6 – фотоприемник, 7 – усилитель фотосигнала, 8 – генератор, 9 – формирователь импульсов для СД, 10 – полосовой фильтр, 11 – компаратор, 12 – формирователь импульсов для СД, 13 – СД, 14 – детектор направления изменения фазы, 15 – интегратор, 16 – АЦП, 17 – цифровой фиксатор уровня, 18 – цифровой компаратор, 19 – ЦАП, 20 – усилитель напряжения для управления следящей керамикой.

Установка реализует принцип слежения за приращением оптической длины волны в пределах $\lambda/2$. При прохождении одним из плеч интерферометра пути $L = \lambda/2$ происходит сброс (возврат следящей ПМК) в исходное состояние измеренного значения $\lambda/2$ и цикл повторяется вновь. В процессе измерения L число целых переходов оптического сигнала через $\pi/2$ подсчитывается как $L = k\lambda/2$ с учетом знака, то есть направления изменения оптического пути. Здесь k – это число переходов.

Согласно оптической схеме на фотоприемник (ФП) попадают совмещенные пучки лазерного излучения, один из которых дополнительно промодулирован по фазе с помощью БПМК. Частота модуляции ω задается стабилизированным кварцевым генератором. В данной установке частота модуляции 15 кГц. Второй лазерный пучек не модулируется. Разность фаз оптического сигнала в ФП определяется величиной (глубиной) модуляции керамикой БПМК и приращением разности фаз при изменении оптического пути то есть

$$\Delta\varphi = \Delta L(t) + \varphi(t).$$

Поскольку фотоприемник реагирует на изменение интенсивности в интерференционной картине, то выходной сигнал ФП, как известно, определяется соотношением:

$$U(t) = \kappa(A_1^2 + A_2^2 + A_1 A_2 \cos \Delta \varphi),$$

где κ – коэффициент преобразования интенсивности в электрический сигнал. Этот сигнал усиливается и подается на узкополосный фильтр. На выходе фильтра получаем модулированный сигнал

$$U(t) = \kappa \{ A_1 A_2 \cos[(S_0 + \Delta S(t)) + \omega t] \},$$

где A_1, A_2 – амплитуды интенсивности оптического сигнала на ФП; S_0 – величина смещения фазы оптического сигнала быстрой керамикой; $\Delta S(t)$ – приращение фазы при изменении L .

После преобразования сигнала с ФП осуществляется синхронное детектирование на частоте ω (умножением частоты генератора на синфазный ему сигнал с ФП) получаем выходной сигнал пропорциональный косинусу приращения фазы (изменения плеча L)

$$U_{\text{фп}}(t) = \cos[S_0 + \Delta S(t)].$$

Полученный сигнал через схемы интегрирования и преобразования подается на следящую керамику с условием соблюдения отрицательного знака приращения по контуру и условий устойчивости системы. Изменение длины следящей керамики СПМК обеспечивает компенсацию выходного сигнала $U_{\text{фп}}(t)$ с точностью до S_0 .

Таким образом, выходной сигнал интегратора пропорционален приращению длины ΔL и может быть прокалиброван в единицах длины. Использование в цепях интегрирования и преобразования указанного сигнала АЦП и ЦАП позволяет обрабатывать результаты измерения на ЭВМ в реальном масштабе времени.

Направление изменения перемещения (знак) определяется фазовым детектором, на выходе которого формируется признак изменения направления и передается в ЭВМ.

В устройстве использованы АЦП и ЦАП повышенного быстродействия, что и объясняет невысокую разрядность (шесть разрядов) преобразования. Цена младшего разряда АЦП $\delta = 0.098$ рад, это позволяет перекрывать диапазон от $-\pi/2$ до $+\pi/2$ радиан. Вес седьмого разряда равен 2π радиан.

Достоинство реализации этой схемы заключаются в возможности измерения и обработки сигнала на переменном токе, что снижает требования к узлам обработки сигнала по стабильности параметров и соответственно повышает точность измерения.

Проведенные экспериментальные измерения, с использованием гелий – неоновый лазер показывают, что рассмотренный метод обеспечивает точность измерения линейного перемещения не хуже 20 нм на один вольт выходного напряжения.

Использование в схемотехнических решениях качественных (прецизионных) элементов и лазеров ультрафиолетового диапазона позволит существенно увеличить разрешающую способность и точность измерения рассматриваемым методом, что представляет значительный интерес в метрологическом обеспечении и контроле для нанотехнологий.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ТРАСС ДЛЯ ЛИНИЙ АТМОСФЕРНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

Для решения различного рода прикладных задач в области беспроводной передачи данных все чаще применяются атмосферные линии связи оптического диапазона. Для оптимизации характеристик приемных и передающих устройств оптических каналов связи была поставлена задача построения математической модели, достоверно описывающей поведение импульсного и непрерывного оптического сигнала в атмосфере.

Математическая модель может быть представлена в виде 2 отдельных математических моделей, описывающих аэрозольное и Рэлеевское рассеяние. Для оптимизации работы с математической моделью, были написаны 3 программы в среде Mathcad: Модель Рэлеевского рассеяния, Модель многократного рассеяния на основе геометрической оптики и Модель многократного рассеяния, как эффекта ореола, по теории Нуссенцвейга.

Математическая модель Рэлеевского рассеяния, применительно к оптическим линиям связи без прямой видимости, была подробно описана в работе [1], поэтому далее будут изложены только основные моменты.

Исходя из теории молекулярного рассеяния, очевидно, что само молекулярное рассеяние является достаточно малой величиной, накладывающей жесткие требования к чувствительности приемной системы, что особенно остро проявляется на значительных расстояниях. Однако учет индикатрисы молекулярного рассеяния [2] показывает, что величина захватываемого приемником рассеянного светового потока, существенно зависит также и от угла наклона приемника относительно перпендикуляра к оси передатчика.

Таким образом, наибольшая интенсивность принимаемого светового потока соответствует направлению приемника вдоль оптической оси при приеме прямого и обратного рассеяния.

Случай импульсного сигнала представлен на рис. 1, где изображено искажение формы импульса для импульсных сигналов различной длительности $\tau = 0.1$ мкс и $t = 0.01$ мкс, значения оптической мощности рассеянного сигнала приведены в ближней зоне на расстоянии 3 метра между приемником и передатчиком. При удалении приемника от передатчика происходит экспоненциальное уменьшение принимаемого сигнала, обусловленное атмосферным поглощением.

Таким образом, можно наблюдать, что при увеличении частоты импульсных последовательностей наблюдается перекрытие соседних импульсов, что может привести к нарушению стабильности системы. Решением данной проблемы может являться ограничение диаграммы направленности приемника пространственной длиной импульса в горизонтальной плоскости луча передатчика, что не позволит приемнику принимать одновременно более одного импульса, однако при этом существенно падает интенсивность

принимаемого сигнала, что приводит к ужесточению требований по чувствительности приемного модуля.

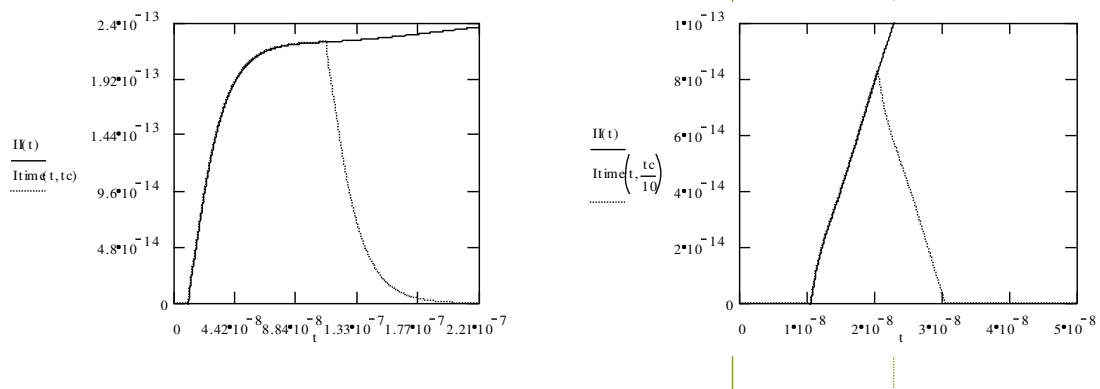


Рис. 1. Деформация формы прямоугольного импульса длиной 0.1 мкс и 0.01 мкс при приеме рассеянного сигнала

В случае многократного аэрозольного рассеяния индикатрису рассеяния на одиночной взвешенной капле можно описать несколькими способами, в данной работе использованы способы на основе геометрической оптики и квантовой механики (теория Нуссенцвейга).

С точки зрения геометрической оптики можно рассматривать каплю, как сферическую линзу с коэффициентом преломления n_1 , тогда при условии, что расстояние между каплей и источником света много больше диаметра капли ($l \gg a$), падающее излучение можно рассматривать, как не расходящийся коллимированный световой пучок (рис. 2).

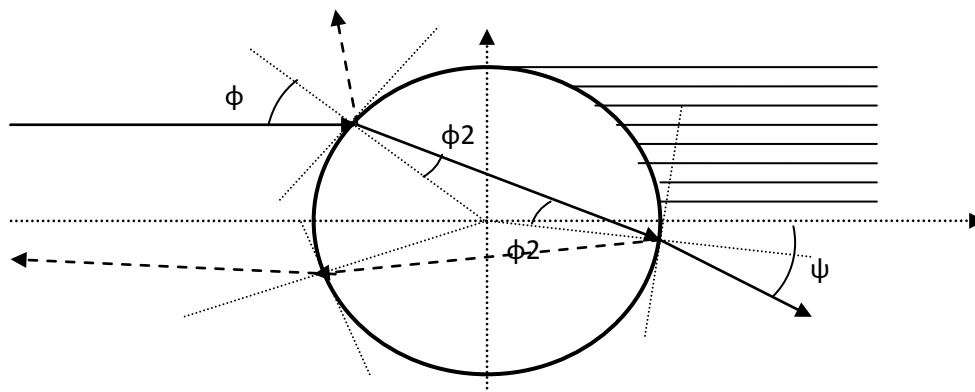


Рис. 2. Схема хода лучей в сферической капле

В соответствии с законами преломления и полного внутреннего отражения возникает двойное лучепреломление при пересечении лучом поверхности сферы, которое можно описать согласно закону преломления.

В этом случае угол излучения оптического сигнала при прохождении капли будет равен:

$$\psi(\phi) := \pi - 2 \cdot \left(\arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \cdot \sin(\phi)\right) + \phi \right), \quad (1)$$

где n_1, n_2 – показатели преломления воздуха и аэрозоля.

Однако формула (1) будет действовать только в пределах зоны ограниченной согласно закону полного внутреннего отражения: $-\arcsin(n_1/n_2) < \phi < \arcsin(n_1/n_2)$.

При переходе к полярным координатам распределение мощности, принимаемое одинаковым в каждой точке поперечного сечения пучка, будет иметь вид:

$$P(\phi) := P_0 \cdot \cos(\phi), \quad (2)$$

где P_0 – показатель оптической мощности в каждой точке поперечного сечения пучка, общая мощность может быть получена путем интегрирования показателя преломления по всей площади поперечного сечения пучка, в случае двумерного пространства, интегральная мощность пучка может быть получена, как произведение $P_0 \cdot a$, где a – радиус капли, ϕ – полярный угол.

Для получения распределения мощности светового излучения при прохождении капли используется функция $\phi(\psi)$ – обратная функции (1).

$$\phi(\psi) := \arctan \left[\frac{1}{\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)} \cdot \left(\cos\left(\frac{\psi}{2}\right) - \frac{n_1}{n_2} \right) \right]. \quad (3)$$

Таким образом, индикатриса распределения энергии при прохождении капли, без учета симметричной отрицательной составляющей разреза капли и зон полного внутреннего отражения будет выглядеть следующим образом:

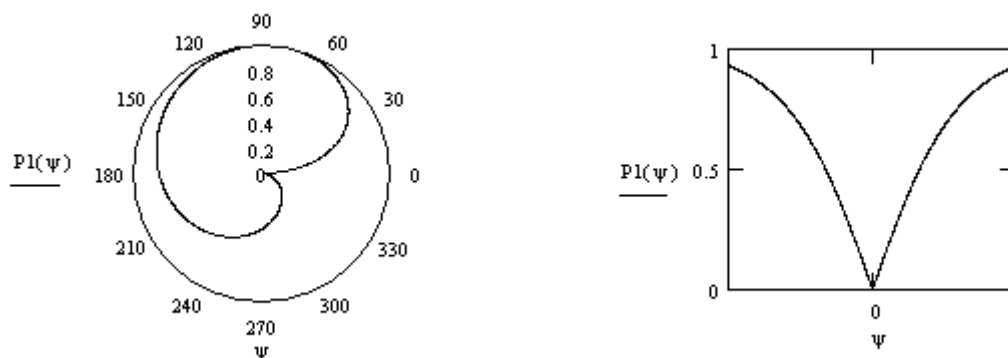


Рис. 3. Индикатриса распределения энергии при прохождении капли без учета зон полного внутреннего отражения

В зоне полного внутреннего отражения, угол отраженного сигнала $\psi(\phi) = \pi - 2 \cdot \phi$, откуда следует, что в данной зоне индикатриса принимает следующий вид:

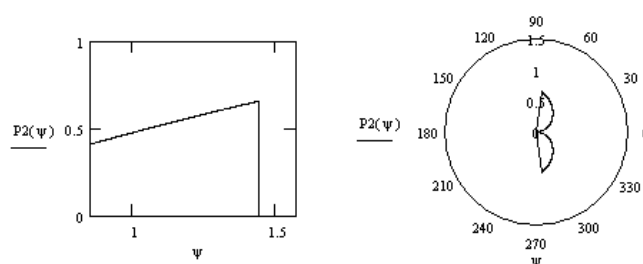


Рис. 4. Индикатриса распределения энергии при прохождении капли в зонах полного внутреннего отражения

Также данная задача может быть решена на основе квантовой механики по теории Нуссенцвейга, подробно описанной в работе [6].

Нуссенцвейгом была построена теория рассеяния плоской волны на прозрачной сфере (в нашем случае – на капле воды). Его теория построена на формальной аналогии между уравнением, описывающим распространение света для монохроматической волны с угловой частотой ω внутри сферы радиуса a .

$$\nabla^2 \varphi(\mathbf{r}) + \frac{n^2 \omega^2}{c^2} \varphi(\mathbf{r}) = 0,$$

и уравнением Шредингера, описывающим движение частицы массой m в области под действием постоянного потенциала V_0

$$\nabla^2 \Phi(\mathbf{r}) + \frac{2m(E - V_0)}{\hbar^2} \Phi(\mathbf{r}) = 0,$$

Для решения этого уравнения Нуссенцвейг использовал модифицированное преобразование Ватсона, впервые такое решение было рассмотрено итальянским физиком Редже [5], в честь которого полюсы λ_i называются полюсами Редже, в данном контексте они описывают зависящий от угла затухающий множитель волновой функции.

Итог данного решения изображен на рис. 5.

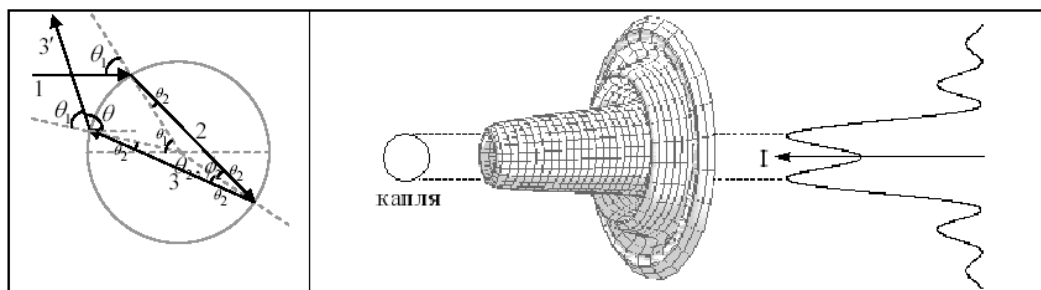


Рис. 5. Распределение интенсивности рассеянного света относительно области геометрической тени капли: с уменьшением радиуса капли увеличивается центральный вклад интенсивности

Угловое распределение интенсивности следует закону $J_0^2(k \cdot a \cdot \psi)$, где ψ – угол наблюдения ореола.

Для исследования задачи многократного рассеяния применялся метод Монте-Карло, как решение прямой задачи рассеяния. Вычислительный алгоритм метода Монте-Карло содержит следующие этапы:

1. Розыгрыш начального движения и начального положения кванта;
2. Розыгрыш пробега до столкновения;
3. Розыгрыш размера рассеивающей частицы;
4. Вычисление ослабления интенсивности (геометрическая оптика или теория Нуссенцвейга);
5. Проверка на затухание кванта или на выход за границы облака.

По каждому кванту, прошедшему через облако сохраняется информация об его интенсивности и угле вылета, которая впоследствии используется для построения угловых диаграмм интенсивности.

Закключение

Метод стохастического моделирования Монте-Карло может быть успешно использован для решения задач динамического многократного рассеяния электромагнитного излучения в случайно-неоднородных средах. Как для точечных частиц, так и для частиц, размер которых сравним с длиной волны излучения, метод Монте-Карло позволяет учесть влияние рассеяния различных порядков, что не удастся сделать аналитически. В то же время при исключении влияния рассеяния низких порядков результаты численного моделирования хорошо согласуются с результатами, характерными для диффузионного приближения уравнения переноса.

На основании всех вышеизложенных аспектов рассеяния оптического сигнала была написана программа в ПК MathCad, позволяющая строить аналитические модели произвольных оптических трасс для лазерных линий связи без прямой видимости, работающих в произвольном диапазоне длин волн. Аналитическая модель в достаточной степени соответствует экспериментально полученным данным по рассеянию оптического излучения в атмосфере, что позволяет использовать ее для определения основных параметров приемников и передатчиков оптической линии связи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Складов Д.Ф. Моделирование атмосферных трасс для линий оптической связи без прямой видимости для обеспечения геодезических и геологических работ / Д.Ф. Складов // Междунар. научн. конгр. "Гео-Сибирь-2006". – Новосибирск: СГГА, 2006. – С. 161–165.
2. Поллер Б.В. Характеристики атмосферного канала связи с рассеянием / Б. В. Поллер, Ю.И. Щетинин, С.И. Коняев и др. // VIII МНТК «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж, 2002. – С. 735–745.
3. Исмару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах / А. Исмару. – Москва: Мир, 1981. – 598 с.
4. Поллер Б.В. Об эффективности передачи сообщений в атмосферных оптических каналах связи с рассеянием / Б.В. Поллер, Ю.И. Щетинин, Б.В. Федоров // IX МНТК «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж, 2003. – С. 397–402,
5. Нуссенцвейг Х.М. Причинность и дисперсионные соотношения / Х.М. Нуссенцвейг. – М.: Мир, 1976. – 464 с.

ТЕРМОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ПРЕДЕЛОВ ВЫНОСЛИВОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПРИБОРОВ

Исследование механических свойств материалов на основе изучения изменяющегося температурного поля образцов при их испытаниях проводилось ранее [1, 2], но не получило практического применения из-за несовершенства используемой аппаратуры. В последние два десятилетия появились довольно совершенные приборы для неконтактного измерения температуры (тепловизоры, радиометры), что позволило развить и реализовать на практике этот метод. Проведенные нами исследования показывают, что термодинамический метод позволяет надежно, быстро, достаточно просто определять такую важнейшую характеристику циклической прочности образцов, как их предел выносливости.

Методика отработывалась при лабораторных испытаниях двух типов образцов: тонкостенных трубчатых и призматических консольных, изготовленных из стали 45. Посередине трубчатого образца наносили концентрическую риску – очаг накопления усталостной повреждаемости. Трубчатые образцы подвергались продольным колебаниям ($f = 460$ Гц), а призматические – изгибным ($f = 130$ Гц) на вибрационной установке резонансного типа «Турбо-4». Осуществляли поэтапную циклическую наработку образцов со ступенчато-возрастающей от этапа к этапу амплитудой колебаний, начиная с напряжений, заведомо меньших предполагаемого предела выносливости, и заканчивая несколькими превосходящими его. Продолжительность наработки на каждом этапе была относительно небольшой и составляла не более 3 % от обычно принятой базы классических испытаний при напряжениях ниже предполагаемого предела выносливости или от долговечности образца при напряжениях выше предела выносливости.

С помощью тепловизора «Рубин МТ» нижний порог чувствительности которого составляет $0,1$ °С, на каждом этапе наработки развертывалось во времени тепловое поле поверхности образцов. На одном из первых этапов наработки тепловизор фиксировал зону повышенного тепловыделения – предполагаемый очаг накопления усталостных повреждений (очаг разрушения), который у трубчатых образцов располагался в зоне риски, а у призматических – в районе заделки (зона максимальных напряжений). После каждого этапа наработки образец охлаждался до исходного состояния и записывалась осциллограмма его свободных затухающих колебаний, начиная от тех амплитуд, при которых происходила наработка. Режим свободных затухающих колебаний осуществлялся в специальном виброизолированном устройстве, приспособленном для измерения уровня внутреннего трения образцов.

Такая схема испытаний позволила определять индивидуальные пределы выносливости образцов методом внутреннего трения [3], что в дальнейшем было использовано для сопоставления результатов.

Наблюдение за кинетикой температуры очага разрушения позволило разработать энтропийный подход для определения индивидуального предела выносливости как образцов, так и конкретных деталей [4]. Такой подход в принципе применим только для достаточно медленных равновесных или квазистатических процессов, обладающих свойством обратимости. Но на практике он используется и для неравновесных процессов. При этом исходят из гипотезы локального равновесия, предполагающей справедливость соотношений равновесной термодинамики для достаточно малых объемов неравновесных систем. Эта гипотеза вполне приемлема для рассмотрения процессов накопления усталостных повреждений, предшествующего спонтанному росту трещины, так как этот процесс протекает достаточно медленно. Он характеризуется весьма сложной физико-механической картиной в очаге разрушения, где имеют место различные энергетические, дислокационные и массовые необратимые потоки, обуславливающие локальное производство энтропии.

Возьмем известное выражение [4] для приращения удельной энтропии очага разрушения исследуемого объекта за достаточно малый промежуток времени

$$\Delta S = \frac{2C_v(T_2 - T_1)}{\rho(T_2 + T_1)}. \quad (1)$$

Здесь C_v , Дж/м³Г – удельная теплоемкость при постоянном объеме; ρ – плотность материала очага; T_1 и T_2 – соответственно температуры очага в начале и конце рассматриваемого промежутка времени.

Выражение (1) позволяет по изменению температуры предполагаемого очага накопления усталостных повреждений работающей детали рассчитывать изменение удельной энтропии очага и по ней определять предел выносливости детали. С этой целью на каждом этапе наработки через определенный промежуток времени $\Delta \tau$ дважды фиксируют температуру очага разрушения T_1 и T_2 , по формуле (1) рассчитывают изменение энтропии ΔS , а затем строят график $\Delta S = \Delta S(\sigma_a)$. Здесь σ_a – амплитудное напряжение очаге, характеризующее соответствующий этап нагружения. График имеет резко выраженный излом, абсцисса которого, как это следует из очевидных физических представлений, и является индивидуальным пределом выносливости испытанного образца (детали).

На рис. 1 показана кинетика температуры $T = T(\tau, \sigma_a)$ очага зарождения усталостной трещины для образца № 1 при изгибных колебаниях на каждом этапе наработки. Из приведенных кривых видно, что при нагружении образца с амплитудными напряжениями, не превышающими предел выносливости ($\sigma_a < \sigma_{-1}$), температура очага через некоторое время практически стабилизируется. Если напряжения превышают предел выносливости ($\sigma_a > \sigma_{-1}$), стабилизация температуры не происходит.

Такие графики строились для всех испытанных образцов при продольных и изгибных колебаниях (порядок приращения температуры в обоих экспериментах был одинаков).

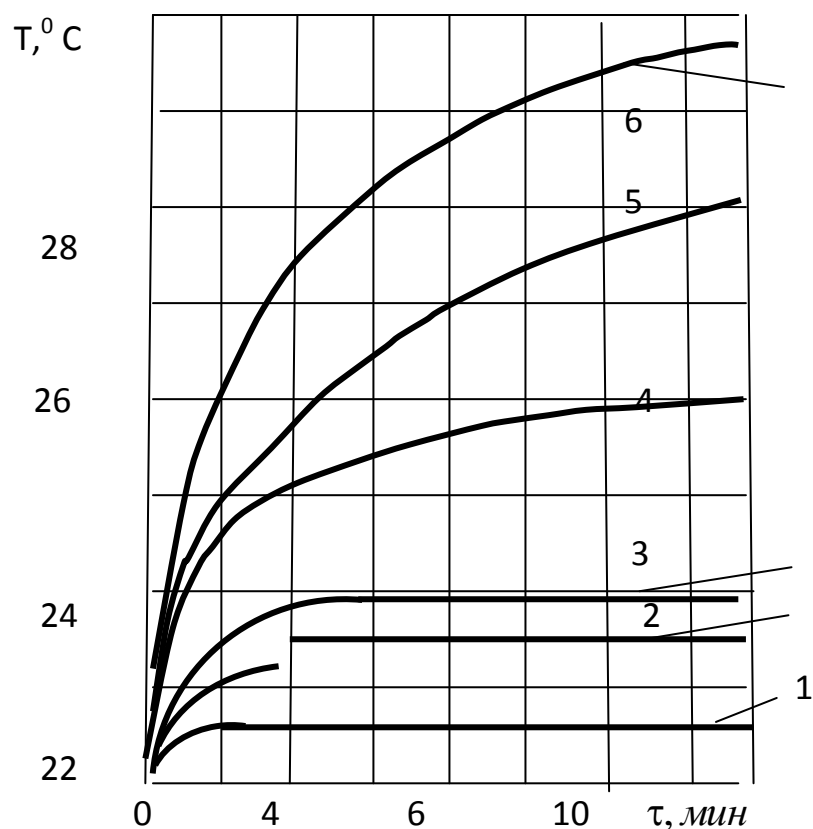


Рис. 1. Кинетика температуры очага зарождения усталостной трещины для образца № 1 (кривая 1: $\sigma_{a1} = 190 \text{ МПа}$; кривая 2: $\sigma_{a2} = 220 \text{ МПа}$; кривая 3: $\sigma_{a3} = 230 \text{ МПа}$; кривая 4: $\sigma_{a4} = 257 \text{ МПа}$; кривая 5: $\sigma_{a5} = 270 \text{ МПа}$; кривая 6: $\sigma_{a6} = 280 \text{ МПа}$)

Согласно принятой методике обработки экспериментальных кривых $T = T(\tau, \sigma_a)$, температура T_1 и T_2 фиксировалась на каждом этапе нагружения через одинаковые промежутки времени. Интервал времени $\Delta\tau$ между измерениями температуры должен быть, с одной стороны, достаточно протяженным для того, чтобы зафиксировать приращение температуры, а с другой стороны, он ограничивается тем обстоятельством, что на этом промежутке времени приращение температуры аппроксимируется линейной зависимостью (1).

Установлено, что наиболее высокая точность прогнозирования предела выносливости получается в том случае, если рассматривать $\Delta\tau$ в начале стадии относительной стабилизации температуры. В наших экспериментах $\Delta\tau = 2 \text{ мин}$.

Графики $\Delta S = \Delta S(\sigma_a)$, построенные по разработанной методике для трех образцов при изгибных колебаниях, приведены на рисунке 2. В расчетах принималось: $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$, $C_v = 5,16 * 10^6 \text{ Дж/м}^3 * \text{с}$.

Из рис. 2 видно, что у всех испытанных образцов изменение энтропии ΔS до предела выносливости незначительно, а затем резко возрастает. Графики $\Delta S = \Delta S(\sigma_a)$ имеют более характерный излом, чем соответствующие кривые изменения коэффициента поглощения энергии, по которым определяется предел выносливости методом внутреннего трения. Из этого следует, что энтропия является более чувствительным параметром происходящих в детали структурных изменений, чем такой структурно чувствительный параметр как коэффициент поглощения энергии.

$$\Delta S, \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \text{К}}$$

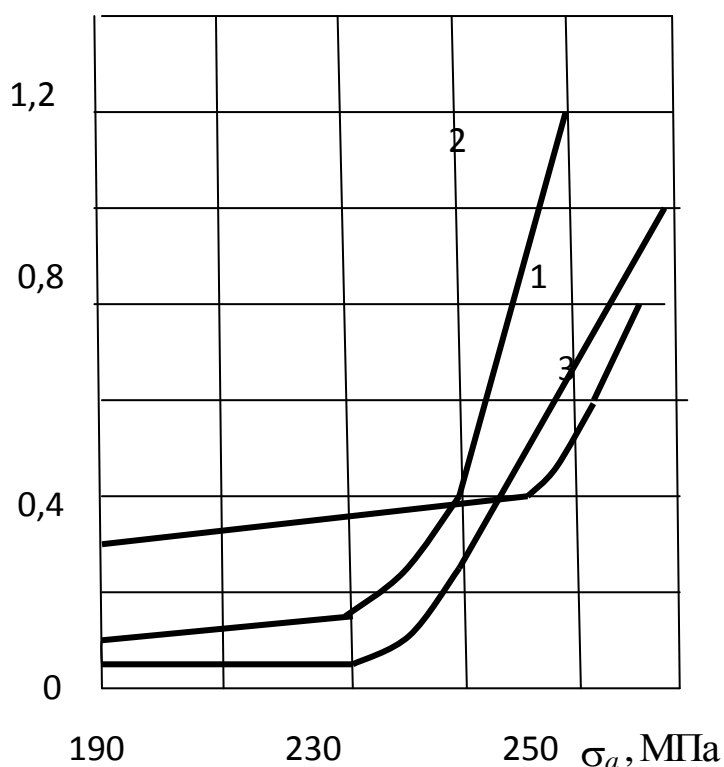


Рис. 2. Графики изменения энтропии очага разрушения в зависимости от амплитудного напряжения σ_a , построенные по результатам экспериментов при изгибных колебаниях образцов. Номера у кривых соответствуют номеру образцов

В приведенной ниже таблице (табл. 1) сопоставлены пределы выносливости образцов, определенные описанным и известным методами внутреннего трения. Сравнение результатов показывает, что максимальное расхождение составляет 4,73 %. Сравнительно большой разброс в полученных значениях индивидуальных пределов выносливости вызван недостаточным

уровнем технологии изготовления образцов (отклонение размеров, риски, чистота поверхности и т. д.).

Предел выносливости, определенный методом Велера для партии металла, из которой изготавливались образцы, $\sigma_{-1} = 287$ МПа.

Предложенный способ определения индивидуального предела выносливости прост, надежен, результат получается намного быстрее, чем по классическому методу Велера. Термодинамический метод является неразрушающим и, следовательно, позволяет осуществлять 100%-ный контроль циклической прочности деталей.

Таблица 1. Сравнительные результаты испытания образцов

Номер образца	Продольные колебания			Изгибные колебания		
	σ_{-1} , МПа	σ_{-1}^* , МПа	$\frac{\sigma_{-1}^* - \sigma_{-1}}{\sigma_{-1}^*} 100\%$	σ_{-1} , МПа	σ_{-1}^* , МПа	$\frac{\sigma_{-1}^* - \sigma_{-1}}{\sigma_{-1}^*} 100\%$
1	180	184	2,22	232	243	4,73
2	195	200	2,56	244	248	1,62
3	210	218	3,81	268	265	1,12
4	200	202	1	210	218	3,8
5	220	228	3,64	207	212	2,42
Примечание. σ_{-1} - предел выносливости, определяемый по методу внутреннего трения. σ_{-1}^* - предел выносливости, определяемый по предлагаемому методу						

Предложенный метод внедрен на Новосибирском заводе «Сибтекстильмаш» для контроля прочности торсионных валов и пружин челнока ткацкого станка и может широко использоваться для контроля циклической прочности силовых деталей приборов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исследование напряжений и деформаций термоэлектрическим методом. – Киев: Наукова думка, 1984. – 100 с.
2. Федоров В.В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел / В.В. Федоров. – Ташкент: ФАН, 1979. – 167 с.
3. Шпигельбурд И.Я. Контроль усталостной прочности деталей машин методом внутреннего трения в производственных условиях / И.Я. Шпигельбурд, Г.А. Куриленко, В.Г. Атапин // Рассеяние энергии при колебаниях механических систем. – Киев: Наукова думка, 1982. – С. 228–236.
4. А.С. 1499167 ССР, МКИ 4 G 01 N 3/32. Способ определения предела выносливости / Г.А. Куриленко. – Бюл. изобр., 1989. – № 29.

© Г.А. Куриленко, М.Б. Устюгов, 2007

РАЗОМКНУТАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ КРЕСЛА-ТРЕНАЖЕРА ПИЛОТА, УПРАВЛЯЕМОГО ПО РЫВКУ

1. Введение

В нашей работе [1] говорилось о построении разомкнутых моделей управления программных аэрокосмических, мехатронных и электромеханических систем высших порядков. К этим системам относятся системы с неполными дифференциальными программами движения, начиная с нелинейных по ускорениям. Уравнения движения таких систем выводятся в рамках Расширения Классической Механики на движение систем с неголономными связями высших порядков и являются основой разомкнутых моделей управления. Результаты нашего варианта построения такого Расширения Механики опубликованы в ряде работ, например, в [1–7].

В данной работе кратко представлены только «Appell – подобная» – $R_s A$ и «LaGrange – подобная» – $R_s L$ аналитические формы уравнений движения из [1]. На их основе и на Расширении постулата Максвелла на электромеханические системы высших порядков строятся «LaGrange – Maxwell – подобная»- $R_s L-M$ и $R_s A-M$ – «Appell – Maxwell – подобная» формы уравнений, удобные для решения прикладных задач электромеханики и мехатроники высших порядков. В качестве примера построена плоская электромеханическая разомкнутая модель управления электромеханического испытательного стенда – “кресла – тренажера” пилота или космонавта, управляемого по рывку.

2. Разомкнутые модели управления движением

Представим движение системы как движение Изображающей Точки (ИТ) в пространстве E_{3N} по Риманову многообразию R_s [1–4]. Оно определено голономными связями, определяющими конфигурацию R_s числом обобщенных координат системы q^j и стеснено неголономными связями – неполными программами движения вида:

$$f^{(k)p} == f^{(k)p}(t, q^j, \dots, q^j) = 0, \quad p < s. \quad (1)$$

Согласно [1–3] Appell – подобная" – $R_s A$ и "LaGrange – подобная" – R_s уравнений движения систем с неполными дифференциальными программами движения", определяющие с точки зрения теории управления разомкнутую модель управления, имеют вид:

$R_s A$ – форма

$$\left\{ \begin{array}{l} \partial_u^j K_u = \lambda_p \partial_k^j f^p + Q_j^{(r)}(\vec{F}) + Q_j^{(r)}(\vec{T}) = 0 \\ (u) \quad (u-1) \\ q^j \partial_k^j f^p + W^p(t, q^j, \dots, q^j) = 0 \\ j = 1, 2, \dots, s, \quad p \leq s-1, \quad u = r+2, \quad q = 1, 2, \\ \text{если } k \leq 1, \text{ то } r = 0, \text{ если } k \geq 2, \text{ то } r = k - q. \end{array} \right. \quad (2)$$

$R_s L$ – форма

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{\Lambda}_j^{(r+1)}(K_{(r+1)}) = \lambda_p \partial_k^j f^p + Q_j^{(r)}(\vec{F}) + Q_j^{(r)}(\vec{T}) \\ (r+2) \quad (r+1) \\ q^j \partial_k^j f^p + W^p(t, q^j, \dots, q^j) = 0 \\ j = 1, 2, \dots, r+2, \quad p \leq r+1, \quad q = 1, 2, \\ \text{если } k \leq 1, \text{ то } r = 0, \text{ если } k \geq 2, \text{ то } r = k - q. \end{array} \right. \quad (3)$$

Здесь, согласно [1], $Q_j^{(r)}$ – есть обобщенный силовой фактор r -го порядка:

$$Q_j^{(r)} = (\vec{F} \cdot \vec{e}_j) = (\vec{F} \cdot \partial_0^j \vec{x}) = \sum_{\ell=1}^N (f_\ell^{(r)} \cdot \partial_0^j \vec{r}_\ell). \quad (4)$$

Физическая величина K_n есть универсальная динамическая мера движения Кинэта.

$$K_n = M(\vec{x}^{(n)})^2 / 2 = \frac{1}{2} \sum_{\ell=1}^N m_\ell (\vec{r}_\ell^{(n)})^2. \quad (5)$$

Заметим, что $K_1 = T$ является кинетической энергией системы, а $K_2 = S$ – функцией Аппеля – энергией ускорений [8]. $\hat{\Lambda}_j^{(r+1)} = d_t \partial_{r+1}^j - (r+1)^{-1} \partial_r^j$ есть оператор Эйлера – Лагранжа. Параметры $q = 1$ при нелинейных, $q = 2$ при линейных по $x_i^{(k)}$ связях. $\vec{F}(F_i) = Q_i^F \vec{e}^i$ – вектор силового фактора задаваемых сил равен $F_i = f_i / \sqrt{\mu_i}$, $\mu_i = m_i / M$, $i \leq 3N$, а f_i есть i -компонента задаваемых сил, Q_i^F – задаваемая обобщенная сила; $\vec{e}^i$ – ИТ – базисные координатные векторы касательного к R_S пространства E_S $\vec{e}^i = g^{ij} \vec{e}_j$; g^{ij} – контравариантные компоненты метрического тензора R_S определяются структурой выражения кинетической энергии системы [8]. Вектор – функция $\vec{T}_k \perp \partial_k f^p$ определяет отличную от k -градиентной часть управления. Неопределенные множители Лагранжа, представленные в разных видах как $\lambda_p = \lambda_p(t) = \frac{(r+2)}{\mu_p} = \frac{(r)}{\eta_p}$, могут быть найдены в результате решения систем уравнений (2–3).

3. Разомкнутые модели управления электромеханических систем и мехатронных модулей высших порядков

В динамике электромеханических систем и мехатронных модулей высших порядков имеет место аналог уравнений Лагранжа – Максвелла – $RsL-M$ – форма уравнений, которая выглядит согласно [1] так:

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{A}_j^{(r+1)}(L_{(r+1)}) = \lambda_p \partial_k^j f^p - \partial_{r+1}^j R_{(r+1)} + Q_j^{(r)}(\vec{F}) + Q_j^{(r)}(\vec{T}) \\ q^{(s)} \partial_k^j f^p + W^p(t, q^{(s-1)}_j, \dots, q^j_j) = 0 \\ j = 1, 2, \dots, s, \quad p \leq s-1, \quad s = r+2, \quad q = 1, 2, \\ \text{если } k \leq 1, \text{ то } r = 0, \text{ если } k \geq 2, \text{ то } r = k - q \end{array} \right. \quad (6)$$

Здесь $L_{(r+1)}$ и $R_{(r+1)}$ – функции Лагранжа и Релея $(r+1)$ -го порядка – аналоги классических функции Лагранжа и Релея. Они вычисляются по формулам:

$$L_{(r+1)} = L_{(r+1)}^{mex} + L_{(r+1)}^{\mathcal{E}l}, \quad R_{(r+1)} = R_{(r+1)}^{mex} + R_{(r+1)}^{\mathcal{E}l}, \quad (7)$$

При этом

$$L_{(r+1)}^{mex} = K_{(r+1)}^{mex} - \Pi_{(r)}^{mex}, \quad L_{(r+1)}^{\mathcal{E}l} = K_{(r+1)}^{\mathcal{E}l} - \Pi_{(r)}^{\mathcal{E}l}. \quad (8)$$

$\Pi(r)$ – (r) -й аналог потенциальной энергии в таких электромеханических системах, для которых она вычисляется по формуле

$$\Pi = k_{ij} q_i q_j / 2. \quad (9)$$

Тогда функции $\Pi_{(r)}$ и $R_{(r+1)}$ имеют вид:

$$\Pi_{(r)} = k_{ij}^{(r)} q_i q_j / 2, \quad R_{(r+1)} = r_{ij}^{(r+1)} q_i q_j / 2, \quad (10)$$

Здесь k_{ij} и r_{ij} – квазиупругие и диссипативные коэффициенты системы.

Если же потенциальная энергия системы представляется в виде, отличном от (10), то уравнения движения составляются в $RsA-M$ форме

$$\left\{ \begin{array}{l} \partial_u^j K_u = \lambda_p \partial_k^j f^p - \partial_{r+1}^j R_{(r+1)} + Q_j^{(r)}(\Pi) + Q_j^{(r)}(\vec{F}) + Q_j^{(r)}(\vec{T}) \\ q^{(u)} \partial_k^j f^p + W^p(t, q^{(u-1)}_j, \dots, q^j_j) = 0 \\ j = 1, 2, \dots, s, \quad p \leq s-1, \quad u = r+2, \quad q = 1, 2, \\ \text{если } k \leq 1, \text{ то } r = 0, \text{ если } k \geq 2, \text{ то } r = k - q \end{array} \right. \quad (11)$$

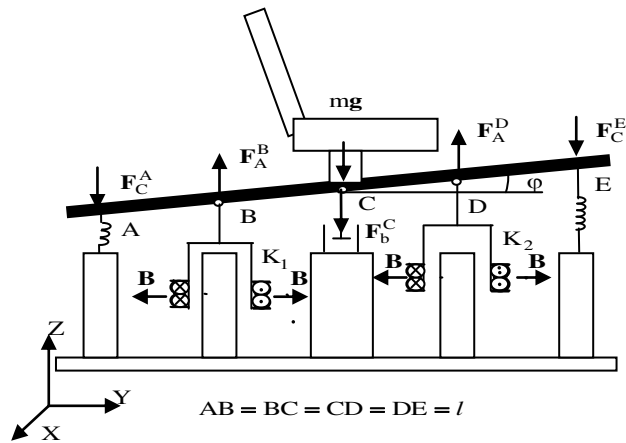
Здесь

$$Q_{j(\Pi)}^{(r)} = (d_t^{(r)}(-\partial_0 \Pi) \cdot \vec{e}_j). \quad (12)$$

Уравнения (6) и (11) адекватно описывают движение электромеханических систем и мехатронных модулей с неполными дифференциальными программами движения (1) и являются основой разомкнутых моделей управления таких систем.

Пример

Известно, что живой организм наиболее неприятно реагирует на резкие и неожиданные изменения ускорения, то есть на рывок. В качестве примера рассмотрим разомкнутую модель управления движением плоской модели (z, φ) кресла – тренажера пилота, управляемого по рывку и представленного на рисунке.



Здесь: m – масса всей системы,

$J_{cx} = J_c$ – момент инерции тренажера относительно оси x ; c – жесткость пружин; b – коэффициент демпфирования; B – магнитное поле в зазоре; R – активное сопротивление катушки; L – индуктивность катушки; n – число витков катушки; r – средний радиус катушки. Управляющие напряжения U_1, U_2 подаются на катушки. Силы Ампера F_A^B, F_A^D являются управляющими силами. За механические обобщенные координаты взяты: $q_{1, mex} = z_c = x$ – отклонение центра масс стола от положения статического равновесия, $q_{2, mex} = \varphi$ – угол φ . Будем считать его малым. Заряды, протекающие по катушкам K_1 и K_2 – $q_{1, эл} = q$, $q_{2, эл} = e$, взяты за электрические обобщенные координаты. При этом – $I_q = q$, $I_e = q_e$.

Управление движением тренажера осуществим, например, в соответствии с неполной дифференциальной программой движения, задаваемой уравнением

$$f = K_2^{mex} - K_{20}^{mex} = 0. \quad (13)$$

Составим его уравнения движения в $R_s L$ - M -форме. В результате уравнения разомкнутой модели управления движением кресла-тренажера в переменных $x, \varphi, U_q, U_e, \eta$ примут вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} m \ddot{x} + (b - \eta m) \dot{x} + c x = 0, \quad J(\ddot{\varphi} - \eta \dot{\varphi} - \dot{\varphi}^3) + cl^2 \dot{\varphi} = 0 \\ L \frac{d}{dt} (\eta (ml \ddot{x} - J \ddot{\varphi})) + R \eta (ml \ddot{x} - J \ddot{\varphi}) = 4\pi r n l B U_q \\ L \frac{d}{dt} (\eta (ml \ddot{x} + J \ddot{\varphi})) + R \eta (ml \ddot{x} + J \ddot{\varphi}) = 4\pi r n l B U_e \\ m \ddot{x} + J(\ddot{\varphi} + 2(\dot{\varphi})^3) \ddot{\varphi} = 0 \end{array} \right. \quad (14)$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Родионов А.И. К динамике мехатронных систем с неполными дифференциальными программами движения / А.И. Родионов // Вестник СГГА. (Физика) – Новосибирск: Изд-во СГГА, – 2002. – Выпуск 7. – С. 205–211.
2. Родионов А.И. Основания неголономной механики произвольных порядков / А.И. Родионов // Труды междунар. науч.-тех. конф. "Науч. основы высоких технологий" 1997, Новосибирск, Россия. – Т.6. "Математика и физика". – С. 62–64.
3. Родионов А.И. Уравнения движения неголономных систем высших порядков / А.И. Родионов // Сб. науч. тр. НГТУ. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1997. – № 2(7). – С. 85–96.
4. Родионов А.И. Составление и исследование уравнений движения голономных и неголономных систем методом обобщенных сил / П.И. Остроменский, А.И. Родионов // Научный вестник НГТУ. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1997. – № 1(3). – С. 121–140.
5. Rodionov A.I. On nonholonomic dynamics of any orders / A.I. Rodionov // Korus 2001. Proc. Of the 5 Korea-Russia Intern. Symp. on Science and Technology. June 26-July 3, 2001, Tomsk, Russia. – Vol.1, Mechanics. – P.250-254.
6. Rodionov A.I. On dynamics of mechatronic systems with incomplete differential programs of motion / A.I. Rodionov, V.M. Kaveshnikov // Proc. of 11 World Cong. in Mech. and Machine Science. April 1–4, 2004, Tianjin, China. -Vol.3, Mechatronics, – P. 1331–1335.
7. Rodionov A.I. On dynamics of arbitrary orders mechatronic systems / A.I. Rodionov // APEIE-2004. Proc. of 7 Intern. conf. on actual problems of electronic instrument engineering. September 21-24, 2004, Novosibirsk, Russia. – Vol. 1. – P. 165–171.
8. Лурье А.И. Аналитическая механика / А.И. Лурье. – М.: ГИФ-МЛ, 1961. – 824 с.

© А.И. Родионов, 2007

ВЫСОКОТОЧНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ РАЗМЕРОВ ОБЪЕКТОВ ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Рассмотрены возможности использования дифракционных явлений в зоне Френеля для разработки оптических методов высокоточного измерения геометрических размеров объектов и влияние этих явлений на погрешности измерений.

В условиях современного поточного производства улучшение качества машиностроительной, металлургической и другой продукции, освоение новых технологий в значительной степени зависят от оснащения промышленности высокоэффективными средствами размерного контроля. Такие системы должны обеспечивать надежность и бесконтактность измерений, широкий измерительный диапазон (от нескольких микрон до десятков миллиметров), высокое разрешение (от долей микрон до нескольких микрон) и быстродействие (не менее 500 изм./сек), допускать контроль в большом измерительном объеме. Средства измерений должны быть компактными, чтобы их можно было встраивать в различные технологические линии производства изделий, относительно недорогими. Среди бесконтактных методов контроля большое распространение получают оптические, которые, в сравнении с известными пневматическими, индуктивными, ёмкостными и другими методами, обеспечивают более высокие технические характеристики.

Для контроля изделий с четкой теневой проекцией в России и за рубежом производятся оптические измерители на основе теневых (сканирующих, проекционных) и дифракционных методов. Класс таких изделий достаточно широк и включает в себя, прежде всего, объекты цилиндрического типа – нити, проволоки, трубы и др.

Приведенные измерительные системы не в полной мере удовлетворяют современным техническим и массогабаритным требованиям. Все острее ощущается потребность в компактных, широкодиапазонных и высокоточных измерителях, пригодных к применению в промышленных условиях для контроля различных технологических процессов.

Актуален поиск альтернативных подходов решения задачи размерного контроля средствами оптики на основе интегральных преобразований волновых фронтов изображений объектов, исследование их возможностей в реальных условиях, выбор и разработка перспективных измерительных методов, открывающих возможность создания принципиально новых систем бесконтактного размерного контроля с улучшенными техническими характеристиками и массогабаритными показателями.

Одним из перспективных оптических методов является френелевский метод, основанный на использовании для целей размерного контроля объектов их дифракционных картин Френеля. При формировании такой картины в качестве «оптического элемента» выступает свободное пространство, которое преобразует входное распределение во френелевское изображение с более

высокой точностью, чем существующие проекционные оптические системы. Характеристики такого «элемента» близки к идеальным: он не вносит дополнительных искажений при формировании френелевского изображения объекта и лишен всякого рода aberrаций, присущих даже совершенным линзовым системам. При этом расстояние между контролируемым объектом и считывающим фотоприемником, определяющее структуру дифракционной картины Френеля и задающее габаритные размеры измерителя, не превышает нескольких десятков миллиметров.

Из-за сложности математического аппарата, описывающего дифракционные явления Френеля, френелевскому методу уделялось недостаточно внимания, особенно в части исследования его предельных характеристик.

Вместе с тем использование явления дифракции Френеля и Фраунгофера для измерительных целей открывает новые возможности радикального улучшения технических характеристик измерительных систем при разработке принципиально новых – дешевых, малогабаритных и конкурентоспособных – датчиков для решения актуальных задач размерного контроля [1–4].

При рассмотрении и анализе дифракционных изображений Френеля на этапе разработки измерительных систем не учитывается ряд факторов, влияние которых может значительно ухудшить точностные характеристики метода. Среди них отметим следующие факторы: влияние конечных размеров частично-когерентного источника излучения, неравномерность освещающей объект волны, интерференция френелевских изображений краев объекта, искажение профиля френелевского изображения объекта при регистрации его многоэлементным фотоприемником вследствие конечных размеров его элементов.

Френелевский метод измерения основан на использовании для целей контроля размеров объекта его дифракционной картины Френеля – френелевского изображения. Измеряемый объект размера D с амплитудным пропусканием

$f(x_1, y_1)$ освещается плоской (или сферической) монохроматической волной света с амплитудой E_0 . На расстоянии z от объекта, удовлетворяющем условию $z < D^2/\lambda$ формируется дифракционная картина Френеля в виде амплитудного распределения $g(x_2, y_2)$, равного свертке входного распределения $f(x_1, y_1)$ с импульсным откликом свободного пространства $h(x_2, y_2) = \exp(ik[x_2^2 + y_2^2]/2z)/i\lambda z$:

$$g(x_2, y_2) = E_0 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x_1, y_1) h(x_2 - x_1, y_2 - y_1) dx_1 dy_1. \quad (1)$$

Полученное распределение интенсивности света $I(x_2, y_2) = |g(x_2, y_2)|^2$ регистрируется многоэлементным фотоприемником, например ПЗС линейкой, выходной сигнал с которой поступает в электронный блок обработки измерительной информации. В этом блоке с помощью соответствующих алгоритмов производится вычисление искомых геометрических параметров объекта [2].

Вычисление D производится на основе алгоритма пороговой обработки френелевского распределения. Если параметры D , λ , z выбраны таким образом, что число Френеля $N_{fp} = D^2/4\lambda z \gg 1$, то положения границ объекта (координаты $x_1 = \pm D/2$) в его френелевском изображении приближенно соответствуют точкам x_2 , в которых интенсивность выходного распределения $I(x_2)$ составляет 25 % от интенсивности падающего излучения $I_0 = E_0^2$. Иными словами выбором порога $I_{nop} = 0.25I_0$ обеспечивается определение искомого параметра D согласно уравнению:

$$I(x_2 = \pm D/2) = I_{nop} = 0.25I_0. \quad (2)$$

Вследствие эффекта интерференции дифракционных краев контролируемого объекта происходит смещение края объекта на величину, обратно пропорциональную числу зон Френеля в пределах контролируемого объекта, значение которой снижается соответствующим выбором параметров измерителя на этапе проектирования или путем использования частично-когерентного освещения. Применение частично-когерентного освещения позволяет значительно улучшить структуру регистрируемого сигнала за счет подавления когерентных шумов и дополнительной микроструктуры дифракционного изображения.

Погрешность измерения заметно снижается при фоторегистрации распределения $I(x_2)$ ПЗС-линейкой вследствие ее интегрирующих свойств (по пространству), а также при использовании частично-когерентного освещения. В последнем случае благодаря некогерентным свойствам протяженного источника имеет место усреднение элементарных френелевских картин от каждой его точки. Это позволяет в выходном распределении $I_{чк}(x_2)$ в значительной степени подавить когерентные шумы и дополнительную микроструктуру дифракционного изображения. Однако при таком освещении, наряду с уменьшением амплитуды френелевских колебаний меняется структура поля в окрестности геометрического края объекта, что требует коррекции уровня стандартного порога $I_{nop} = 0.25I_0$ при определении геометрических параметров указанного объекта.

При частично-когерентном освещении в случае использования стандартного порога происходит смещение положения границ объекта на величину $\Delta x_{чк} = \frac{\Delta_{уст} \tau^2}{6\sqrt{2}\lambda z} = \frac{\tau \cdot \Delta_{уст} \cdot \theta_{уст}}{6\sqrt{2}\theta_{fp}}$, где $\theta_{уст} = \Delta_{уст}/F$ – угловой размер источника излучения, а $\theta_{fp} = \sqrt{\lambda/z}$ – угловой размер зоны Френеля.

Скорректированный порог I_{nop} при $\Delta_{уст}/\sqrt{\lambda z} \ll 1$ следует выбирать равным:

$$\tilde{I}_{nop} = I_0[0.25 + \tau^2 \Delta_{уст}^2 / 12\lambda z] = I_0[0.25 + (\theta_{уст} / \theta_{fp})^2 / 12], \quad (3)$$

что позволяет значительно снизить погрешность $\Delta x_{чк}$.

Неравномерное освещение объекта приводит к искажению профиля его френелевской картины и смещению его геометрических краев при определении их стандартным пороговым алгоритмом ($I_{nop} = 0.25I_0$). Так, при неравномерности высокочастотного типа ($T \ll \sqrt{\lambda z}$) имеет место смещение

$\Delta x_{\text{нер}}$ геометрического края объекта, не превышающее величины $\Delta x_{\text{нер}} \sim 0.5T$. Эту составляющую погрешности можно заметно снизить при использовании частично-когерентного освещения, а также путем низкочастотной фильтрации френелевского изображения.

При пространственно-неравномерном освещении гармоничного типа влияние неравномерности освещения на структуру френелевского изображения края объекта носит локальный характер и определяется степенью неравномерности в пределах зоны Френеля. Предложен и экспериментально исследован алгоритм определения положения границ объекта в случае слабой неравномерности освещения.

Вследствие нелинейного характера поля в окрестности геометрического края объекта при регистрации его многоэлементным фотоприемником возникает систематическая погрешность определения истинных границ объекта, которая обратно пропорциональна числу элементов ПЗС линейки в пределах зоны Френеля. Данная составляющая погрешности заметно снижается путем оптимального выбора параметров оптической системы.

В результате исследований диапазона измерения размеров объектов френелевским методом показано, что при освещении объекта плоскими волнами света верхняя граница диапазона определяется рабочей апертурой многоэлементного фотоприемника и может составлять десятки миллиметров, а нижняя граница – размером зоны Френеля (до 25 мкм). С целью радикального повышения точности измерений (на порядок и более) объектов с размерами порядка зоны Френеля предложен новый алгоритм обработки измерительной информации, учитывающий особенности дифракционных картин в переходной области (между дифракцией Френеля и Фраунгофера). Показано, что освещение объекта расходящимися сферическими волнами позволяет снизить нижнюю границу диапазона измерений до 10 мкм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карманов И.Н. Влияние дифракционного поля на интерференционную картину в зоне Фраунгофера / И.Н. Карманов, Н.А. Мещеряков // 220 лет геодез. образованию в России (24-29 мая 1999 г.): междунар. научно-техн. конф., посвящ. 220-летию со дня основания МосГУГиК (МИИГАиК). Ст. представл. Сиб. гос. геодез. акад. – М., 2002. – С. 52–54.
2. Ялуплин М.Д. Оптические методы высокоточного измерения геометрических размеров объектов на основе дифракции света: автореф. дис. канд. физ.-мат. наук / М.Д. Ялуплин. – Краснодар, 2006. – 19 с.
3. Горелик Г.С. Колебания и волны / Г.С. Горелик. – М.: ГИЗ ФМЛ, 1959. – 572 с.
4. Пат. 2094759 РФ, МПК G01J3/26. Мещеряков Н.А., Подъяпольский Ю.В. Оптический способ измерения микронеоднородностей прозрачных сред и устройство для его реализации; 93050731/25. – Заявлено 1996; Опубл. 27.10.97.

© И.Н. Карманов, Н.А. Мещеряков, 2007

СОДЕРЖАНИЕ

Батомункуев Ю.Ц., Мещеряков Н.А. Исследование объемных голограммных оптических элементов.....	3
Сырецкий Г.А., Ушаков О.К. Концепция и стратегия развития специальности «Организация и технология защиты информации» в Сибирской государственной геодезической академии	12
Толстиков А.С. Методы и алгоритмы координатно-временных определений, основанные на применении спутниковых навигационных технологий	18
Ковалев А.М. О структуре визуального пространства	24
Малинин В.В., Цепиногова З.М., Попов Г.Н., Моисеенко Г.А., Моисеенко В.В. Функциональное компьютерное моделирование телевизионных приборов ночного видения.....	29
Гугля В.С. Унифицированный модуль обработки видеосигнала тепловизионных приборов наблюдения	33
Бадальян Г.А., Малинин В.В. Совместная настройка телескопа и ФПМ ПЗС	36
Сысоев Е.В. Частичное сканирование коррелограмм в интерферометре белого света для измерения микрорельефа поверхностей с нанометровым разрешением	40
Вшивкова И.А., Грицкевич Е.В., Малинин В.В., Фалеев А.В., Цепиногова З.М. Предпосылки к оптимизации ОЭП наблюдения	45
Пальчикова И.Г., Ковалевский В.И., Шелковников В.В. Дифракционный интерферометр.....	50
Лабусов В.А., Селюнин Д.О., Галлямов Р.Г., Зарубин И.А. Квантовая эффективность линейных твердотельных детекторов излучения в спектральном диапазоне 180–800 нм	56
Попов Г.Н., Мордвин Н.Н. Концепция построения оптико-электронных приборов наблюдения универсального назначения	60
Верхогляд А.Г. Лазерное микропрофилирование поверхности	64
Жуков В.Л., Красавцев В.М., Павлов Б.П., Семенов А.Н., Чиков К.Н. УФ-видеоспектрометр с «нормальным» спектром	69
Горбунов Г.Г., Шлишевский В.Б. О возможности построения гиперспектральной аппаратуры на основе метода Фурье-спектрометрии для обнаружения скрытых объектов в полевых условиях	74
Белоусов А.И., Попов Г.Н. Модифицированная оптическая ИК система с зонным сканированием.....	79
Терешин Е.А., Хацевич Т.Н. Афокальные системы для сканирующих тепловизоров.....	83
Сенченко Е.С. Исследование зонной пластинки Релея – Вуда.....	84

Красавцев В.М., Семенов А.Н., Чиков К.Н., Шлишевский В.Б. Видеоспектрометры – новая перспективная аппаратура для дистанционных исследований	89
Шлишевский Б.Э., Соснова Н.К., Соснов А.Н., Петров П.И. Направление развития многоцелевых станков для автоматизации обработки деталей оптического производства	95
Шлишевский Б.Э., Соснова Н.К., Соснов А.Н. Прогрессивная технология и методы обработки на многоцелевых станках с УЧПУ	99
Канушина Л.А., Соснов А.Н., Соснова Н.К. Фотоэлектрические методы контроля оптических неоднородностей ИК-материалов	104
Ларина Т.В., Перминов В.П., Соснов А.Н. Диаграмма состояния Mg – В	108
Ларина Т.В., Перминов В.П., Соснов А.Н., Неронов В.А. Методы получения боридов алюминия и магния	109
Ларина Т.В., Неронов В.А., Перминов В.П., Соснов А.Н. Диаграмма состояния Al – В	113
Перминов В.П. Прогресс в магнетермии	115
Шлишевский Б.Э., Кутенкова Е.Ю. Отработка на технологичность изделий, обрабатываемых на станках с ЧПУ, как элемент системного подхода	118
Петров П.В. О сущности технологии вообще и технологии оптического производства в частности	123
Романова Т.В., Шелковников В.В. Измерение оптических констант тонких плёнок полиметиновых красителей методом спектральной эллипсометрии в ближней ИК-области	128
Шлишевский Б.Э., Ларина Т.В. Безвольфрамовые твердые сплавы и перспектива их использования в оптической отрасли приборостроения	133
Каплин В.И., Гущин А.В., Васильев А.Ю., Печенкин А.В. Особенности технологии обработки прецизионных фасонных поверхностей методом тонкого глубинного алмазного электрохимического шлифования	139
Перминов В.П., Неронов В.А. Прогнозирование токсичности и воспламеняемости некоторых перспективных неорганических материалов	142
Соснов А.Н., Соснова Н.К., Критинина С.В. Автоматизированные процессы изготовления точных крупногабаритных оптических деталей	143
Поллер Б.В., Попков В.К., Поллер А.Б., Бритвин А.В., Коломников Ю.Д., Трушенко Д.Е., Орлов С.Г. О характеристиках преобразователей солнечного света с полимерными волноводами	151
Коняев С.И., Удальцов Е.В., Поллер Б.В. Исследование возможности импульсной модуляции светодиодов ближнего ультрафиолетового диапазона	154
Чесноков В.В., Чесноков Д.В., Шергин С.Л. Технология Лазерной очистки поверхностей <i>in situ</i>	158

Чесноков В.В., Чесноков Е.Н., Сырнева А.С. Расчетные характеристики узкополосного фильтра терагерцового диапазона спектра	162
Чесноков А.Е. Исследование оптических характеристик многослойных структур управляемого резонатора Фабри – Перо	167
Михайлова Д.С., Чесноков Д.В. Исследование спектров поглощения металлоорганических соединений, применяемых при фотоиндуцированном осаждении тонких пленок.....	170
Бритвин А.В., Поллер Б.В., Щетинин Ю.И. Использование ультрафиолетового канала с рассеянием в беспроводных информационных системах и микросистемах	174
Батомункуев Ю.Ц., Мещеряков Н.А. Расчет объемных голограммных линз для ультрафиолетового и мягкого рентгеновского диапазонов спектра	180
Наливайко В.И., Покровский А.Н. Рентгеноструктурные и оптические исследования изменений в халькогенидных пленках в процессе записи оптической информации.....	184
Борисов Б.Д., Дычков А.С. Стабилизация частоты оптических генераторов без модуляционных эффектов.....	189
Дикусар Л.Д., Легонцев Д.А., Чермошенцев А.Ю. Компьютерное моделирование процесса лазерной генерации	194
Орлов С.Г., Поллер А.Б., Трушенко Д.Е. Обзор некоторых методов синтеза оптических волноводов с использованием нанотехнологий для информационных, сенсорных и вычислительных систем	199
Чесноков Д.В., Чесноков В.В., Никулин Д.М. Дифракция света на упругих волнах в тонкопленочных мембранных структурах	201
Чесноков Д.В., Чесноков В.В., Никулин Д.М. Электростатическое и лазерное возбуждение упругих волн в тонкоплёночных полосковых волноводах	203
Чесноков Д.В., Чесноков В.В., Никулин Д.М. Лазерное возбуждение изгибных волн в мембранных полосковых волноводах.....	209
Корнеев В.С. Оптические характеристики микромеханических модуляторов и дефлекторов	214
Чесноков Д.В., Шергин С.Л., Никулин Д.М. Лазерная перфорация тонкоплёночных мембран.....	220
Сырнева А.С., Чесноков В.В. Исследование вопросов электростатической ориентации микрочастиц металлов.....	225
Протасов Д.Ю., Костюченко В.Я., Москвин В.Н. Фотомагнитный эффект и фотопроводимость в магнитном поле на варизонных гетерозепитаксиальных структурах МЛЭ КРТ р-типа	226
Кузнецов О.П., Куниевский М.М., Поллер Б.В., Косинов В.А., Косинов О.В., Васильев В.А. Опыт разработки и эксплуатации компьютеризированной системы управления магнетронной установкой напыления на стекла для стеклопакетов	231

Кузнецов О.П., Куниевский М.М., Поллер Б.В., Косинов В.А., Косинов О.В., Васильев В.А. Перспективы использования магнетронного напыления TiO_2 в теплотехнике, оптике и нанооптике	233
Покасов В.В., Поллер Б.В., Коняев С.И. О построении лазерного интерференционного измерителя медленных перемещений для нанотехнологий	234
Скляр Д.Ф. Математическое моделирование атмосферных трасс для линий атмосферной оптической связи	237
Куриленко Г.А., Устюгов М.Б. Термографический метод определения индивидуальных пределов выносливости деталей приборов	242
Родионов А.И. Разомкнутая модель управления кресла-тренажера пилота, управляемого по рывку	247
Карманов И.Н., Мещеряков Н.А. Высокоточное измерение размеров объектовооптическими методами	252