

ФОРМИРОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПРОФИЛЕЙ ДИФРАКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА ДИФРАКЦИИ В ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ СЛОЯХ

Валерий Игоревич Наливайко

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. ак. Коптюга 1, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383) 333-30-92, e-mail: nalivaiko@iae.nsk.su

Марина Александровна Пономарева

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. ак. Коптюга 1, инженер-оптик, тел. (383) 333-30-92, e-mail: ponomareva@iae.nsk.su

Показана возможность получения дифракционной оптики высокого порядка дифракции в виде линейных и круговых элементов в слоях халькогенидных стеклообразных материалов. Усовершенствованы условия получения слоев с помощью автоматизированного термического нанесения их в высоком вакууме, что позволило в два раза увеличить амплитуду фотоструктурных изменений показателя преломления. Получена максимальная дифракционная эффективность второго порядка дифракции для линейных решеток. Показана перспектива изготовления зонных пластинок с максимальной эффективностью до 30 порядка дифракции.

Ключевые слова: халькогенидные материалы, стабилизация скорости напыления, реальное время, динамический диапазон

FORMING OF PHASE PROFILES OF HIGH ORDER DIFFRACTIVE ELEMENTS IN HALCOGENIDE LAYERS

Valery I. Nalivaiko

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Akademik Koptyug Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, Senior Researcher, phone: (383) 333-30-92, e-mail: nalivaiko@iae.nsk.su

Marina A. Ponomareva

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Akademik Koptyug Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, Engineer, phone: (383) 333-30-92, e-mail: ponomareva@iae.nsk.su

The possibility of obtaining diffractive optics of a high diffraction order in the form of linear and circular elements in layers of chalcogenide glassy materials is shown. The conditions for obtaining layers by means of automated thermal deposition of them in high vacuum have been improved, which made it possible to double the amplitude of photostructural changes in the refractive index. The maximum diffraction efficiency of the second order of diffraction for linear gratings is obtained. The prospect of manufacturing zone plates with a maximum efficiency of up to 30 orders of magnitude of diffraction is shown.

Keywords: chalcogenide materials, stabilization of deposition rate, real time, dynamic range

Основу халькогенидных стекол составляют халькогены S, Se и Te в соединении с другими элементами, такими как Ge, As и Sb, приводящими к образованию устойчивых стекол. Халькогенидные стекла имеют более низкую энергию фононов

(<350 см⁻¹), чем оксидные или фторидные стекла (>500 см⁻¹) и обладают окном прозрачности более 10 мкм. Поскольку халькогенидные стекла прозрачны в более далеком ИК-диапазоне, чем кварц и фторидные стекла, они могут использоваться в качестве оптических материалов для приборов ночного видения, теплового отображения, экологического мониторинга и интегральной оптики [1].

Однако исследования, выполненные в течение последнего десятилетия, убедительно показали, что возможности применения халькогенидных стёкол в оптических системах еще далеко не исчерпаны и, по-видимому, в дальнейшем они получат наиболее широкое применение, именно благодаря особенностям их оптических свойств. Было установлено, что под воздействием света большинство халькогенидных стекол испытывают структурные изменения, что открыло возможность их использования в системах регистрации оптической информации. Особенно важным является изменение показателя преломления под действием света, что позволяет использовать среды из халькогенидных стёкол не только для амплитудной, но и для фазовой записи. Последняя представляет особый интерес для голографической записи оптической информации и создания различных функциональных элементов и устройств интегральной оптики – таких, как селективные оптические фильтры, смесители, ответвители, модуляторы оптических пучков и другие [2,3].

Халькогенидные стеклообразные полупроводники в виде слоев являются перспективным материалом для изготовления оптических дифракционных элементов в виде линейных и круговых решеток. Наиболее важными свойствами этих материалов в пленочном исполнении являются большой динамический диапазон изменения показателя преломления в области высокой прозрачности и пространственное разрешение на молекулярном уровне. Эти материалы прозрачны в ИК-диапазоне излучения ($\lambda = 0,8 - 12$ мкм), обладают высоким показателем преломления ($n = 2,5 - 2,7$), наносятся в вакууме в виде слоев и поэтому являются серьезными конкурентами известным кристаллическим ИК-материалам.

Цель работы состояла в исследовании возможности применения халькогенидных материалов для записи линейных и круговых дифракционных элементов высокого порядка дифракции. Для этого были поставлены и решены следующие задачи:

- нанесение халькогенидных слоев с улучшенными параметрами;
- запись в халькогенидных слоях фазовых дифракционных решеток высокого порядка дифракции;
- анализ параметров полученных дифракционных решёток.

Нанесение халькогенидных слоев на подложки из оксидного стекла проводилось термическим испарением в вакууме 10^{-6} торр. Напылительная установка оборудована устройством оптического контроля толщины напыляемого слоя. При достижении заданной оптической толщины слоя вещества испаритель перекрывался заслонкой. Благодаря данному устройству контроля в автоматическом режиме можно получать толщину наносимого слоя с точностью порядка 0,07 мкм.

Для получения однородных по толщине слоев необходимо обеспечить стабилизацию скорости напыления. Поскольку при ручном управлении стабилизации скорости напыления довольно трудно, добиться воспроизводимости параметров слоев практически невозможно. Поэтому был выбран путь автоматизации напылительного процесса. Температурный режим испарителя в процессе напылительного процесса контролировался с помощью компьютера. В рабочую программу вводились данные об изменении температуры испарителя и времени управления заслонкой.

График задаваемой температуры испарителя от времени для 5 мкм толщины пленки As_2S_3 показан на рис. 1 (заданная программой температура испарителя – кривая 1, а экспериментально полученная температура испарителя – кривая 2). Времена открытия и закрытия заслонки испарителя устанавливались экспериментально с целью обеспечения постоянной скорости нанесения слоя, величина которой составляла $2 \text{ \AA}/\text{с}$. Постоянство скорости нанесения слоев обеспечивало получение максимальных величин фотоструктурных изменений показателя преломления $\Delta n = 0.2$ на $\lambda = 0.65 \text{ мкм}$. Большой динамический диапазон Δn был необходим для записи решеток с максимальной эффективностью в высоких порядках дифракции.

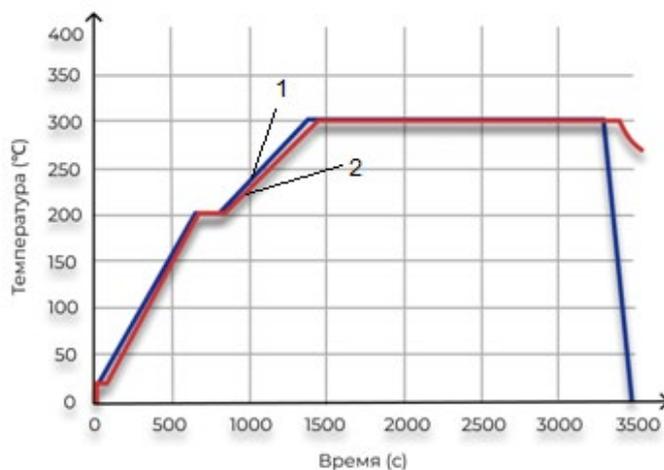


Рис. 1. Зависимость температуры испарителя от времени при нанесении в вакууме на подложки слоев состава As_2S_3

Эффект работы схемы стабилизации представлен на графиках изменения дифракционной эффективности записываемых решеток в процессе экспонирования (рис. 2). При записи без стабилизации (рис. 2, а) из-за смещения интерференционных полос, вызванного внешними возмущениями, картина дифракционной эффективности осциллирует. При этом динамический диапазон изменения показателя преломления используется нераационально, не позволяя реализовать требуемую разность фаз между штрихами решетки. При записи со стабилизацией (рис. 2, б) наблюдается монотонное нарастание эффективности до максимума,

что свидетельствует о преодолении вышеуказанного недостатка и возможности эффективной записи дифракционных решёток высокого порядка дифракции.

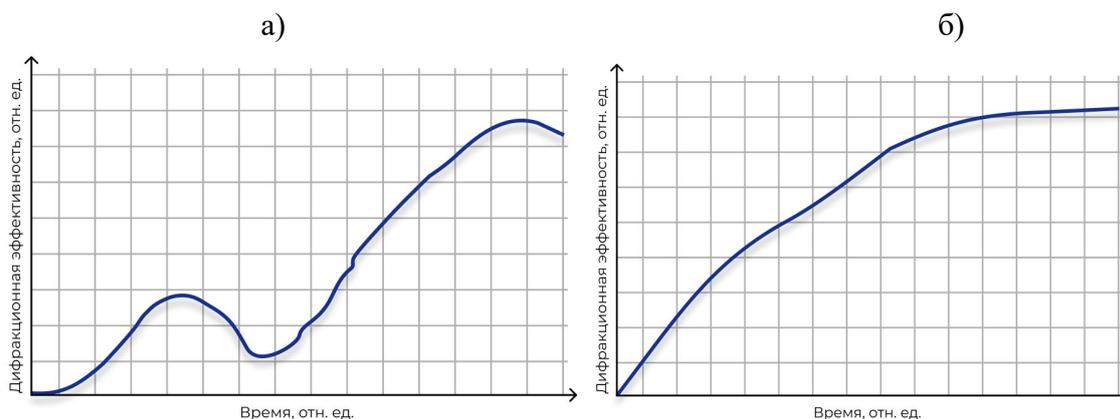


Рис. 2. Зависимость дифракционной эффективности решеток от времени экспонирования:

а) без стабилизации интерференционного поля записи; б) со стабилизацией интерференционного поля записи

Кроме этого схема стабилизации по методу экстремального регулирования со вспомогательной модуляцией обеспечивает возможность увеличения времени регистрации решётки в халькогенидной пленке в течении более 30 минут, что необходимо для получения большой величины фазовой задержки между штрихами дифракционной решётки высокого порядка дифракции.

В заключении сравним эффективность образования фазовой задержки при двух способах записи фазового рельефа – при изменении величины показателя преломления Δn и образования геометрического рельефа на поверхности халькогенидного слоя в результате оптического гравирования на всю глубину халькогенидного слоя.

При изменении показателя преломления оптическая задержка ΔL между соседними штрихами решётки для слоев состава As_2S_3 толщиной $d = 2$ мкм составляла:

$$\Delta L = \Delta n \cdot d = 0,2 \cdot 2 \text{ мкм} = 0,4 \text{ мкм}$$

В случае образования геометрического рельефа на поверхности слоя As_2S_3 такой же толщины оптическая задержка ΔL составит:

$$\Delta L = (n - 1) \cdot d = (2,5 - 1) \cdot 2 \text{ мкм} = 3 \text{ мкм}$$

Отсюда следует выигрыш в последнем случае для слоев одинаковой геометрической толщины при получении глубокого оптического рельефа более чем в 7 раз по сравнению с первым. Кроме этого, в случае прямой записи способом оптического гравирования на всю глубину халькогенидного слоя до подложки от-

существует необходимость применения дополнительных процессов селективного травления, что позволяет получать дифракционные элементы высокого порядка дифракции в реальном времени [4,5].

Так на установке оптической литографии DWL66⁺ в халькогенидных слоях составов As₂S₃ и As₂Se₃ в реальном времени способом оптического гравирования рельефа были записаны линейные решетки на площади 10x25 мм² с периодом 2 мкм для тестирования пространственного разрешения лазерного гетеродинного томографа [6,7]. Время записи составило порядка 40 минут.

Запись зонных пластинок (рис. 3) проводилась с помощью круговой лазерной системы с твердотельным лазером на длине волны $\lambda = 532$ нм (АО «Новосибирский приборостроительный завод»).

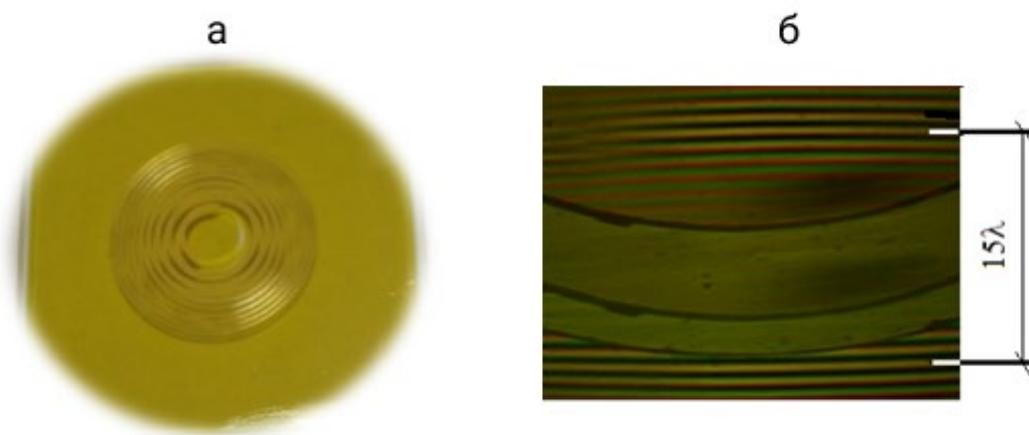


Рис. 3. а) Зонная пластинка в халькогенидном слое As₂S₃ толщиной 5 мкм;
б) максимальная глубина полученного рельефа пластинки составила 30 полуволн на $\lambda = 550$ нм

Таким образом, возможно получение круговой дифракционной оптики с максимумом эффективности в 30 порядке дифракции, что позволит во много раз уменьшить ее фокусные расстояния, то есть увеличить светосилу зонных пластинок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hilton A. R. Nonoxide Chalcogenide Glasses as Infrared Optical Materials // Applied Optics 1966. Vol. 5. No. 12. P. 1877 – 1882.
2. Finsterbuschet K., Baker N.J., Ta'eed V.G., Eggleton B.J. et al. Higher-order mode grating devices in As₂S₃ chalcogenide glass rib waveguides // J. Opt. Soc. Am. B. 2007. Vol. 24. No. 6. P. 1283 – 1290.
3. Наливайко В.И., Юрьев Г.С., Гольденберг Б.Г., Пономарева М.А. Получение фазовых структур в оптических материалах // Ж. "Поверхность", Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2003. №11, С. 52 – 55.
4. Наливайко В.И., Покровский А.Н. Получение глубокого фазового профиля в аморфных слоях халькогенидных стеклообразных полупроводников. Интерэкспо Гео-Сибирь. 2011. Т. 5. № 2. С. 84-92.

5. Nalivaiko V.I., Yuryev G.S., Sametov A.R. Laser engraving of relief in nanostructural amorphous films. Изв. Вузов. Физика. – 2006. - № 8. Приложение. – С. 536 – 537.
6. Твердохлеб П.Е., Щепеткин Ю.А. Оценка предельной скорости послойного гетеродинного анализа характеристик рассеяния света в объемных оптических сред // Автометрия, 2017, 53, №2. С. 19-29.
7. Твердохлеб П.Е., Щепеткин Ю.А., Штейнберг И.Ш. Исследование характеристик толстых дифракционных решеток методом лазерной гетеродинной томографии // Автометрия. 2019. 55. № 1. С. 26 – 34.

© В. И. Наливайко, М. А. Пономарева, 2021