

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ВИДЕ ПОЛОСКОВЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР В СВОБОДНОМ СОСТОЯНИИ

Дмитрий Михайлович Никулин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры фотоники и приборостроения, тел. (923)240-44-45, e-mail: dimflint@mail.ru

Сергей Леонидович Шергин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры физики, тел. (953)862-97-88, e-mail: serkron@mail.ru

Валерий Андреевич Райхерт

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ст. преподаватель кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии, тел. (913)959-15-44, e-mail: vreichert@yandex.ru

Предлагается технология получения полосковых тонкопленочных структур в свободном состоянии для последующего их использования в качестве перестраиваемых дифракционных оптических элементов. Описываются этапы разработанной технологии получения оптических элементов. Экспериментально подтверждается возможность применения полученных полосковых тонкопленочных структур в качестве дифракционных оптических элементов.

Ключевые слова: перестраиваемые дифракционные решетки, металлические пленки, пленки в свободном состоянии, мембраны.

TECHNOLOGY FOR FABRICATION OF DIFFRACTION OPTICAL ELEMENTS AS STRIPPING THIN-FILM STRUCTURES IN FREE STATE

Dmitry M. Nikulin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Photonics and Device Engineering, phone: (923)240-44-45, e-mail: dimflint@mail.ru

Sergey L. Shergin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Physics, phone: (953)862-97-88, e-mail: serkron@mail.ru

Valery A. Raychert

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Senior Lecturer, Department of Special Devices, Innovation and Metrology, phone: (913)959-15-44, e-mail: vreichert@yandex.ru

The technology for fabrication of the strip thin-film structures in a free state for their subsequent using as the tunable diffractive optical elements is proposed. The stages of the developed technology for obtaining optical elements are described. It is experimentally confirmed that the obtained strip thin-film structures can be used as diffractive optical elements.

Key words: tunable diffraction gratings, metal films, films in a free state, membranes.

Введение

Тонкопленочные металлические структуры в свободном состоянии широко используются уже давно. Их применяют в качестве: оптического фильтра [1], проводящего отражающего слоя люминесцентных экранов [2], вакуумно-плотного окна для пропускания мягкого рентгеновского излучения [3], трафаретной маски для вакуумного напыления [4, 5] и т. п. Перспективной является возможность применения тонкопленочных структур в свободном состоянии в качестве дифракционных оптических элементов, например, полосковых микроволноводов перестраиваемой дифракционной решетки [6], работающих как на отражение, так и на пропускание. Также известны исследования в области микрооптоэлектромеханических (МОЭМС) дефлекторов и модуляторов света, использующих крутильные колебания в пленочных мембранных волноводах [7–9] и изгибных волн в тонкопленочных полосковых мембранных волноводах [10–12].

Основным методом получения разнообразных тонкопленочных периодических структур является фотолитография. Недостатком данного метода является [13] большое количество операций, высокие требования к технологическим помещениям и как следствие – высокая стоимость. Поэтому актуальной является задача разработки технологии, упрощающей получение дифракционных оптических элементов.

Эксперименты

Технология получения дифракционных оптических элементов в виде полосковых тонкопленочных структур состоит из двух основных этапов:

- изготовление сплошной тонкой металлической пленки (мембраны) в свободном состоянии;
- лазерная перфорация мембраны в свободном состоянии.

Маршрут первого этапа технологии изготовления дифракционного оптического элемента представлен на рис. 1. На пленку жертвенного слоя (нитроцеллюлоза), предварительно нанесенную на плоскую стеклянную подложку круглой формы (рис. 1, *а*), напыляют в вакууме пленку алюминия (рис. 1, *б*) [13]. На металлическую сторону трехслойной структуры соосно наклеивают опорное кольцо из металла или стекла (рис. 1, *в*). Далее удаляют жертвенный слой растворителем. После чего отделяют опорное кольцо от подложки. В результате пленка алюминия оказывается в свободном состоянии закрепленной на опорном кольце (рис. 1, *г*).

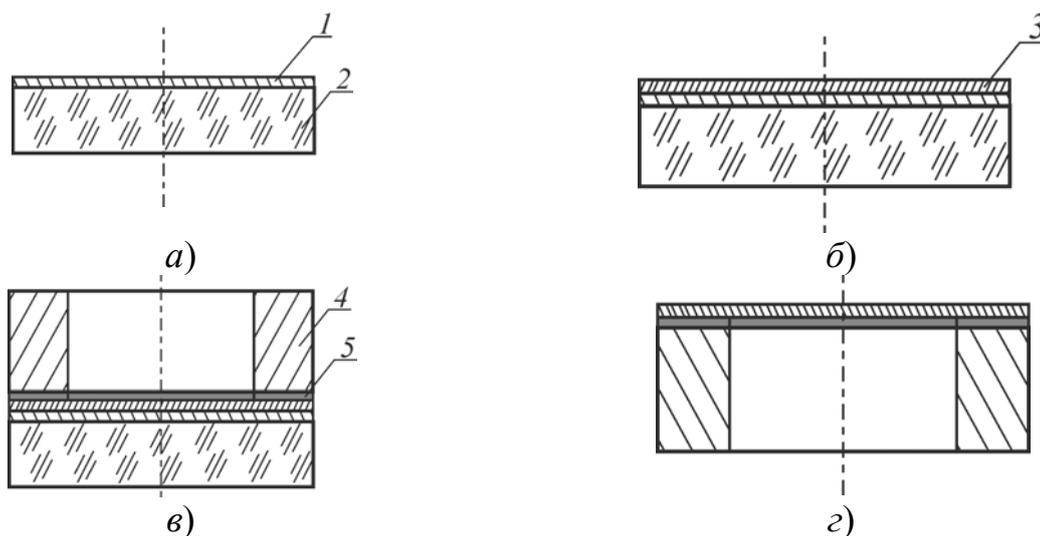


Рис. 1. Маршрут первого этапа технологии получения тонкопленочной металлической структуры в свободном состоянии:

1 – нитроцеллюлозная пленка; 2 – стеклянная подложка; 3 – алюминиевая пленка; 4 – опорное кольцо; 5 – слой эпоксидного клея

На втором этапе технологии производят перфорацию полученной мембраны сфокусированным лазерным излучением. Таким образом, получают разнообразные тонкопленочные структуры в свободном состоянии, например, полосковые (рис. 2).

Более детально этапы изготовления полосковых тонкопленочных структур в свободном состоянии рассмотрены ниже.

Стеклянная подложка подготавливается стандартными методами [14]. Процесс нанесения на поверхность подложки пленки нитроцеллюлозы заключается в следующем: в сосуд с дистиллированной водой полностью погружается подложка, на поверхность воды наносится капля раствора нитроцеллюлозы в бутилацетате. За счет капиллярных сил капля нитроцеллюлозы размывается (растекается) по всей поверхности воды, образуя твердую пленку нитроцеллюлозы толщиной примерно $0,10 \div 0,25$ мкм. Далее, стеклянная подложка медленно, вынимается из воды, так, что нитроцеллюлозная пленка равномерно располагается на поверхности подложки. Высушивание нитроцеллюлозной пленки на стеклянной подложке производится в термощкафу при температуре $80-100$ °С [14].

Напыление пленки алюминия на полученную двухслойную структуру со стороны нитроцеллюлозы осуществляется из проволочного вольфрамового испарителя в вакуумной установке (ВУ-1А). У алюминия низкая температура испарения и, следовательно, низкая температура паров, благодаря чему рост слоя металла не приводит к разрушению нитроцеллюлозной пленки.

Фиксация опорного кольца к пленке алюминия осуществляется с помощью эпоксидного клея, который наносится тонким слоем по всему торцу кольца, за-

тем кольцо прижимается к пленке. После высыхания клея, конструкция погружается в сосуд с ацетоном. Тонкий слой нитроцеллюлозы растворяется со скоростью примерно 1 см^2 в час. После растворения нитроцеллюлозной пленки опорное кольцо с мембраной отделяется от стеклянной подложки с предельной осторожностью во избежание деформации и (или) порыва металлической пленки.

Создание полосковых структур в свободных алюминиевых пленках производится локальным испарением пленки при воздействии сфокусированного лазерного излучения азотного лазера ЛГИ-505, которым оснащена установка лазерной ретуши фотошаблонов ЭМ-551Б [4, 5]. Длина волны лазера составляет 334 нм, длительность импульса – 6 нс, плотность мощности при максимально сфокусированном пятне – $5 \cdot 10^8 \text{ Вт/см}^2$. Кольцо с мембраной устанавливается на 2-координатный стол лазерной установки, перемещение которого относительно фокального пятна формирует рисунок заданных размеров полосковых структур (рис. 2). Диапазон ширины сквозных линий на пленке определяется размером фокального пятна и составляет от 3 до 20 мкм.

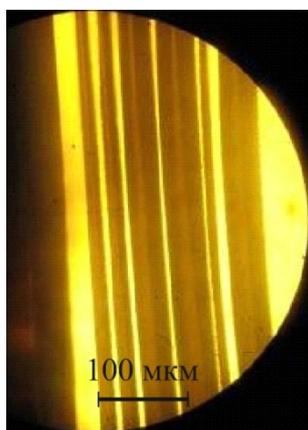


Рис. 2. Увеличенное изображение на просвет перфорированной части тонкой пленки в свободном состоянии (темные линии соответствуют полосковым тонкопленочным структурам)

Результаты

При использовании разработанной технологии были получены экспериментальные образцы тонкопленочных полосковых алюминиевых структур в свободном состоянии, представляющие собой чередующиеся параллельные прямолинейные сплошные и сквозные участки различной ширины (рис. 2), изображение которых получено при помощи микроскопа на просвет. Размеры исходной сплошной неперфорированной пленки составили: диаметр 7 мм; толщина 100 нм. В результате лазерной перфорации пленки достигнуты следующие параметры: ширина алюминиевых полос – от 32 до 4 мкм; максимальная длина полос 7 мм; расстояние между полосами варьируется от 20 до 3 мкм.

На базе разработанной технологии также были получены образцы периодических полосковых структур с шагом (110 ± 5) мкм на прямоугольной рамке. Зазор между алюминиевыми полосками варьируется в пределах (10 ± 5) мкм (рис. 3, 4).

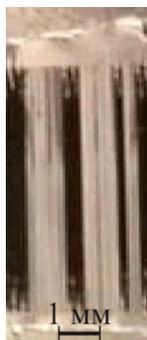


Рис. 3. Макетный образец прямоугольной формы с полосковыми металлическими тонкопленочными структурами в свободном состоянии

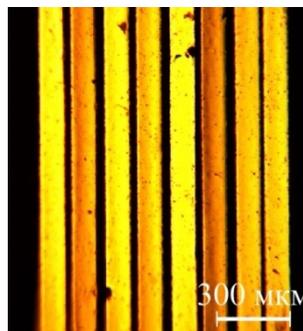


Рис. 4. Увеличенный размер бездефектной зоны полосковых металлических тонкопленочных структур (светлые линии – полосковые металлические тонкопленочные структуры)

При визуальном осмотре волноводов на микроскопе, обнаружено, что полосы имеют в сечении дугообразную, а не плоскую форму и ориентированы не в одной плоскости (рис. 4).

Несмотря на выявленные недостатки, данные структуры позволяют получить дифракционные картины на пропускание и на отражение. На рис. 5 представлено фото дифракционной картины на отражение, сформированное на матрице ТВ-камеры, расположенной в фокальной плоскости объектива. Длина волны дифрагируемого излучения составляет 532 нм.

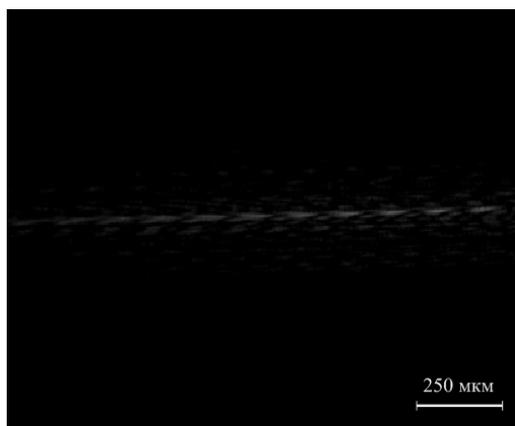


Рис. 5. Дифракционная картина на отражение, полученная от полосковых периодических структур в свободном состоянии

Заключение

Экспериментально подтверждена принципиальная возможность использования предложенной авторами технологии для получения разнообразных дифракционных оптических элементов в виде тонкопленочных структур в свободном состоянии.

Среди преимуществ создания и использования подобных оптических элементов выделяются: низкая себестоимость и произвольная дискретность периодических структур дифракционных решеток в диапазоне ограниченном технологией получения, которая на данном этапе составляет не менее 3 мкм.

Представленная технология позволяет получать дифракционные оптические элементы разнообразной периодической и аperiodической структур с относительно невысокой себестоимостью. Полученные структуры могут использоваться в качестве дифракционных решеток в миниатюрных спектроанализаторах и подобных им элементов МОЭМС [15–18], в которых перестройка по спектру осуществляется путем изменения периода дифракционной решетки, в отличие от классических устройств, где перестройка происходит за счет поворота дифракционной решетки. К недостаткам полученных тонкопленочных структур в свободном состоянии следует отнести хрупкость, что предъявляет повышенные требования к их хранению и эксплуатации. Кроме того, дифракционным оптическим элементам свойственно старение материала и, как следствие, изменение их характеристик.

В дальнейшем необходимо усовершенствование технологии в направлении уменьшения ширины сквозных линий при изготовлении периодических структур, расширения номенклатуры напыляемых металлов [19], расширения размера бездефектной зоны с целью повышения эксплуатационных характеристик тонкопленочных структур в свободном состоянии [20].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хасс Дж. Физика тонких пленок. Т. 7 / Дж. Хасс, М. Х. Франкомб, Р. У. Гофман. – М. : Мир, 1977.
2. Гугель Б. М. Люминофоры для электровакуумной промышленности. – М. : Энергия, 1967.
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. 333335
4. Чесноков Д. В., Шергин С. Л., Никулин Д. М. Лазерная перфорация тонкопленочных мембран // ГЕО-Сибирь-2007. III Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 25–27 апреля 2007 г.). – Новосибирск : СГГА, 2007. Т. 4, ч. 1. – С. 220–224.
5. Никулин Д. М., Шергин С. Л., Чесноков А. Е. Тонкопленочные мембранные микрографареты для вакуумного напыления рисунков на подложки // Сборник научных трудов аспирантов и молодых ученых. – 2007. – Вып. 4. – С. 21–24.
6. Никулин Д. М., Райхерт В. А., Шергин С. Л. Исследование макета полоскового микроволновода для использования его в качестве перестраиваемой дифракционной решетки // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-

2018» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. Т. 1. – С. 237–243.

7. Корнеев В. С. Разработка и исследование оптических магнитоуправляемых микромеханических устройств : дис. ... канд. техн. наук: 01.04.05. – Новосибирск, 2010. – 84 с. : ил. РГБ ОД, 61 11-5/774.

8. Чесноков Д. В. Микромеханический дефлектор световых потоков // Оптический журнал. – 2007. – № 4. – С. 51–54.

9. Князев И. В. Моделирование динамических характеристик переключения элементов микро-оптоэлектромеханической перестраиваемой дифракционной решетки // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 1. – С. 235–251.

10. Чесноков В. В., Чесноков Д. В., Райхерт В. А. Пьезоэлектрическое возбуждение упругих изгибных волн в свободных тонкопленочных структурах // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск : СГГА, 2011. Т. 5, ч. 2. – С. 55–63.

11. Чесноков Д. В., Чесноков В. В., Никулин Д. М. Электростатическое и лазерное возбуждение упругих волн в тонкопленочных полосковых волноводах // ГЕО-Сибирь-2007. III Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 25–27 апреля 2007 г.). – Новосибирск : СГГА, 2007. Т. 4, ч. 1. – С. 203–209.

12. Чесноков Д. В., Чесноков В. В., Никулин Д. М. Дифракция света на упругих волнах в тонкопленочных мембранных структурах // ГЕО-Сибирь-2007. III Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 25–27 апреля 2007 г.). – Новосибирск : СГГА, 2007. Т. 4, ч. 1. – С. 201–203.

13. Данилин Б. С. Вакуумное нанесение тонких пленок. – М. : Энергия, 1967.

14. Справочник технолога-оптика / М. А. Окатов, Э. А. Антонов, А. Байгожин и др. ; под ред. М. А. Окатова. – 2-е изд-е, перераб. и доп. – СПб. : Политехника, 2009. – 679 с.

15. Корнеев В. С., Чесноков В. В., Чесноков Д. В. Особенности спектральных характеристик микромеханической управляемой дифракционной решетки // ГЕО-Сибирь-2009. V Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 20–24 апреля 2009 г.). – Новосибирск : СГГА, 2009. Т. 4, ч. 2. – С. 24–28.

16. Korneyev V. S. Micro- opto- mechanical scanner for terahertz spectrum diapason / V. S. Korneyev, V.V. Chesnokov, D.V. Chesnokov // “9-th Int. Symposium on Measurement Technique and Intelligent Instrument” Proc. of ISMTII-2009. – Vol. 2. – S-p-b. D.S. Rozhdestvensky Opt. Soc., 2009. – P. 2-361–2-365.

17. Корнеев В. С. Экспериментальное исследование крутильных колебаний полосок микромеханической управляемой дифракционной решетки // Вестник СГГА. – 2010. – Вып. 1 (12). – С. 177–121.

18. Корнеев В. С. Расчет амплитуд собственных колебаний для мембран прямоугольной и круглой формы // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 4. – С. 213–220.

19. Технология тонких пленок (справочник) / под ред. Л. Майсела, Р. Глэнга. Нью-Йорк, 1970 ; пер. с англ. под ред. М. И. Елинсона, Г. Г. Смолко. Т. 2. – М. : Сов. радио, 1977. – 768 с.

20. Григорьев И. С., Мелихов Е. З. Физические величины. Справочник. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

© Д. М. Никулин, С. Л. Шергин, В. А. Райхерт, 2019