

60. Высокоэффективные голограммные дифракционные решетки различного типа в «НПО «ГИПО»

Ф. А. Саттаров, М. Ю. Знаменский, Н. М. Шигапова, Л. А. Максакова, Т. Б. Сидорова, И. И. Хасанова
АО «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

Приведены результаты, полученные при разработке основ технологических процессов изготовления голограммных дифракционных решеток с использованием светочувствительных сред на основе вакуумно-напыленных слоев халькогенидных стеклообразных полупроводников состава As_xSe_{1-x} и на основе бихромированной желатины.

Ключевые слова: Голограммная дифракционная решетка, Халькогенидный стеклообразный полупроводник, Бихромированная желатина.

Цитирование: Саттаров, Ф. А. Высокоэффективные голограммные дифракционные решетки различного типа в «НПО «ГИПО» / Ф. А. Саттаров, М. Ю. Знаменский, Н. М. Шигапова, Л. А. Максакова, Т. Б. Сидорова, И. И. Хасанова // HOLOEXPO 2018 : XV международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — С. 244–246.

Основной проблемой при разработке голограммных дифракционных решеток (ГДР), предназначенных для использования в спектральных приборах, является получение ГДР с техническими характеристиками (дифракционная эффективность, интенсивность рассеянного света, разрешение), близкими к теоретическим значениям. Спектральные характеристики решеток и их эксплуатационные качества зависят от выбора светочувствительной среды, оптимизации процессов регистрации голограмм и последующей обработки.

Выбор светочувствительной среды однозначно определяется типом используемой в спектральном приборе дифракционной решетки — отражательной или пропускающей. Многолетний опыт разработок в этом направлении показывает, что наиболее приемлемыми для получения оптимальных ГДР светочувствительными слоями являются слои на основе халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП) — для отражательных ГДР, и слои бихромированной желатины (БХЖ) — для пропускающих ГДР.

ГДР на основе вакуумно-напыленных слоев ХСП состава As_xSe_{1-x}

В НПО «ГИПО» разработаны основы технологического процесса получения рельефно-фазовых ГДР на «свежих» (экспонируемых в течение не более 8 часов после вакуумного осаждения) слоях селенида мышьяка. Известные работы по оптической записи в слоях селенида мышьяка касались, в основном, физических процессов оптической записи [1–3]. Получению рельефных изображений в слоях ХСП посвящено несколько работ (например, [4]), однако при этом экспонирование проводилось в области прозрачности ХСП, и полученные значения светочувствительности (не более $1 \text{ см}^2/\text{Дж}$) не позволяли использовать их для получения ГДР больших размеров.

Фотоструктурные перестройки внутренних связей при использовании коммерческих лазеров (длины волн 450–514 нм, 532 нм, 633 нм) наиболее интенсивно проходят в «свежих» вакуумно-осажденных слоях селенида мышьяка. Важной особенностью фотопроекции в таких случаях является значительное поглощение

света уже в приповерхностном слое толщиной менее 1 мкм [5, 6]. Так, первоначальные коэффициенты поглощения «свежих» слоев селенида мышьяка составляют порядка $6 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$ для лазерного излучения $\lambda = 514,5 \text{ нм}$ и $7 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ для $\lambda = 633 \text{ нм}$. Светочувствительность таких слоев, определяемая по сдвигу края поглощения в длинноволновую область, более чем на порядок превосходит светочувствительность слоев сульфида мышьяка.

Было установлено следующее.

1. Светочувствительность фотографических негативных слоев селенида мышьяка увеличивается с возрастанием массовой доли мышьяка [7]. При отработке технологии мы ограничились стехиометрическим составом As_xSe_{1-x} ($x = 0,4–0,5$) вследствие того, что при большей массовой доле мышьяка увеличиваются поверхностные дефекты слоя (размерами более 3 мкм) уже в процессе формирования структуры вакуумно-осаждаемого слоя.

2. Оптимально испарение слоев из открытой лодочки со скоростью осаждения $V_{\text{осажд}} = 60–90 \text{ нм/мин}$. Толщины слоев 0,5–2 мкм зависят от требований к характеристикам ГДР.

3. При использовании травящих растворов алифатических и гетероциклических аминов и апротонных травителей слои селенида мышьяка ведут себя как негативные фоторезисты. Подобраны оптимальные травители с селективностью травления (отношение скоростей травления неэкспонированных и экспонированных участков слоя) в пределах 3–6, что позволяет получить оптимальные ГДР с квазисинусоидальными профилями штрихов в пределах пространственных частот 300–3600 мм^{-1} и отношением глубины профиля штрихов к периоду ГДР (d/Λ) в пределах 0,05–0,45. Светочувствительность слоев составов $As_{40}Se_{60}$ и $As_{45}Se_{55}$ составляет 60–20 $\text{см}^2/\text{Дж}$ при использовании коммерческих лазеров, что позволяет изготовить крупногабаритные ГДР размерами до 500 мм.

Постэкспозиционная обработка включает в себя следующие обязательные этапы:

- проявление;
- буферная «стоп»-ванна;

- промывка водой с поверхностно-активным веществом;
- промывка горячей дистиллированной водой;
- термообработка;
- нанесение защитно-отражающего покрытия (Cr—Al или SiO—Al).

Буферная ванна необходима для прекращения действия проявителя и получения однородных характеристик ГДР по апертуре и является обязательной в случае применения сиротонного травителя из-за поверхностной природы травления. Промывочная ванна и термообработка необходимы для уменьшения влияния активных разорванных связей в системе As-Se. Поверхностная химическая активность обработанных, но не подвергнутых термообработке, слоев, в особенности слоев, обогащенных мышьяком, неизбежно приводит к их окислению кислородом воздуха [5].

В настоящее время основная номенклатура отражательных ГДР, как плоских, так и вогнутых, изготавливается АО «НПО «ГИПО» с использованием слоев селенида мышьяка.

Пропускающие ГДР на слоях БХЖ

В качестве пропускающего диспергирующего элемента в спектральных приборах возможно использование как рельефно-фазовых, так и объемно-фазовых ГДР. Анализ показывает, однако, что рельефно-фазовые пропускающие решетки по основным показателям (дифракционная эффективность, ближний контраст) значительно уступают объемно-фазовым решеткам из-за низких предельно-допустимых значений $d/\Lambda < 0,45$ и невозможности устранения френелевских отражений на границе воздух-фотослой.

Разработана и смоделирована конструкция пропускающей объемной ГДР, с двух сторон заклеенная покровными стеклами с просветленными поверхно-

стями. Такая конструкция дает возможность достижения необходимого разрешения и минимального уровня ближнего контраста ($< 10^{-4}$) изображения.

С учетом технических эксплуатационных характеристик наиболее подходящими для изготовления пропускающих ГДР (ПГДР) являются слои БХЖ. Нами разработаны основы технологического процесса получения качественных ПГДР с пространственными частотами 150–3700 мм^{-1} на слоях БХЖ. Для высокочастотных ПГДР (1200–3700 мм^{-1}) использованы промышленные слои фотографических пластин АО «Компания Славич» (г. Переславль-Залесский) со стандартными толщинами в пределах 5–25 мкм. Основные параметры ПГДР (дифракционная эффективность, спектральная и угловая селективность) на этих слоях хорошо описываются теорией связанных волн [8]. Так, модуляция показателя преломления таких ПГДР достигает значения 0,04, что дает возможность получения высоких значений дифракционной эффективности ($> 0,8$ для поляризованного света и $> 0,5$ — для неполяризованного). Критическими параметрами постэкспозиционной обработки слоев являются температурный режим проявляющих растворов, использование постэкспозиционного дублирования слоев и термообработка полученных ГДР.

Достигнуты воспроизводимые значения дальнего контраста ($> 1 \cdot 10^4$) ПГДР с частотами 2600–3700 мм^{-1} . Изготовлены и испытаны с положительными результатами образцы ПГДР с размерами 260 × 30 мм для уникального трехканального спектрометра [9]. Для низкочастотных ГДР используются слои БХЖ с толщинами 30–60 мкм собственного производства. Разработаны метод полива способом формования [10] и техпроцесс получения низкочастотных ГДР на слоях БХЖ увеличенной толщины. Изготовленная серия низкочастотных ПГДР используется для работы в агрессивных средах.

Список источников

- [1] Любин, В. М. Стеклообразные полупроводники в устройствах регистрации оптических изображений / В. М. Любин. — Структура и свойства некристаллических полупроводников. — Л.: Наука, 1975. — С. 415–425.
- [2] Малиновский, В. К. О механизме фотопревращений в средах для оптической памяти / В. К. Малиновский // Автометрия. — 1985. — № 1. — С. 25–40.
- [3] Моден, А. Физика и применение аморфных полупроводников / А. Моден, М. Шо. — М.: Мир. — 670 с.
- [4] Мамедов, С. Б. Фотостимулированные изменения скорости растворения пленок As_2S_3 и AsSe / С. Б. Мамедов, М. Д. Михайлов, В. Р. Погорелова, О. А. Яковук // Неорганические материалы. — 1988. — Том 23. — № II. — С. 1804–1808.
- [5] Berkes, J. S. Photodecomposition of amorphous As_2S_3 and AsSe / J. S. Berkes, S. W. Jng, W. J. Hillegas // Journal of Applied Physics. — 1971. — Vol. 42. — № 12. — P. 4908–4916.
- [6] Саттаров, Ф. А. Оптимизация техпроцессов изготовления рельефно-фазовых дифракционных оптических элементов в слоях халькогенидов, с учетом результатов исследования физической природы фотостимулированных процессов / Е. А. Вандюков, В. Л. Филиппов, А. В. Лукин, М. Ю. Знаменский, И. И. Вандюкова, А. П. Соболев // Сборник трудов VI международной конференции «Прикладная оптика». — Санкт-Петербург, 2004. — Том 4. — С. 104–107.
- [7] Саттаров, Ф. А. Исследование структурных нанонеоднородностей в халькогенидах различного стехиометрического состава / Ф. А. Саттаров, Е. А. Вандюков, В. Л. Филиппов, А. В. Лукин, И. И. Вандюков, А. П. Соболев, М. Ю. Знаменский // Сборник статей XII конференции «Структура и динамика молекулярных систем». — Москва, 2004. — Ч. 2. — С. 170–175.
- [8] Kogelnik, H. Coupled Wave Theory for Thick Hologram Grating / H. Kogelnik // Bell System Technical Journal. — 1969. — Vol. 48. — № 9. — P. 2909–2947.

- [9] **Тугаринов, С. Н.** Новый класс спектрометров-полихроматоров высокого разрешения на основе пропускающих голографических дифракционных решеток / С. Н. Тугаринов, А. А. Белокопытов, А. В. Лукин, Н. Н. Науменко, Ф. А. Саттаров, В. В. Серов, Н. М. Шигапова, В. П. Ярцев // Контенант. — 2016. — Том 15. — № 3. — С. 43–50.
- [10] **А. с. № 951224.103 СССР.** Способ нанесения светочувствительных материалов для получения ГОЭ / Ю. Н. Денисюк, З. А. Загорская и др. — Оpubл. 15.08.1980. — Бюлл. № 30.

Various types of highly effective holographic diffraction gratings in JSC “NPO GIPO”

F. A. Sattarov, M. Y. Znamensky, N. M. Shigapova, L. A. Maksakova, T. B. Sidorova, I. I. Khasanova
Scientific and Production Association “State Institute of Applied Optics”, Kazan, Russia

In this paper, we present the results obtained while developing the technological processes foundations for manufacturing holographic gratings using light-sensitive medium based on vacuum-precipitated layers of chalcogenide vitreous semiconductors of As_xSe_{1-x} composition and based on dichromated gelatin.

Keywords: Holographic grating, Chalcogenide vitreous semiconductor, Dichromated gelatin.