

04;06;07;12

## Влияние зарядки халькогенидных стеклообразных полупроводников в коронном разряде на процессы образования голографических дифракционных решеток

© А.М. Настас, А.М. Андриеш, В.В. Бивол, А.М. Присакар, Г.М. Тридух

Центр оптоэлектроники института прикладной физики АН Молдавии,

D-2028 Кишинев, Молдавия

E-mail: nastas\_a@usm.md

(Поступило в Редакцию 24 декабря 2007 г. В окончательной редакции 29 мая 2008 г.)

Исследованы процессы регистрации оптических голографических интерференционных решеток на основе фотоструктурных превращений в тонкопленочных ( $\sim 1 \mu\text{m}$ ) полупроводниковых слоях  $\text{As}_2\text{S}_3$  и  $\text{As}_2\text{Se}_3$  как в поле коронного разряда, так и без него, а также процесс химического травления образованных голографических дифракционных решеток. Показано, что использование коронного разряда на стадии записи интерференционных решеток приводит к улучшению экспозиционно-контрастной характеристики тонкослойных структур металл–халькогенидный стеклообразный полупроводник. Голографическая чувствительность, дифракционная эффективность, динамический диапазон и контраст в несколько раз улучшаются. При селективном химическом травлении дифракционных решеток, сформированных в этих полупроводниковых слоях, в присутствии коронного разряда происходит увеличение степени регулярности протравленных рельефно-фазовых голографических дифракционных решеток, увеличение глубины их рельефа на 25–30% и дифракционной эффективности на 30–50%.

PACS: 81.05.Ge

### Введение

Известно, что халькогенидные стеклообразные полупроводники (ХСП) широко используются в качестве голографических носителей [1]. ХСП позволяют производить запись оптической информации на основе процессов фотоструктурных превращений, фотостимулированной электродиффузии металлов или фотокристаллизации. Пленки ХСП составляют основу класса неорганических фоторезистов, принцип действия которых основан на фотоструктурных превращениях (ФСП) [2]. Применение в технологиях на основе ФСП тонких пленок ХСП приводит к относительно невысоким значениям голографической чувствительности  $S$  ( $10^{-1} - 10^1 \text{ J/cm}^2$ ) и сравнительно низким значениям дифракционной эффективности ( $\eta \sim 10^{-2}$ ) [2].

Для устранения этих недостатков обычно используют процессы фотодиффузии серебра [3], электродиффузии в системе металл–стеклообразный полупроводник–металл [4], легирование слоев халькогенидных стеклообразных полупроводников оловом [5] и другими металлами. Однако использование этих процессов усложняет традиционную технологию получения образцов. В работе [6] исследовано фотоиндуцированное изменение оптических свойств в многослойных структурах на базе ХСП при наличии одновременно приложенного электрического поля, а также показано, что при этом происходит дополнительное увеличение амплитуды модуляции коэффициента пропускания, показателя преломления.

Целью настоящей работы являлось исследование процессов образования голографических дифракционных

решеток как на стадиях записи голографических интерференционных решеток в тонкопленочных структурах на базе халькогенидных стеклообразных полупроводниковых слоев в поле коронного разряда, так и на стадии их травления.

### 1. Методика получения и исследования образцов

Для регистрации голографических интерференционных решеток образцы получали методом последовательного термического напыления Ni и  $\text{As}_2\text{S}_3$  в вакууме при остаточном давлении  $\sim 2 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}$  на оптически полированную стеклянную подложку. Толщина полупрозрачного металлического слоя, который при зарядке в поле коронного разряда служил одним из электродов, составляла несколько сотен нанометров, а толщина полупроводниковых слоев составляла  $1 \mu\text{m}$ .

Исследование процесса записи голографических интерференционных решеток на тонкослойных структурах металл–полупроводник проводилось с одновременной их зарядкой в поле коронного разряда, при этом в некристаллических высокоомных полупроводниках создавалось электрическое поле напряженностью  $E = 10^4 - 10^6 \text{ V/cm}$ . При таком способе зарядки поверхность ХСП в неэкспонированных участках приобретает потенциал, равный нескольким сотням вольт. Кинетика развития поверхностного потенциала в данном случае носит довольно сложный характер. Однако после выхода потенциала на стационарные значения и установления в исследуемых образцах электрического поля порядка

$10^4$ – $10^6$  V/cm потенциал можно в первом приближении считать медленно изменяющимся во времени.

Получение лазерных интерференционных решеток осуществлялось по стандартной внеосевой схеме Лейта–Упатниекса. Когерентным источником был Ar-лазер с длиной волны излучения  $\lambda = 0.488 \mu\text{m}$ , суммарная мощность регистрируемого изображения составляла 0.64 mW, мощность в обоих плечах интерферометра была одинаковой. Измерение дифракционной эффективности  $\eta$  производилось в квазиинертном для данных тонкопленочных структур лазерным лучом с  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$  (ЛГН-208А). Ее определяли как отношение интенсивности света в первом дифракционном максимуме к интенсивности света, прошедшего через неэкспонированный участок используемого образца. Такое определение дифракционной эффективности позволяло исключить влияние поглощения и рассеяния в тонкослойных слоях структуры металл–полупроводник восстанавливающего луча и производить сопоставление экспериментально измеренных и расчетных значений дифракционной эффективности [7]. Для измерения толщины образцов использовался интерференционный микроскоп МИИ-4.

Травление производилось в водном растворе неорганической (KOH) щелочи. Исследование поверхности образованных рельефно-фазовых дифракционных решеток, периоды которых были равны 0.5 и  $1 \mu\text{m}$ , было проведено на атомно-силовом микроскопе.

## 2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведено семейство временных зависимостей дифракционных эффективностей решеток регистрируемых в тонкопленочных полупроводниковых слоях  $\text{As}_2\text{S}_3$ . При потенциале на коронирующей нити  $U = 0$  kV (кривая 1) значение  $\eta$  вначале монотонно увеличивается, а затем при увеличении времени экспозиции  $t$  плавно переходит к насыщению. Однако, как видно из рис. 1, использование коронного разряда (кривые 2–4) приводит, с одной стороны к увеличению абсолютного значения  $\eta$ , а с другой — зависимости  $\eta = \eta(t)$  изменяется уже по кривой с максимумом. Голографическая чувствительность  $S$  (определенная на уровне 1% дифракционной эффективности) равна 160, 135, 115 и  $135 \text{ mJ/cm}^2$  при  $U = 0, 5, 6.5$  и 8 kV соответственно. Для получения максимального динамического диапазона наиболее оптимальным является использование для записи  $U = 8$  kV (рис. 1, кривая 4), а для получения максимальных значений  $S$  и контраста  $K$  —  $U = 6.5$  kV (рис. 1, кривая 3).

При данной конструкции коронирующего устройства, внешних атмосферных и экспериментальных условиях критический потенциал коронного разряда, при котором возникал разряд, был равен  $U_{\text{cr}} = 4.5$  kV. Выраженный максимум и „пороговый“ характер кривой 2 ( $U = 5$  kV)

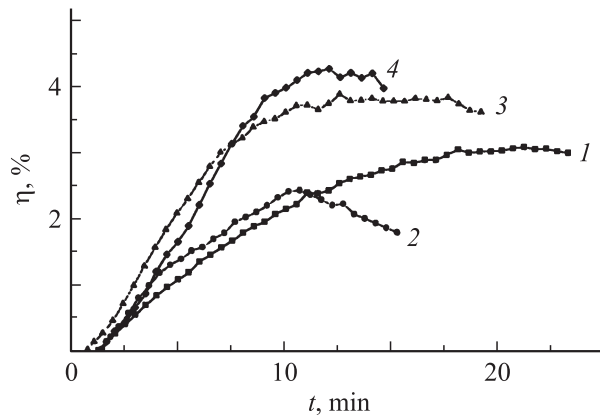


Рис. 1. Зависимость дифракционной эффективности от времени записи голографических интерференционных решеток в пленке  $\text{As}_2\text{S}_3$ -Ni: 1 —  $U = 0$ , 2 — 5, 3 — 6.5, 4 — 8 kV.

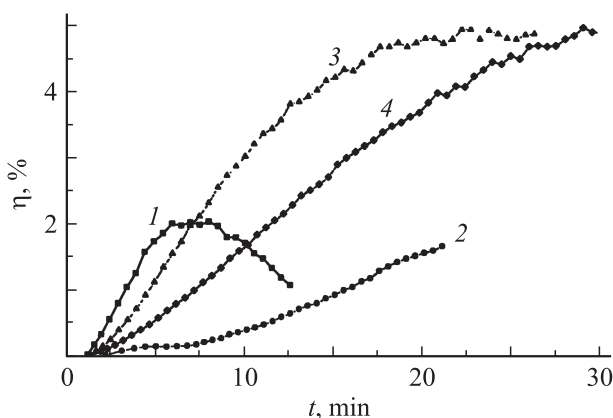


Рис. 2. Тоже, что на рис. 1, для гетероструктуры  $\text{As}_2\text{S}_3/\text{As}_2\text{Se}_3$ .

обусловлен, по-видимому, переходными процессами, происходящими при относительно низких значениях электрического поля  $10^1$ – $10^2$  V/cm в момент зажигания коронного разряда.

При записи голографических интерференционных решеток на гетероструктурах  $\text{As}_2\text{S}_3/\text{As}_2\text{Se}_3$  (рис. 2) в коронном разряде (положительный потенциал подавался на верхний слой гетероструктуры —  $\text{As}_2\text{S}_3$ ) наблюдался несколько иной характер зависимостей  $\eta = \eta(t)$ . При этом пленки были получены методом последовательного термического напыления в вакууме на металлизированную Ni стеклянную подложку. Толщина слоев была следующей:  $\text{As}_2\text{S}_3$  —  $1 \mu\text{m}$ ,  $\text{As}_2\text{Se}_3$  —  $2 \mu\text{m}$ . Отличие в кривых зависимости  $\eta = \eta(t)$ , прежде всего, состояло в том, что при  $U = 0$  kV у зависимости  $\eta = \eta(t)$  наблюдался ярко выраженный максимум ( $t = 6$  min). В поле коронного разряда зависимости  $\eta = \eta(t)$  носят практически линейный характер, при этом по крайней мере до  $t = 18$ – $25$  min практически не наблюдался участок перехода к насыщению  $\eta$ . Динамические диапазоны (линейные участки, см. рис. 2) при  $U$ , равном 5, 6.5 и 8 kV, примерно в 3–4 раза больше, чем при  $U = 0$  kV,

примерно в 3–4 раза больше, чем при  $U = 0$  кВ. Голлографическая чувствительность  $S$  (определенная на уровне 1%) равна 120, 570, 170 и 170 мДж/см<sup>2</sup> при  $U = 0, 5, 6.5$  и 8 кВ соответственно. Наиболее оптимально использование для записи  $U = 8$  кВ (рис. 2, кривая 4); при этом наблюдается наибольший динамический диапазон, кроме того, среднее значение  $S$  и значение контраста  $K$  также возрастало.

В данной работе была исследована кинетика травления голографических дифракционных решеток (ГДР). Решетки были зарегистрированы в тонкопленочных структурах  $As_2S_3-Ni$ . Использование коронного разряда на стадии записи интерференционных решеток практически не изменяет характера травления. Вначале дифракционная эффективность уменьшается вплоть до нуля, а затем начинается ее рост по кривой с максимумом. Первый факт обусловлен вычитанием из амплитудно-фазовой решетки, а возможно из амплитудно-фазово-рельефной [8], образующейся рельефно-фазовой. После процесса травления значения  $\eta$  выше примерно на 50% у образцов, полученных в поле коронного разряда, по сравнению с ГДР, полученными без приложения поля. Эти зависимости позволяют утверждать, что для достижения максимальных глубин рельефа наиболее оптимальным окажется процесс негативного травления. Непротиворечивость последнего утверждения косвенно подтверждают результаты, представленные в работах [9,10].

На рис. 3 приведены фотографии протравленной поверхности решеток, которые были зарегистрированы в пленке  $As_2S_3$  в поле коронного разряда (*b*) и без него (*a*), а на рис. 4 — их профили. Из рисунков видно, что

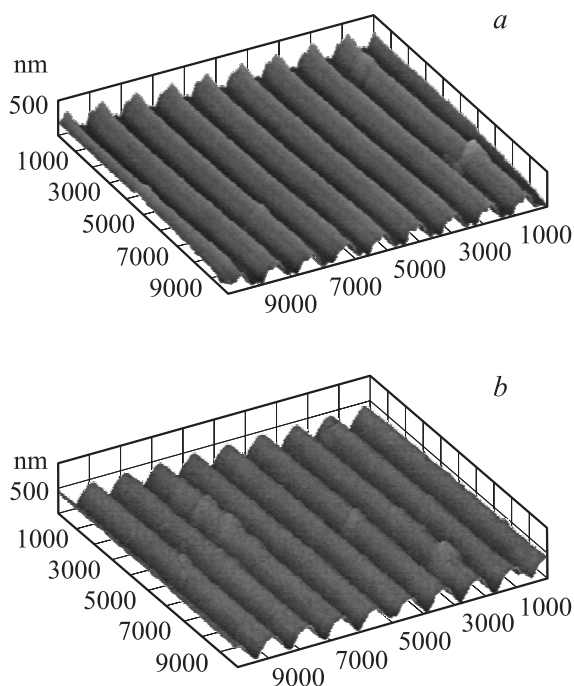


Рис. 3. Топография голографических дифракционных решеток.

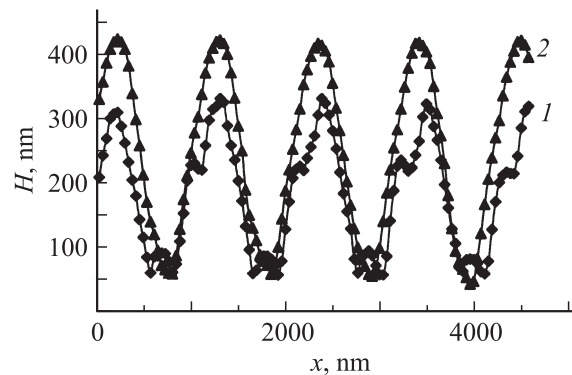


Рис. 4. Форма профиля голографических дифракционных решеток. Кривые 2 и 1 соответствуют процессу регистрации голографических интерференционных решеток в поле коронного разряда и без него соответственно.

использование коронного разряда приводит к увеличению на 25–30% степени регулярности и глубины рельефа, профиль при этом становится более регулярным и квазисинусоидальным. При осуществлении оптимизации использование предлагаемого нами способа образования ГДР [11] позволяет получить „синусоидальную“ рельефно-фазовую ГДР с максимально достижимым для нее значением  $\eta$  равным 34% [7,12].

Качественное объяснение наблюдаемых явлений может быть дано с учетом следующих факторов:

1) темп генерации неравновесных носителей повышается благодаря эффекту Франца–Келдыша и повышенным значениям квантового выхода при высоких полях [13];

2) интенсивность ФСП в ХСП увеличивается за счет дополнительной энергии электрического поля;

3) уменьшение диффузионного размытия неравновесных носителей обусловлено наличием поперечного (нормального к поверхности ХСП) электрического поля.

На наш взгляд, первый фактор обеспечивает увеличение светочувствительности ХСП структур, второй — улучшение светомодуляционных характеристик, третий — увеличение контраста и глубины селективно протравленных дифракционных структур.

## Выводы

1. Установлено, что при регистрации голографических интерференционных решеток в поле коронного разряда на тонкослойных структурах металл–халькогенидный стеклообразный полупроводник происходит увеличение голографической чувствительности, дифракционной эффективности, расширение динамического диапазона и контраста.

2. Показано, что селективное травление этих решеток, полученных в поле коронного разряда, приводит к увеличению степени регулярности, глубины рельефа на 25–30% и увеличению дифракционной эффективности

на 30–50% полученных рельефно-фазовых дифракционных решеток. Их профиль с высокой степенью точности может быть аппроксимирован синусоидой.

3. Проведенные экспериментальные исследования позволяют утверждать, что предлагаемый способ записи оптической информации с использованием коронного разряда позволит улучшить параметры голографических оптических элементов на базе ХСП, используемых как самостоятельно, так и в различных оптоэлектронных и голографических измерительных системах.

В заключение авторы выражают благодарность сотрудникам Национального центра „Исследований и тестирования материалов“ Государственного технического университета Молдовы и чл. кор. АН РМ, проф. И.М. Тигиняну за возможность проводить исследования на атомно-силовом микроскопе и постоянное внимание к работе.

Работа выполнена при поддержке гранта госпрограммы 07.408.04.06.РА и международного АНМ и РФФИ 06.04CRF.

## Список литературы

- [1] *Schwartz K.* The physics of Optical Recording, Berlin: Springer-Verlag, 1993.
- [2] Несеребряные фотографические процессы / Под ред. А.Л. Каргужанского. Л.: Химия, 1984. С. 193–241.
- [3] *Индутный И.З., Костышин М.Т., Касярум О.П.* и др. Фотостимулированные взаимодействия в структурах металл–полупроводник. Киев: Наукова думка, 1992. 240 с.
- [4] *Андриеш А.М., Милочихин В.Н., Тридух Г.М., Циуляну Д.И.* // Тез. докл. Всес. конф. „Регистрирующие среды, методы и аппаратура голографии“. Кишинев, 1980. Секция 1. С. 64.
- [5] *Бурдиян И.И., Выговский Ю.Н., Феценко И.С.* БШШФ. Материалы школ по голографии <http://bsfp.media-security.ru/bsff2/bb04cn2.htm>. 1999.
- [6] *Настас А.М., Андриеш В.В., Бивол А.М., Присакар Г.М., Тридух Г.М.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 1. С. 89–94.
- [7] *Настас А.М.* // Опт. и спектр. 2003. Т. 95. № 1. С. 156–162.
- [8] *Shimakawa K.* // J. of Optoelectr. and Adv. Mat. 2005. Vol. 7. N 1. P. 145–151.
- [9] *Eiseberg N.P., Manevich M., Arsh A., Klebanov M., Lyubin V.* // Chalcogenide. Lett. 2005. Vol. 2. N 4. P. 35–37.
- [10] *Koreshev S.N., Ratushnyi V.P.* // Proc. SPIE. 2004. Vol. 5290. P. 221–232.
- [11] *Настас А.М., Андриеш А.М., Бивол В.В., Присакар А.М., Тридух Г.М.* Патент Республики Молдова 3330(13) В1, MD-ВОП. 2007. N 5. С. 55.
- [12] *Кольер Р., Беркхард К., Лин Л.* Оптическая голография. М.: Мир, 1973. 686 с.
- [13] *Мотт Н., Дэвич Э.* Электронные процессы в некристаллических веществах. М: Мир, 1982.