

ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ПАРАЗИТНОГО НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФНО-ФАЗОВЫХ ГОЛОГРАММНЫХ СТРУКТУР НА ТОНКИХ ПЛЕНКАХ ХАЛЬКОГЕНИДНОГО СТЕКЛООБРАЗНОГО ПОЛУПРОВОДНИКА ОТ ВЫСОТЫ ИХ РЕЛЬЕФА

© 2009 г. С. Н. Корешев*, доктор техн. наук; В. П. Ратушный**

* Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

** “ХолоГрэйт”, Санкт-Петербург

Приведены результаты экспериментального исследования влияния высоты рельефа отражательных рельефно-фазовых голограмм, получаемых на слоях халькогенидного стеклообразного полупроводника (ХСП), на параметры паразитной наноструктуризации их поверхности. Работа выполнена с помощью сканирующего зондового микроскопа *Solver P-47*. Установлена коротковолновая граница применимости отражательных рельефно-фазовых голограмм, получаемых на тонких слоях ХСП без какой-либо апостериорной обработки, равная 80 нм. Начиная с нее, голограммы, характеризующиеся высотой рельефа, оптимальной с точки зрения максимальной дифракционной эффективности, удовлетворяют по параметру среднеквадратичной шероховатости их поверхности σ критериям Марешаля $\sigma \leq \lambda/27$ и допустимого светорассеяния $\sigma \leq \lambda/100$ и тем самым обеспечивают в восстановленном с их помощью изображении допустимый для прецизионных оптических систем уровень светорассеяния и аберраций.

Ключевые слова: высота рельефа, среднеквадратичная шероховатость, аберрация голограммы, коротковолновая граница применимости.

Коды OCIS: 090.2890, 090.2900

Поступила в редакцию 20.11.2008

В ряде приложений голографии, например, в голограммной оптике при изготовлении голограмм-проекторов для точного отображения двумерных транспарантов, предъявляются чрезвычайно высокие требования к уровню паразитной модуляции оптических параметров носителя голограммы. С этой точки зрения долгие годы практически идеальной средой для записи рельефно-фазовых голограмм считались тонкие пленки ХСП, допускающие их нанесение на подложки методом распыления в вакууме и характеризующиеся отсутствием макромолекулярной структуры [1]. Однако, проведенные авторами настоящей работы исследования показали наличие у этой среды, в частности, у трехкомпонентного, состоящего из мышьяка, серы и селена, ХСП, паразитной структуризации поверхности [2]. Эта структуризация обеспечивает модуляцию высоты рельефа регистрируемых голограмм по случайному закону и приводит к существованию коротковолновой границы применимости среды. В качестве возможной ее причины в работе [2] названа исходная кластерная структура пленки ХСП, обуславливающая пространственные вариации скорости травления пленки в травящем

растворе. Там же было показано, что максимальные вариации скорости травления и размеры кластеров характерны для неэкспонированных участков пленки ХСП и существенно уменьшаются с ростом экспозиции.

Настоящая статья посвящена результатам дальнейшего исследования закономерностей паразитной структуризации тонких пленок ХСП, в частности, исследования зависимости ее параметров от высоты рельефа получаемых рельефно-фазовых голограммных структур. При проведении этой работы авторы исходили из того, что раз высота паразитного рельефа есть следствие вариаций скорости травления пленки ХСП, то сокращение времени травления, а, следовательно, и высоты рельефа получаемой голограммной структуры, должно приводить к существенному уменьшению амплитуды паразитной модуляции ее рельефа. При этом в качестве объекта исследования по-прежнему использовались пленки трехкомпонентного ХСП толщиной 1,2 мкм, нанесенные методом распыления в вакууме на подложки из плавленого кварца размером 15×15×3 мм. Эти подложки по параметрам шероховатости были весьма высоко-

го качества. По классификации фирмы *Optimax* [3] они располагались между прецизионными оптическими элементами – среднеквадратичная шероховатость 2 нм, и элементами, изготавливаемыми по спецзаказу – среднеквадратичная шероховатость – 0,2 нм. Об этом свидетельствуют наибольшая измеренная на базовой длине 1 мкм высота профиля их поверхности, не превосходящая 2,3 нм, и среднеквадратичная шероховатость, лежащая в пределах $0,4 \pm 0,1$ нм. Отметим, что под среднеквадратичной шероховатостью здесь понимается величина, равная квадратному корню разности среднего квадрата и квадрата средней высоты шероховатости поверхности [2].

Методика работы включала в себя экспонирование пленок в голографическом поле с пространственной частотой 1800 мм^{-1} , сформированном с помощью двух параллельных пучков излучения аргонового лазера с длиной волны 488 нм, с последующей обработкой в травящем растворе на основе дипентиламина и триэтилфосфата получаемых рельефно-фазовых голограммных структур. Экспозиция в процессе всей работы выдерживалась постоянной, равной 150 мДж/см^2 , что обеспечивало максимально возможную разность скоростей травления в растворе экспонированных и неэкспонированных участков пленок ХСП. При этом соотношение интенсивностей опорного и объектного пучков было равно 1:3,5. Отметим, что указанные выше значения параметров пленок ХСП, пространственной частоты регистрируемого голографического поля и условия регистрации голограмм являются типичными для большинства отражательных рельефно-фазовых голограммных оптических элементов, получаемых в видимом диапазоне спектра, в том числе и для голограмм-проекторов, изготавливаемых для целей фотолитографии [4, 5]. Анализ полученных голограммных структур проводился методом полуконтактной атомно-силовой микроскопии с помощью сканирующего зондового микроскопа *Solver P-47*, обеспечивающего точность измерения шероховатости в 1 нм. При этом выбор для исследования простых эквидистантных одномерных голограммных структур и сканирование зондом микроскопа как в дифракционном сечении голограмм, так и поперек его позволяли разделить модуляцию толщины регистрирующей среды, обусловленную регистрацией голограммной структуры, от наиболее интересной для данного исследования паразитной “шумовой” структуризации поверхности пленки ХСП.

Время обработки экспонированных пленок в растворе варьировалось от 2 до 14 минут, что позволяло получать голограммные структуры с высотой рельефа от 3 до 120 нм соответственно.

На рис.1 представлен профиль поверхности голограммы с высотой рельефа 3 нм, полученный в результате сканирования ее поверхности вдоль дифракционного сечения, т. е. поперек штрихов дифракционной структуры. Нарушения периодичности структуры голограммы, которые заметны на рисунке, могут быть объяснены двумя факторами: близкими по значению амплитуды и периода следования вариациями толщины регистрирующей среды, связанными со структурой зарегистрированного голографического поля, и “шумовой”, то есть паразитной модуляцией толщины среды, обусловленной, в первую очередь, шероховатостью поверхности подложки. В качестве подтверждения этого факта на рис. 2 приведены результаты сканирования поверхности этой голограммы в сечении, ортогональном дифракционному сечению, вдоль вершинок рельефа голограммной структуры. На рис. 3 и 4 представлены результаты быстрого фурье-преобразования функций, описывающих форму профиля рельефа голограммной структуры в дифракционном и в ортогональном ему сечениях соответственно. Заметная на этих рисунках близость пространственных частот первого максимума спектра профилей рельефа, соответствующих основной и паразитной модуляций толщины пленки ХСП, вызвана, как это отмечалось в работе [2], кластерной природой исходной пленки ХСП с размером кластеров, примерно равным 500 нм.

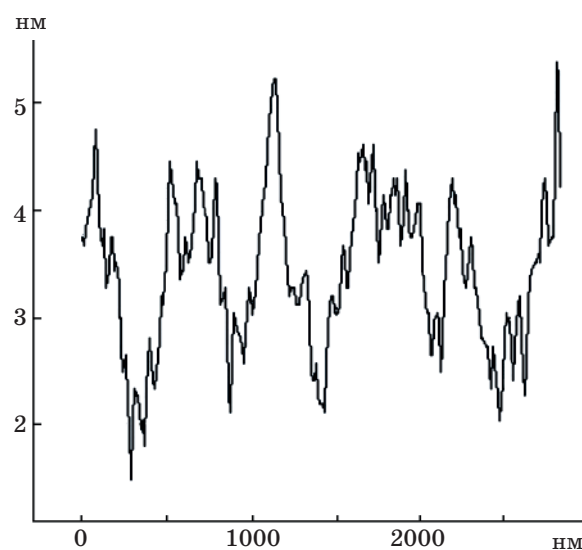


Рис. 1. Сечение поверхности голограммы поперек штрихов с высотой рельефа 3 нм.

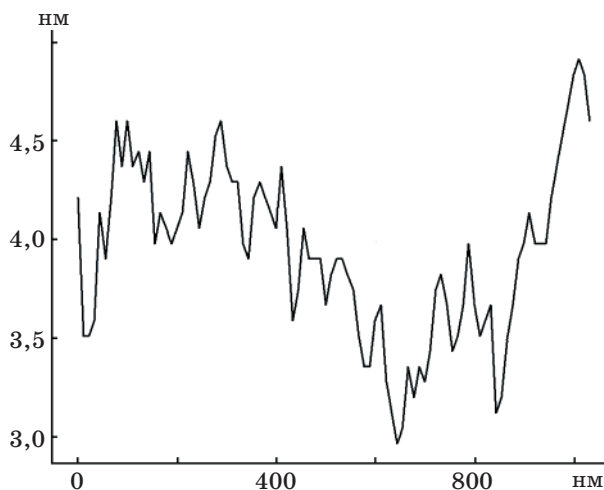


Рис. 2. Сечение поверхности голограммы вдоль вершинок рельефа голограммной структуры. Высота рельефа голограммной структуры – 3 нм.

Увеличение времени травления экспонированных пленок ХСП, а следовательно, и высоты рельефа получаемых голограмм приводит к большей упорядоченности получаемых голограммных структур вследствие более медленного роста высоты рельефа шероховатости голограмм по сравнению с ростом высоты основной голограммной структуры. Об этом свидетельствует приведенный на рис. 5 график зависимости среднеквадратичной шероховатости поверхности голограммы от высоты ее рельефа. На этом графике по оси ординат отложены значения среднеквадратичной шероховатости, усредненной по всем сечениям голограммы ортогональным дифракционному сечению, а по оси абсцисс отложены значения высоты рельефа голограммной структуры в ее дифракционном сечении. Данные, представленные на рис. 5, позволяют определить минимальное значение рабочей длины волны, связанное с шероховатостью пленок ХСП, отражательных рельефно-фазовых голограммных оптических элементов, которые получены на таких пленках. При ее определении будем исходить из того, что паразитная структуризация поверхности голограммы приводит как к абберациям в восстанавливаемых с ее помощью волновых фронтах, так и к светорассеянию излучения, восстанавливающего голограмму [2]. Для оценки аббераций голограммы, определяемых шероховатостью поверхности, воспользуемся критерием Марешаля [6]. В соответствии с ним среднеквадратичная деформация волнового фронта, формируемого практически безаббер-

рационной оптической системой, не должна превышать по своему значению рабочей длины волны, деленной на 13,5. В случае отражательной рельефно-фазовой голограммы этот критерий может быть сформулирован в виде: $\sigma \leq \lambda/27$, где σ – среднеквадратичная шероховатость поверхности голограммы, т. е. среднеквадратичная высота паразитного рельефа ее поверхности, λ – рабочая длина волны излучения.

Помимо аббераций, как уже отмечалось выше, важнейшей характеристикой голограмм,

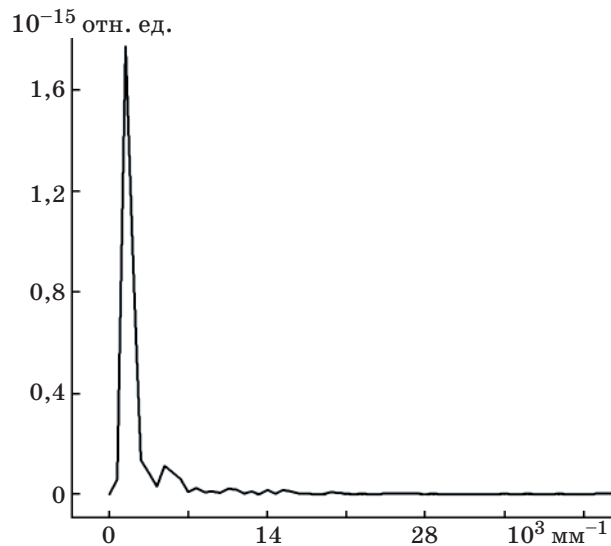


Рис. 3. График быстрого фурье-преобразования для функции, описывающей форму профиля рельефа голограммной структуры в дифракционном сечении.

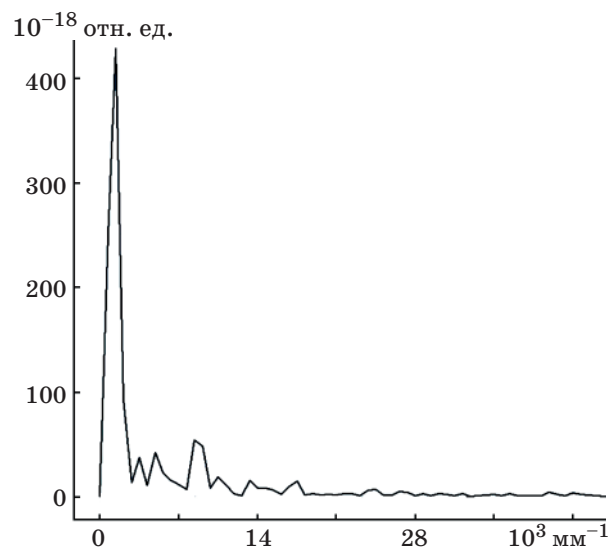


Рис. 4. График быстрого фурье-преобразования для функции, описывающей форму профиля рельефа голограммной структуры в сечении ортогональном дифракционному.

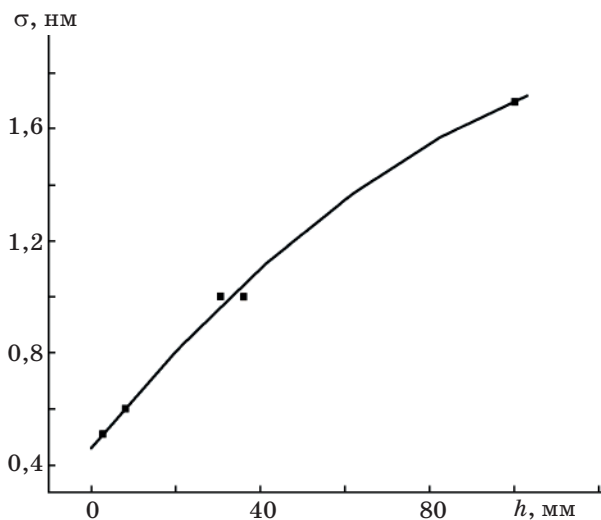


Рис. 5. Зависимость среднеквадратичной шероховатости σ поверхности голограммы от высоты ее рельефа h .

предназначаемых для использования в прецизионных оптических системах, в том числе и в проекционных фотолитографических системах, является светорассеяние. С целью ограничения уровня светорассеяния в фотолитографических оптических системах допускается использование оптических деталей с поверхностями, обладающими среднеквадратичной шероховатостью, не превышающей $0,01\lambda$ [7].

Исходя из вышеперечисленных критериев и данных, представленных на рис. 5, можно определить минимально допустимые рабочие длины волн для голограмм, полученных на тонких пленках ХСП и обладающих различными высотами рельефа.

Из данных, приведенных в таблице, следует, что голограмма с высотой рельефа 3 нм не удовлетворяет ни по одному из указанных выше критериев при работе в излучении с дли-

Коротковолновые границы применимости отражательных рельефно-фазовых голограмм

Высота рельефа голограммы, нм	3	8	20	30	100
Коротковолновая граница применимости, рассчитанная исходя из критерия Марешаля, нм	14	16	22	27	46
Коротковолновая граница применимости, рассчитанная исходя из допустимого уровня светорассеяния, нм	53	58	80	100	170

ной волны, соответствующей ее максимальной дифракционной эффективности и равной по величине примерно 4 высотам ее рельефа, т. е. 12 нм. Голограмма же, обладающая высотой рельефа 8 нм на длине волны, соответствующей ее максимальной дифракционной эффективности, равной примерно 32 нм, позволит формировать практически безаберрационный волновой фронт, однако будет обладать недопустимым, с точки зрения указанного выше критерия, уровнем светорассеяния. Граничной, с точки зрения применимости отражательных рельефно-фазовых голограмм, получаемых на тонких слоях ХСП без какой-либо апостериорной обработки, можно считать длину волны 80 нм. Начиная именно с нее, голограммы обладают оптимальной высотой рельефа для получения максимальной дифракционной эффективности, удовлетворяют обоим указанным выше критериям, а следовательно, и обеспечивают в восстановленном с их помощью изображении допустимый для прецизионных оптических систем уровень светорассеяния и аберраций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Герке Р.Р., Крыжановский И.И., Михайлов М.Д., Травникова Н.Л., Шевченко Н.П., Юсупов И.Ю. Использование плёнок сульфида мышьяка в ионной технологии голограммных оптических элементов // Тезисы докладов VI Всесоюз. конф. по голографии. г. Витебск, 1990. С. 9.
2. Корешев С.Н., Ратушный В.П. Наноструктурирование тонких пленок халькогенидного стеклообразного полупроводника в процессе формирования рельефно-фазовых голограммных структур // Опт. и спектр. 2009. Т. 106. № 2. С. 331–336.
3. Hunter W.R., Kowalski V.P., Rife J.C., Cruddace G. Investigation of the properties of an ion-etched plane laminar holographic grating // Appl. Opt. 2001. V. 40. № 34. P. 6157–6165.
4. Герке Р.Р., Корешев С.Н., Семёнов Г.Б. Голограммная оптика в ГОИ им. С.И. Вавилова // Оптический журнал. 1994. № 1. С. 26–39.
5. Корешев С.Н., Ратушный В.П. Использование метода голографии для получения изображений двумерных объектов при решении задач фотолитографии высокого разрешения // Оптический журнал. 2004. Т. 71. № 10. С. 32–39.
6. Марешаль А., Франсон М. Структура оптического изображения. Дифракционная теория и влияние когерентности света. М.: Мир, 1964. 295 с.
7. Ackerman B., Heckle C., Hrdina K., Sabia R., Navan D. An old material finds a new application // Laser focus world. 2002. V. 38. № 11. P. 109–113.