

ГОЛОГРАФИЯ

УДК 53.08; 535.016

МЕТОД ОЦЕНКИ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ РЕЛЬЕФНО-ФАЗОВЫХ ГОЛОГРАММНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И ЕЕ ВЛИЯНИЯ НА ИХ ИЗОБРАЖАЮЩИЕ СВОЙСТВА

© 2011 г. С. Н. Корешев, доктор техн. наук; Ю. В. Атлыгина

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

E-mail: atlygina_julia@inbox.ru, koreshev@list.ru

Описан способ определения коротковолновой границы применимости рельефно-фазовых голограммных оптических элементов (ГОЭ), обусловленной шероховатостью их поверхности. Его суть заключается в использовании данных, получаемых с помощью атомно-силового микроскопа, для определения усредненной по базовой площади, т. е. площади сканирования, формы профиля рельефа ГОЭ; в определении на ее основе усредненных по той же базовой площади значений среднеквадратической шероховатости его поверхности и в последующем расчете граничной длины волны применимости ГОЭ. Разработан программный модуль для реализации способа.

Ключевые слова: рельефно-фазовая голограмма, голограммный оптический элемент, шероховатость поверхности, среднеквадратическая шероховатость поверхности, аберрации оптических систем, светорассеяние, программный модуль.

Коды OCIS: 090.0090, 090.2890.

Поступила в редакцию 07.09.2010.

Интерес к использованию голограммных оптических элементов (ГОЭ) в УФ диапазоне спектра предопределяет необходимость исследования их изображающих свойств в этой области длин волн, в частности, необходимость изучения параметров паразитной, т. е. не связанной с основной голограммной структурой, модуляции их оптических характеристик [1–3]. Особенно актуальна эта задача для отражательных рельефно-фазовых ГОЭ [4]. Для них коротковолновая граница применимости определяется в основном параметрами паразитной модуляции профиля поверхности ГОЭ, а не спектральной границей светочувствительности регистрирующей среды. Паразитная модуляция профиля голограммной структуры может быть обусловлена как оптической неоднородностью самой регистрирующей среды, так и вариациями скорости формирования поверхностного рельефа в процессе фотохимической обработки голограмм. В конечном счете она приводит не только к повышению уровня светорассеяния ГОЭ, но (как всякая другая деформация поверхности оптического элемента, тем более элемента, работающего на отражение)

в общем случае и к аберрациям преобразуемых с помощью ГОЭ волновых фронтов [5]. При этом даже такие, казалось бы, однородные регистрирующие среды, как органические и неорганические фоторезисты и фотополимеры, имеют свою коротковолновую границу применимости, обусловленную не столько спектральным диапазоном их чувствительности, сколько шероховатостью получаемых с их помощью голограммных структур [1, 6]. В частности, для отражательных голограмм вносимая ими среднеквадратическая ошибка деформации волнового фронта, выраженная в линейной мере, равна удвоенному значению среднеквадратической шероховатости (СКШ) их поверхности [5].

Сложность и многопараметричность зависимости свойств поверхностей получаемых ГОЭ от режимов их экспонирования и последующей фотохимической обработки предопределяет необходимость экспериментального исследования свойств поверхностей получаемых ГОЭ как на этапе оптимизации технологических режимов их изготовления, так и в процессе аттестации и сдачи заказчиком изготовленных элементов [7].

Традиционно шероховатость оценивают по ГОСТ 2789-73 [8]. Для аттестации оптических элементов из всех параметров, описанных в [8], наиболее важна СКШ, поскольку именно этот параметр определяет светорассеяние и аберрации аттестуемых оптических элементов, обусловленные свойствами их поверхностей [1, 6]. В настоящее время, как правило, шероховатость оценивается методом атомно-силовой микроскопии (АСМ), поскольку он является одним из наиболее эффективных способов получения данных о поверхности исследуемого образца. Типичным представителем приборов, использующих метод АСМ, является универсальный сканирующий зондовый микроскоп Solver P47, предназначенный для использования в нанотехнологических исследованиях (минимальный шаг сканирования такого микроскопа – 0,0004 мкм). Этот прибор обеспечивает получение изображений поверхности микро- и нанообъектов со сверхвысоким разрешением вплоть до атомарного [9].

Комплект поставки АСМ, как правило, включает в себя различные программные комплексы, предназначенные для цифровой обработки получаемых с их помощью изображений. В частности, совместно с микроскопом Solver P47 обычно используют программный комплекс “Nova”. Все эти программные комплексы ориентированы на получение данных о параметрах шероховатости, предусмотренных стандартом [8]. Такие комплексы позволяют строить гистограммы плотности распределения высот рельефа, вычислять их размах, среднюю арифметическую шероховатость, строить изображение спектра шероховатости и многое другое. Однако, обладая достаточно широким набором средств обработки изображений, они имеют серьезный недостаток – расчет усредненных высоты профиля и СКШ исследуемой поверхности осуществляется согласно стандарту [8] лишь по базовой линии (вдоль сечения). Столь важная для оптических задач необходимость усреднения данных по базовой площади отсутствует. Это затрудняет возможность использования микроскопа для оценки свойств поверхности голограммных структур. Кроме того, рассматриваемые программные комплексы позволяют определять параметры шероховатости, отсчитываемые лишь от базовой плоскости, т. е. они не учитывают регулярную поверхностную структуру образца, что крайне важно для оценки поверхностей рельефно-фазовых ГОЭ.

В работе [1] описан вариант использования традиционного программного комплекса АСМ для оценки шероховатости поверхностей ГОЭ. В нем влияние регулярной структуры ГОЭ на параметры шероховатости его поверхности устранялось путем выбора базовых линий, ориентированных вдоль “вершинок” голограммной структуры, т. е. вдоль сечения ГОЭ, перпендикулярного его дифракционному сечению. Этот вариант позволял учесть регулярную структуру ГОЭ, но требовал последующего ручного усреднения полученных данных по площади.

Для сокращения временных и материальных затрат гораздо удобнее использовать иной способ определения коротковолновой границы применимости рельефно-фазовых ГОЭ, обусловленной шероховатостью их поверхности [10]. Его суть заключена в использовании АСМ для определения усредненной по базовой площади СКШ поверхности и в последующем расчете граничной длины волны применимости ГОЭ. Практическую реализацию способа предлагается осуществлять с помощью специализированного программного модуля, внедряемого в программный комплекс микроскопа. Модуль позволяет по полученному с помощью АСМ изображению базовой поверхности исследуемого образца ГОЭ оценить среднюю форму его профиля, определить ее параметры и их вариации в пределах базовой поверхности. Также он позволяет рассчитывать СКШ исследуемой поверхности и на основе полученных данных определять коротковолновую границу применимости данного образца ГОЭ. Используемые в этом модуле алгоритмы включают получение изображения поверхности, нахождение минимума и максимума высоты рельефа, нахождение формы усредненной базовой поверхности и, наконец, отклонений от этой усредненной поверхности. В настоящее время этот модуль реализован применительно к случаю синусоидального профиля голограммной структуры, в будущем предполагается введение в модуль блока трапецеидальной аппроксимации профиля, что позволит более точно оценить СКШ, вариации формы профиля, а следовательно, и аберрации голограммных структур, обусловленные процессом их регистрации и фотохимической обработки.

Работоспособность и эффективность способа проверялись нами в ходе исследования поверхностей образцов отражательных рельефно-фазовых голограммных структур. Ранее по-

Результаты обработки изображений традиционным и предлагаемым методами

Высота рельефа голограммы, нм		3	8	30	35	100
Средняя по профилю СКШ, нм	Традиционный метод	0,5	0,6	1,0	0,9	1,7
	Предлагаемый метод	0,5	0,6	0,8	0,8	1,2
Коротковолновая граница применимости, рассчитанная исходя из критерия Марешаля, нм	Традиционный метод	14	16	22	27	46
	Предлагаемый метод	14	15	18	22	31
Коротковолновая граница применимости, рассчитанная исходя из допустимого уровня светорассеяния, нм	Традиционный метод	53	58	80	100	170
	Предлагаемый метод	53	55	80	80	115

верхности этих же структур были исследованы традиционным способом [1, 9]. В частности, с помощью описанного выше программного модуля, встроенного в программный комплекс “Nova”, нами были обработаны изображения поверхностей слоев ХСП¹, содержащих голограммные структуры с разной высотой профиля. Результаты обработки этих изображений, проведенной двумя рассмотренными способами, представлены в таблице.

Хорошее соответствие приведенных в таблице данных свидетельствует о близости формы профиля исследованных голограммных структур к синусоидальной, а также о достоверности значений параметров шероховатости аттестуемых голограммных структур, определяемых предлагаемым способом. Эффективность практического применения описанного в настоящей работе способа определения коротковолновой границы применимости рельефно-фазовых голограммных элементов обусловлена полной автоматизацией процесса обработки изображений поверхностей ГОЭ, реализуемого с помощью разработанного нами и описанного в настоящей работе программного модуля. Разработанный модуль удобен в эксплуатации и может быть рекомендован для использования в дополнение к существующим программным комплексам АСМ для повышения удобства и точности оценки параметров оптических элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Rabaday R., Frankstein D., Avrutsky I. Heat treatment for reduction of surface roughness on holographic gratings // *Opt. Lett.* 2003. V. 28. № 18. P. 1665–1667.
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. Корешев С.Н., Ратушный В.П. Голографическая фотолитография на основе тонких пленок халькогенидного стеклообразного полупроводника // *Оптический журнал.* 2007. Т. 74. № 7. С. 80–85.
5. Корешев С.Н., Гиль С.В., Аникиева О.А. Влияние регистрирующей среды на аберрационные свойства голограммных оптических элементов, полученных на тонких слоях галогенидосеребряной фотоэмульсии // *Опт. и спектр.* 1990. Т. 69. № 6. С. 1371–1377.
6. Марешаль А., Франсон М. Структура оптического изображения. Дифракционная теория и влияние когерентности света. М.: Мир, 1964. 295 с.
7. Фризер Х. Фотографическая регистрация информации. М.: Мир, 1978. 670 с.
8. Межгосударственный стандарт ГОСТ 2789-73 “Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики”.
9. Электронный ресурс: <http://www.ntmdt.ru/device/solver-p47-pro>
10. Корешев С.Н., Ратушный В.П. Зависимость параметров паразитного наноструктурирования рельефно-фазовых голограммных структур на тонких пленках халькогенидного стеклообразного полупроводника от высоты их рельефа // *Оптический журнал.* 2009. Т. 76. № 5. С. 47–50.

¹ ХСП – халькогенидный стеклообразный полупроводник.