

### 53. Профилометрическая и дифрактометрическая характеристика синусоидальных тестовых решеток при производстве конформальных и дифракционных оптических элементов

Д. А. Белоусов, В. П. Корольков, Р. К. Насыров

Институт автоматизации и электротехники Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

Представлены результаты исследования применения тестовых синусоидальных решёток для осуществления профилометрического и дифрактометрического производственного контроля формирования многоуровневого микрорельефа конформальных и дифракционных элементов на каждом технологическом этапе полутоновой растровой фотолитографии. Показано, что использование тестовых решёток синусоидальной формы позволяет получать полные характеристические кривые во всём исследуемом диапазоне формирования микрорельефа.

*Ключевые слова:* Конформальные оптические элементы, Дифракционные оптические элементы, Растровая полутоновая фотолитография, Оптический контроль, Синусоидальная решётка.

*Цитирование:* Белоусов, Д. А. Профилометрическая и дифрактометрическая характеристика синусоидальных тестовых решеток при производстве конформальных и дифракционных оптических элементов / Д. А. Белоусов, В. П. Корольков, Р. К. Насыров // HOLOEXPO 2018 : XV международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — С. 215–220.

#### Введение

Основной функцией элементов конформальной и дифракционной оптики является преобразование падающего волнового фронта в волновой фронт с заданными параметрами. Благодаря широким функциональным возможностям, данные элементы находят применения в различных областях промышленности, в частности конформальные оптические элементы используются в качестве корректоров aberrаций активных элементов мощных твердотельных лазеров [1, 2], а элементы дифракционной оптики активно используются в оптических системах [3–5], лазерной обработке материалов [6], измерительной технике [7, 8], биомедицине [9] и т. д. Одним из методов формирования многоуровневого рельефа таких элементов является использование растровой полутоновой технологии [10], которая представляет собой многоэтапный процесс, включающий в себя: изготовление растрового полутонового фотошаблона; экспонирование с его помощью слоя фоторезиста, нанесённого на материал подложки; проявление фоторезиста; перенос рельефа сформированного в плёнке фоторезиста в материал подложки реактивным ионным травлением. Каждый из перечисленных этапов является критическим, т. е. ошибки, возникшие на одном из этапов не могут быть исправлены в дальнейшем, одной из актуальных задач является разработка методов как промежуточного контроля, осуществляемого во время производственного процесса и обеспечивающего обратную связь (например, для коррекции параметров экспонирования фоторезиста или выявления ошибок расчёта и изготовления растрового полутонового фотошаблона и рекомендаций по их устранению), так и контроля готовой продукции.

Разработка универсальных методов производственного контроля осложняется тем, что элементы конформальной и дифракционной оптики либо индивидуально рассчитываются под решение конкретной за-

дачи, либо представляют собой элементы мелкосерийного производства, что в свою очередь приводит к значительной вариации основных параметров формируемого микрорельефа, таких как глубина и пространственная частота. Кроме того рельеф по всей площади формируемого элемента различен, что значительно усложняет контроль как на стадии изготовления растрового полутонового фотошаблона так и при формировании рельефа в плёнке фоторезиста. При этом, измерение параметров рельефа на промежуточной стадии технологического процесса, при его формировании в слое фоторезиста, с применением интерферометров когерентного света типа Физо [11] (которые позволяют контролировать профиль по всей площади и могут быть использованы для итогового измерения параметров изготовленного элемента [1, 2]), не возможно, в связи с тем, что прозрачная плёнка фоторезиста имеет иной показатель преломления по сравнению с кварцевой подложкой, что приводит к деструктивной интерференции в слое резиста. Интерферометры белого света менее подвержены влиянию деструктивной интерференции за счёт достаточно малой длины когерентности, однако их применение ограничено контролем структур в поле относительно малого размера. В частности, используемый в нашей работе WLI-интерферометр фирмы VMT GmbH позволяет производить измерения в поле шириной 1,4 мм [12].

#### Использование тестовых решёток для контроля параметров сформированного рельефа

Для осуществления контроля рельефа, сформированного в плёнке фоторезиста при изготовлении конформальных корректоров с помощью WLI-интерферометра, авторами опубликованных ранее работ [1, 2], было предложено использовать тестовую линейную решётку (ТЛР) с кусочно-непрерывным рельефом, расположенную вокруг (вне рабочего поля) изготавливаемого элемента. Глубина ТЛР при этом равна

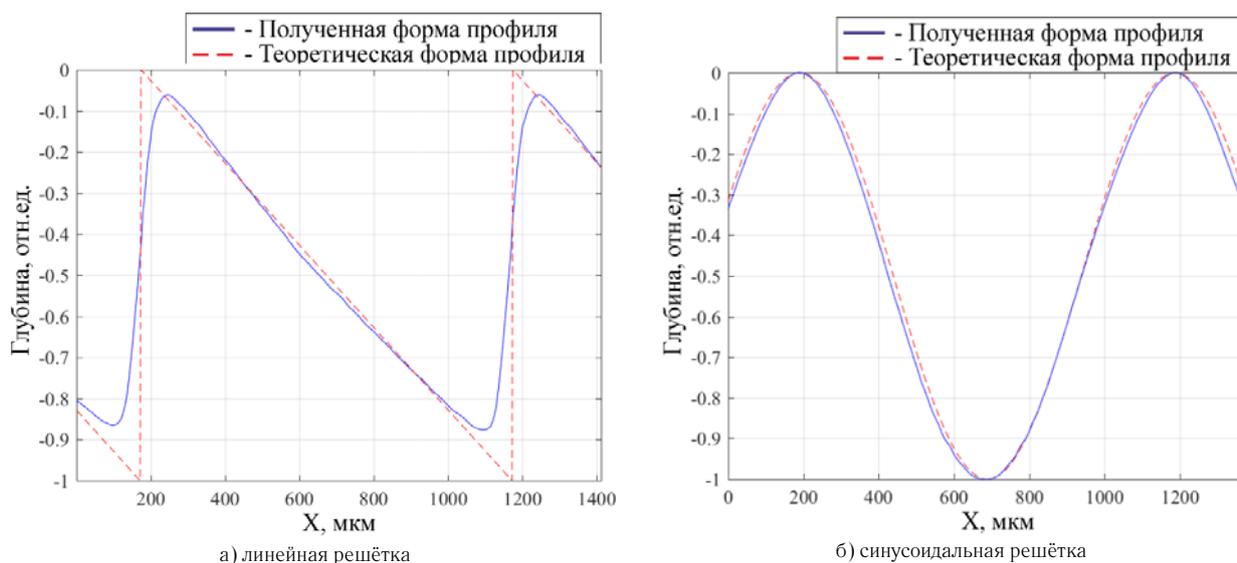


Рис. 1. Сравнение теоретической формы профиля с формой рельефа сформированного в плёнке фоторезиста

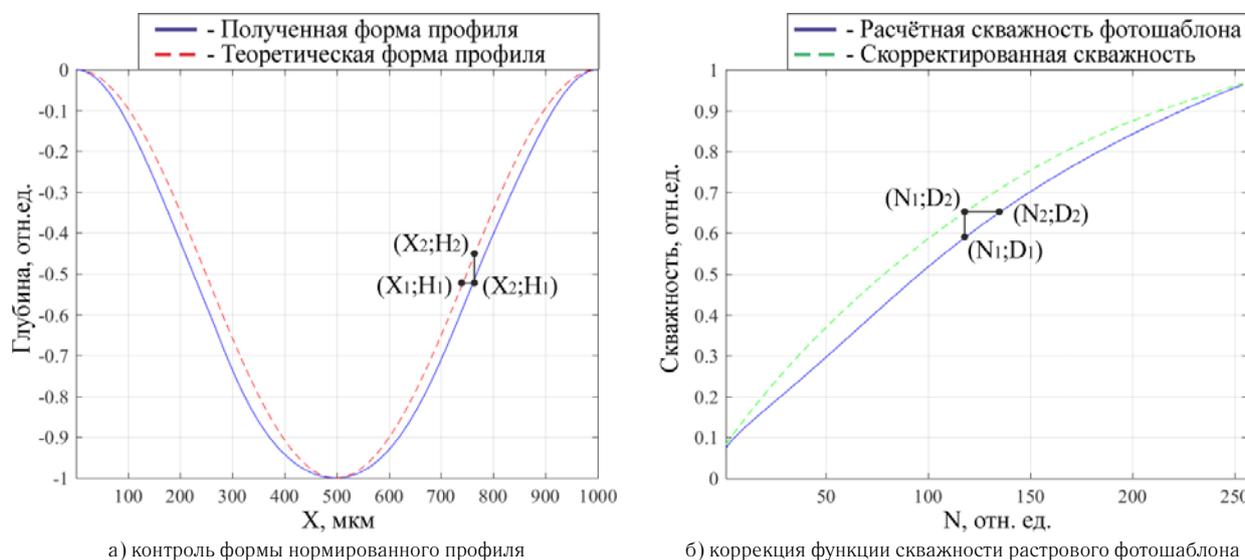
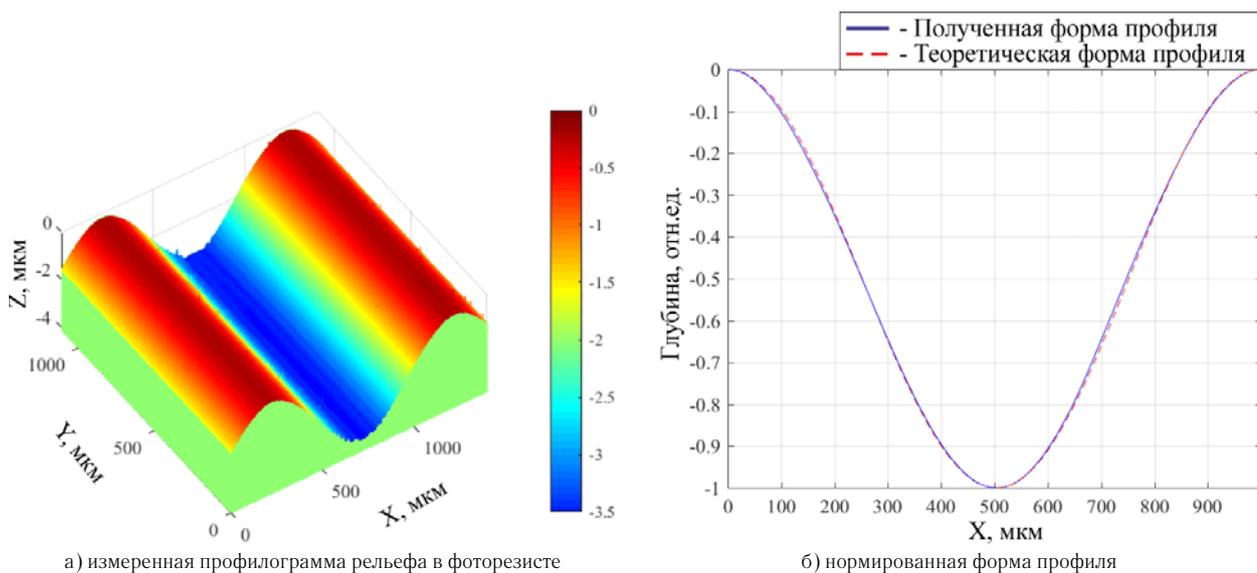


Рис. 2. Коррекция функции скважности полутонового растрового фотошаблона по данным контроля формы профиля тестовой синусоидальной решётки, сформированной в плёнке фоторезиста

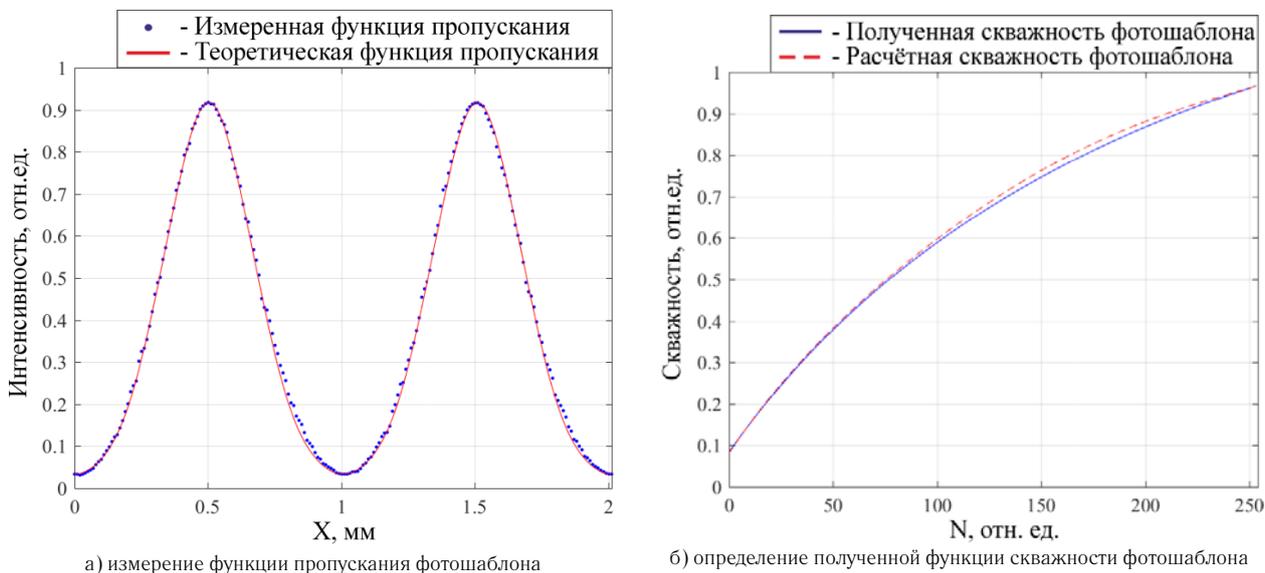
максимально формируемой глубине рельефа изготавливаемого элемента. Период ТЛР выбирается из следующих соображений: 1) возможность регистрации сформированного рельефа на WLI-интерферометре; 2) в формировании рельефа должно участвовать достаточное количество ячеек растрового фотошаблона, для обеспечения обратной связи по коррекции функции его пропускания. С учётом того, что используемый нами WLI-интерферометр позволяет регистрировать рельеф в поле шириной 1,4 мкм, а размер ячейки растрового полутонового фотошаблона составлял 22 мкм, в своей работе мы использовали ТЛР с периодом 1000 мкм. Анализ глубины и формы ТЛР [13] позволяет оценить правильность расчёта и качество изготовления растрового фотошаблона (в случае неудовлетворительных результатов, дать рекомендации для записи нового фотошаблона), а также подбирать параметры экспонирования фоторезиста.

Однако, как показано на рис. 1а, в связи с тем, что при формировании рельефа с помощью полутоновой растровой технологии в процессе экспонирования фотошаблона расположен на значительном расстоянии от плёнки фоторезиста (для устранения переноса структуры растриванного фотошаблона), сформированный профиль имеет широкий обратный скат. Это приводит к тому, что значительная область, размер которой может достигать порядка 10–15 % от периода ТЛР, не может быть проконтролирована данным методом, а следовательно, в указанных областях отсутствует возможность корректного определения характеристической кривой, необходимой для расчета функции пропускания растрового фотошаблона.

Для решения этой проблемы в качестве тестовой предлагается использовать решётку, имеющую синусоидальный профиль. Как показано на рис. 1б, синусоидальный рельеф, сформированный в плёнке фоторезиста (в своей работе мы использовали резист



а) измеренная профилограмма рельефа в фоторезисте  
 б) нормированная форма профиля  
 Рис. 3. Контроль формы профиля тестовой синусоидальной решётки сформированной в плёнке фоторезиста полученной с использованием растрового фотошаблона записанного с учётом коррекции функции скважности



а) измерение функции пропускания фотошаблона  
 б) определение полученной функции скважности фотошаблона  
 Рис. 4. Контроль растрового фотошаблона по анализу области тестовой синусоидальной решётки

ФП-3535 производства компании ФРАСТ-М) методом полутоновой растровой технологии, сопоставим с теоретической формой синусоидальной решётки во всех областях, что позволяет получать полные характеристические кривые, для подбора параметров экспонирования фоторезиста, измерения отклонения полученной формы профиля и коррекции функции пропускания растрового фотошаблона. Растровый полутоновой фотошаблон представляет собой набор ячеек одинакового размера, но с различным заполнением (скважностью), регулируя, таким образом, в каждой своей точке функцию пропускания в процессе экспонирования фоторезиста. На рис. 2а и 2б показан процесс коррекции функции скважности для записи нового растрового фотошаблона по сопоставлению формы тестовой синусоидальной решётки, сформированной в плёнке фоторезиста и теоретической синусоидальной функцией. Процесс коррекции можно описать следующим образом. В

точке  $X_1$ , в которой необходимо получить глубину профиля равную  $H_1$ , была использована ячейка растрового фотошаблона со скважностью  $D_1$ , однако необходимая для данной координаты глубина рельефа была получена в точке  $X_2$ , в которой использовалась ячейка растрового фотошаблона со скважностью  $D_2$ . Следовательно, в скорректированной функции скважности в ячейке  $N_1$  необходимо использовать значение скважности равное  $D_2$ . И так для каждой точки сформированного профиля тестовой синусоидальной решётки.

На рис. 3а и 3б показан сформированный профиль тестовой синусоидальной решётки в плёнке фоторезиста измеренный на WLI-интерферометре и сопоставление его формы с теоретической синусоидальной функцией, при использовании растрового фотошаблона, записанного с учётом коррекции функцией

Табл. 1. Ошибка определения параметров синусоидальной решётки по анализу ДЭ

Измеряемые дифракционные порядки	Ошибка определения $h$					Ошибка определения $ a $		
	Длина волны источника $\lambda_1 = 635$ нм	Длина волны источника $\lambda_1 = 635$ нм $\lambda_2 = 532$ нм	Длина волны источника $\lambda_1 = 635$ нм $\lambda_2 = 405$ нм	Длина волны источника $\lambda_1 = 635$ нм $\lambda_2 = 532$ нм $\lambda_3 = 405$ нм	Длина волны источника $\lambda_1 = 635$ нм	Длина волны источника $\lambda_1 = 635$ нм $\lambda_2 = 532$ нм	Длина волны источника $\lambda_1 = 635$ нм $\lambda_2 = 532$ нм	Длина волны источника $\lambda_1 = 635$ нм $\lambda_2 = 532$ нм $\lambda_3 = 405$ нм
0 и 1	$\pm 0,26 h_{sg}$	$\pm 0,25 h_{sg}$	$\pm 0,03 h_{sg}$	$\pm 0,02 h_{sg}$	$\pm 29$ %	$\pm 21$ %	$\pm 8$ %	$\pm 8$ %
0, 1 и 2	$\pm 0,03 h_{sg}$	$\pm 0,01 h_{sg}$	$\pm 0,02 h_{sg}$	$\pm 0,01 h_{sg}$	$\pm 20$ %	$\pm 15$ %	$\pm 8$ %	$\pm 8$ %
0, 1, 2 и 3	$\pm 0,03 h_{sg}$	$\pm 0,01 h_{sg}$	$\pm 0,02 h_{sg}$	$\pm 0,01 h_{sg}$	$\pm 8$ %	$\pm 6$ %	$\pm 6$ %	$\pm 6$ %
0, 1, 2, 3 и 4	$\pm 0,03 h_{sg}$	$\pm 0,01 h_{sg}$	$\pm 0,02 h_{sg}$	$\pm 0,01 h_{sg}$	$\pm 8$ %	$\pm 5$ %	$\pm 5$ %	$\pm 5$ %
0, 1, 2, 3, 4 и 5	$\pm 0,02 h_{sg}$	$\pm 0,01 h_{sg}$	$\pm 0,02 h_{sg}$	$\pm 0,01 h_{sg}$	$\pm 8$ %	$\pm 5$ %	$\pm 4,5$ %	$\pm 4,5$ %

скважности (рис. 2б). В то время, как при использовании не скорректированного фотошаблона отклонение формы тестовой синусоидальной решётки для различных параметров экспонирования фоторезиста позволяющих получить глубину рельефа в диапазоне от 3,1 мкм до 3,5 мкм достигало порядка 6,9–8,5 %, использование скорректированного фотошаблона позволило значительно уменьшить отклонение получаемой формы рельефа которое составило 0,9–2,6 %, для тех же параметров экспонирования.

#### Контроль функции пропускания растрового фотошаблона

Помимо контроля формы профиля, сформированного в плёнке фоторезиста, использование тестовой синусоидальной решётки позволяет осуществлять производственный контроль на стадии записи растрового фотошаблона. Благодаря тому, что функция пропускания фотошаблона, в области, предназначенной для формирования тестовой синусоидальной решётки, меняется плавно, её сканирование пробным лазерным пучком и измерение интенсивности прошедшего излучения (рис. 4а) позволяет получить полную характеристическую кривую полученной функции пропускания и сравнить её с расчётной (рис. 4б).

При использовании ТЛР, данный метод контроля растрового фотошаблона не позволяет получать полную характеристическую кривую функции пропускания. В отличие от синусоидальной тестовой решётки, функция пропускания фотошаблона, в области экстремумов ТЛР меняется скачкообразно. Пробный пучок, с помощью которого осуществляется сканирование при измерении интенсивности прошедшего излучения, имеет размер порядка 5 ячеек фотошаблона. Следовательно, в процессе сканирования, при исследовании области экстремумов тестовой структуры измеренная функция пропускания меняется плавно от минимума к максимуму (или наоборот), образуя подобие обратного ската, что не позволяет осуществлять контроль в этих областях описанным методом.

#### Дифракционный контроль тестовых синусоидальных решёток

Синусоидальная тестовая решётка имеет ещё одно важное преимущество над ТЛР. Период тестовой решётки не должен превышать минимальный период

формируемого элемента. В случае изготовления конформальных элементов, имеющих достаточно низкую частоту пространственного рельефа, этот факт не несёт особых ограничений, однако при изготовлении многоуровневых дифракционных оптических элементов (МДОЭ), период структуры может быть достаточно мал для измерения профилометрическими методами. При производстве МДОЭ, контроль дифракционной эффективности (ДЭ) изготовленного элемента на прямую, осложняется тем, что измерения необходимо производить в соответствии с расчётно оптической схемой, которая, как правило, не предоставляется заказчиком и на расчётной длине волны, доступ к которой у изготовителя МДОЭ может быть затруднён (например, при изготовлении МДОЭ рассчитанных для работы в ДУФ-диапазоне). В связи с этим для контроля качества изготовленного элемента можно применить дифракционный метод, основанный на измерении ДЭ ряда дифракционных порядков тестовой структуры и определения по полученным данным параметров сформированного микрорельефа. ДЭ зависит от всех параметров профиля решётки, что с одной стороны является плюсом, так как позволяет осуществлять контроль сформированного рельефа, а с другой стороны минусом, так как сложно дифференцировать, какой именно параметр сформированного профиля не соответствует расчётным значениям. В отличие от рельефа ТЛР, описать который можно минимум четырьмя параметрами, такими как период, глубина, скважность, ширина обратного ската, форму синусоидальной тестовой решётки можно описать тремя параметрами:

$$g(x) = \frac{h}{2} \times \left( 1 + \cos \left( \frac{2\pi}{d} x + a \times \sin \left( \frac{2\pi}{d} x \right) \right) \right), \quad (1)$$

где  $h$  — глубина,  $d$  — период,  $a$  — параметр нелинейности (отклонения формы профиля от синусоиды, который может принимать значения от  $-1$  до  $+1$ ) [14]. Амплитуду дифрагированного поля, для  $m$ -го порядка дифракции, в отражённом от синусоидальной решётки свете в скалярном приближении можно записать как

$$U_m = \frac{1}{d} \int_0^d \exp \left\{ -i \times \left( \frac{2\pi m}{d} x - \frac{4\pi}{\lambda} \times g(x) \right) \right\} dx, \quad (2)$$

где  $\lambda$  — длина волны падающего излучения. ДЭ, в таком случае, может быть выражена, как квадрат модуля амплитуды поля.

Период дифракционной решётки может быть с высокой точностью измерен по анализу пространственного распределения дифракционных порядков [15], а в случае контроля тестовой решётки и вовсе может быть с высокой точностью известен без дополнительных измерений. Соответственно остаётся всего два неизвестных параметра влияющих на ДЭ (глубина, и параметр нелинейности). Для того, чтобы иметь возможность однозначно определить параметры микрорельефа, необходимо производить измерение ДЭ нескольких дифракционных порядков, либо использовать при измерении различные длины волн. В табл. 1 показаны результаты моделирования по определению параметров отражающей тестовой синусоидальной решётки с периодом 10 мкм и диапазоном изменения глубины рельефа от  $0,2 h_{sg}$  до  $h_{sg}$  (где  $h_{sg} = 635$  нм) при использовании различных комбинаций длин волн (от одной до трёх длин волн) и при различном количестве измеряемых дифракционных порядков. Погрешность измерения интенсивности при моделировании составляла 5 % (3–5 % — погрешность измерения интенсивности коммерчески доступных измерителей мощности [16]), а минимально измеряемая ДЭ 0,01 %. Из полученных данных видно, что для повышения точности измерения нужно увеличивать либо количество измеряемых дифракционных порядков, либо количество длин волн на которых производится измерение. При этом необходимо учитывать, что измерение ДЭ в реальных условиях может иметь большую погрешность, вызванную различными факторами, такими как ошибка угла падения пробного пучка, флуктуации источника излучения и т. д. Недостатком такого подхода является то, что данный метод позволяет определить только модуль величины параметра нелинейности решётки, т. е. можно определить, на сколько полученный рельеф отклонён от синусоидальной формы, но при этом не известно, выпуклый он или вогнутый. Таким образом, полученные данные ДЭ позволяют достаточно точно определить глубину синусоидальной решётки, но не позволяют в полной мере обеспечить обратную связь для

коррекции формы профиля. Однако, данный метод может быть использован для контроля качества сформированного рельефа.

### Заключение

Результаты проведённого исследования показывают, что использование тестовых решёток синусоидальной формы в технологическом процессе формирования микрорельефа методом растровой полутонковой фотолитографии, позволяет получать полные характеристические кривые на всех производственных этапах, начиная от функции пропускания растрового фотошаблона, заканчивая контролем глубины и формы рельефа сформированного как в плёнке фоторезиста, так и в материале кварцевой подложки. В случае формирования рельефа, период которого не может быть измерен профилометрическими методами, формирование тестовой синусоидальной решётки позволяет использовать дифракционный метод контроля многоуровневых элементов. Дифракционный метод даёт возможность оценить такие параметры, как глубина сформированного рельефа и его отклонение от заданной синусоидальной формы, но полученные данные не могут предоставить однозначную информацию для коррекции функции пропускания фотошаблона.

Показано, что полученные профилометрические данные могут быть использованы для подбора параметров экспонирования фоторезиста и дают возможность скорректировать функцию пропускания для записи растрового фотошаблона, позволяющего минимизировать отклонения получаемой формы профиля на этапе его формирования в плёнке фоторезиста. В рамках данной работы с помощью контроля формы рельефа, сформированного в слое фоторезиста, удалось рассчитать параметры функции пропускания растрового фотошаблона, использование которого позволило уменьшить максимальное отклонение формы получаемого профиля до 2,6 %.

Исследование выполнено за счет средств субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания (№ гос.регистрации АААА-А17-117052210002-7) в Институте автоматики и электрометрии СО РАН.

### Список источников

- [1] **Корольков, В. П.** Конформальные оптические элементы для коррекции искажений волнового фронта в активных элементах YAG: Nd<sup>3+</sup> / В. П. Корольков, Р. К. Насыров, А. Г. Полещук, Ю. Д. Арапов, А. Ф. Иванов // Квантовая электроника. — 2013. — Том 43. — № 2. — С. 117–121.
- [2] **Korolkov, V. P.** Freeform corrector for laser with large aperture YAG:Nd<sup>3+</sup> active element / V. P. Korolkov, R. K. Nasyrov, A. G. Poleshchuk, Y. D. Arapov, A. F. Ivanov // Optical Engineering. — 2014. — Vol. 53. — № 7. — 075105.
- [3] **Слюсарев, Г. Г.** Оптические системы с фазовыми слоями / Г. Г. Слюсарев // ДАН СССР. — 1957. — Том 113. — № 4. — С. 780–782.
- [4] **Денисюк, Ю. Н.** Голографическая коррекция деформационных аберраций главного зеркала телескопа / Ю. Н. Денисюк, С. И. Соскин // Оптика и спектроскопия. — 1971. — Том 31. — № 6. — С. 992–999.
- [5] **Тудоровский, А. И.** Объектив с фазовой пластинкой / А. И. Тудоровский // Оптика и спектроскопия. — 1959. — Том 6. — № 2. — С. 198–210.
- [6] **Сисакян, И. Н.** Технологические возможности применения фокусаторов при лазерной обработке материалов / И. Н. Сисакян, В. П. Шорин, В. А. Сойфер, В. И. Мордасов, В. В. Попов // Компьютерная оптика. — 1988. — Том 3. — С. 94–97.

- [7] **Лукин, А. В.** Голографические методы контроля асферических поверхностей / А. В. Лукин, К. С. Мустафин // Опτικο-механическая промышленность. — 1979. — № 4. — С. 53–59.
- [8] **Коронкевич, В. П.** Лазерные интерферометрические и дифракционные системы / В. П. Коронкевич, А. Г. Полещук, А. Г. Седухин, Г. А. Ленкова // Компьютерная Оптика. — 2010. — Том 34. — № 1. — С. 4–23.
- [9] **Коронкевич, В. П.** Бифокальная дифракционно-рефракционная интраокулярная линза / В. П. Коронкевич, Г. А. Ленкова, И. А. Исакаев, А. И. Малышев, В. А. Попков, Ю. И. Юрлов // Автометрия. — 1997. — № 6. — С. 26–41.
- [10] **Полещук, А. Г.** Изготовление высокоэффективных элементов дифракционной оптики с помощью полутоновой и фоторастровой технологий / А. Г. Полещук // Автометрия. — 1991. — № 6. — С. 54–61.
- [11] Intellium Z100 / URL: <https://sigatec.fr/download/intelliumZ100%20Sigatec.pdf>.
- [12] Site under maintenance | Breitmeier Messtechnik GmbH / URL: <http://breitmeier.de/en/optical-profilometry/wli-lab>.
- [13] **Корольков, В. П.** Характеризация профилограмм кусочно-непрерывного дифракционного микрорельефа / В. П. Корольков, С. В. Остапенко // Оптический журнал. — 2009. — Том 76. — № 7. — С. 34–41.
- [14] **Aubrecht, I.** Profile of relief phase gratings used for uniform multiple beams splitting / I. Aubrecht, M. Miler // Optics Letters. — 1993. — Vol 18. — № 16. — P. 1287–1289.
- [15] **Белоусов, Д. А.** Устройство для регистрации дифракционной картины синтезированных голограмм в широком угловом диапазоне / Д. А. Белоусов, А. Г. Полещук, В. Н. Хомутов // Автометрия. — 2018. — Том 54. — № 2. — С. 35–42.
- [16] Thorlabs Inc. / URL: <https://www.thorlabs.de/drawings/3fc90b9cba1c66f-D89C6807-FBF0-484F-7FADDD6B57AA945/S120C-SpecSheet.pdf>.

## Profilometric and diffractometric characterization of sinusoidal test gratings in the production of conformal and diffractive optical elements

*D. A. Belousov, V. P. Korolkov, R. K. Nasyrov*

Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

The results of the investigation of the application of sinusoidal grating test patterns for profilometric and diffractometric production inspection of the formation of a multilevel microrelief of conformal and diffractive optical elements at each technological stage of halftone photolithography are presented. It is shown the use of the test gratings with sinusoidal profile makes possible to measure-total characteristic curves in the whole depth range.

*Keywords:* Conformal elements, Diffractive optical elements, Halftone photolithography, Optical inspection, Sinusoidal grating test patterns.