

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛЬЕФА ПЛЁНОЧНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВТ. П. Каминская¹, В. В. Попов¹, А. М. Салецкий¹¹ *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия***Аннотация**

Методом сканирующей зондовой микроскопии исследованы параметры рельефа плёночных отражающих дифракционных оптических элементов, изготовленных по разным технологиям: традиционной лазерной записи радужных голограмм и технологиям «Dot matrix», «Kinetax» и электронно-лучевой литографии. Проведена оценка влияния технологии на параметры рельефа ДОО. Измерения показали, что в большинстве технологий высота рельефа может отличаться от оптимальной более чем на 100%, и удовлетворительный визуальный эффект достигается только благодаря тому, что присутствуют решетки с разными высотой и профилем и результат усредняется. Прямые измерения рельефа выявляют причину низкой дифракционной эффективности и тем самым показывают путь к ее увеличению.

Ключевые слова: дифракционные оптические элементы, атомно-силовая микроскопия, дифракционная эффективность, параметры рельефа.

Цитирование: Каминская, Т.П. Исследование рельефа плёночных дифракционных оптических элементов / Т.П. Каминская, В.В. Попов, А.М. Салецкий // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 2. – С. 215-224. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-215-224.

Введение

Дифракционные оптические элементы (ДОО), несмотря на то, что принципы их работы основаны на идеях, предложенных Френелем и другими учеными-оптиками еще в начале 19 века, до недавнего времени не имели широкого применения. Лишь в конце 20 века, благодаря усовершенствованиям в технологии их изготовления, а также развитию лазерной техники, появилась возможность их массового использования в различных областях. В настоящее время наиболее массовым применением ДОО является использование их в качестве средства идентификации подлинности товаров массового спроса. Речь идет о пленочных отражающих ДОО в виде самоклеящихся этикеток, часто называемых голографическими наклейками, хотя, как правило, традиционные голографические методы при их изготовлении не используются.

Популярность их использования основана, с одной стороны, на дешевизне при больших тиражах, а с другой стороны, на трудности воспроизведения, что делает их эффективным средством борьбы с контрафактным производством продукции.

Визуальные эффекты пленочных ДОО обусловлены дифракцией на поверхности рельефных периодических структур, формируемых исходно с помощью голографических или других технологий. Начиная с изготовления первых голографических решеток и до последнего времени основной характеристикой и главным измеряемым параметром ДОО была дифракционная эффективность (ДЭ). Современные методы позволяют не только измерять эффективность многих порядков дифракции [1, 2], но и на основе этих результатов рассчитывать параметры профиля решеток [3, 4].

Тем не менее, все эти методы основаны на получении усреднённой информации по относительно большой площади оптического элемента, что не позволяет выявить причины не соответствующей расчётам ДЭ.

В данной работе сделана попытка прямого измерения методами сканирующей зондовой микроскопии рельефа пленочных ДОО, изготовленных различными

способами и различными производителями, с целью выявления особенностей формирования рельефа и возможностей улучшения их параметров.

1. Основные параметры ДОО и их измерение

Идентификационные ДОО могут создавать различные оптические эффекты: от динамических движущихся фигур («кинеграммы») до имитации голограмм трехмерных объектов или естественных цветов изображения. Несмотря на это, все они, по сути, являются структурами, состоящими из отдельных пикселей с характерными размерами от 5 до 100 мкм, внутри которых расположены фазовые (чаще всего рельефные) дифракционные решетки с различными ориентациями штрихов и периодами. Способы создания таких дифракционных структур различны, и в зависимости от этого различными могут быть их оптические свойства, главным из которых является дифракционная эффективность.

ДЭ является одним из основных показателей качества ДОО, но простое измерение ДЭ не имеет большого смысла по нескольким причинам.

1. Трудность измерения ДЭ в первом порядке, связанная с тем, что в ДОО обычно имеется широкий диапазон азимутальных углов дифракции и периодов.
2. ДЭ – интегральная характеристика достаточно большой освещаемой площади исследуемого ДОО, в то время как в нем имеются области из разных структур размером 5–50 мкм, каждая из которых может иметь разную ДЭ.
3. Наконец, самое главное – измерение ДЭ не дает понимания причин ее ухудшения, поскольку она зависит от многих параметров: глубины и формы профиля рельефа, причем эта зависимость не монотонная.

Поэтому для понимания того, почему в каждом конкретном случае ДЭ не оптимальна, необходимо, прежде всего, знать параметры рельефа дифракционных структур, формирующих оптический элемент.

Зависимость ДЭ от формы рельефа подробно изложена в литературе [5, 6].

Для примера рассмотрим фазовую дифракционную решетку с прямоугольным профилем штриха типа меандра. Оптимальной можно считать такую высоту рельефа, когда в нулевой ($0^{\text{й}}$) порядок идет минимум энергии. Это происходит тогда, когда набег фазы $\Delta\phi$ между верхней и нижней частью штриха составляет π . Для отражательной решетки соответствующая высота рельефа составляет $\lambda/4$, а если отражающий слой находится в среде с показателем преломления « n », как это обычно бывает в случае пленочных ДОО, то $\lambda/4n$, т.е. примерно $\lambda/6$, если считать, что для большинства термопластиков, используемых при производстве ДОО, $n \approx 1,5$.

В этом случае отражение в $0^{\text{й}}$ порядке будет равно 0, а вся энергия будет дифрагировать в $1^{\text{й}}$, $2^{\text{й}}$ и другие порядки, причем как уменьшение, так и увеличение высоты рельефа будут приводить к уменьшению ДЭ (рис. 1а).

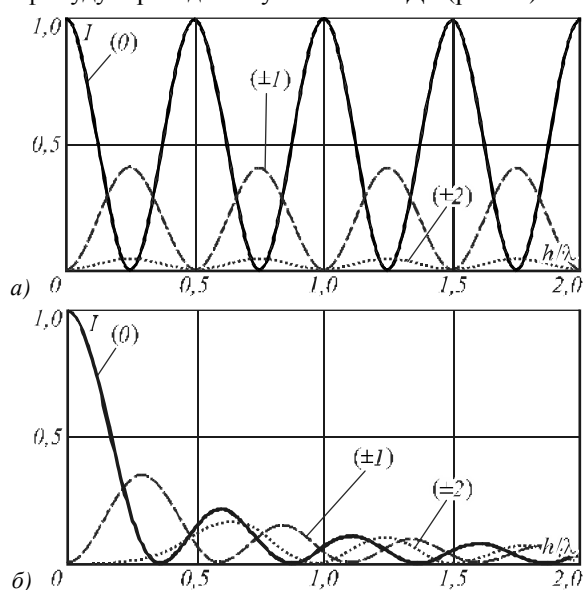


Рис. 1. Распределение интенсивности (I) в $0, \pm 1$ и ± 2 порядках дифракции в зависимости от отношения высоты рельефа (h) к длине волны (λ) для рельефных фазовых решеток с прямоугольным (а) и синусоидальным (б) профилями штриха

При синусоидальном профиле рельефа соотношение несколько изменяется, но характер поведения ДЭ в зависимости от высоты рельефа останется прежним (рис. 1б).

Таким образом, высота и форма профиля дифракционных решеток в ДОО являются критическими параметрами, и их контроль приобретает решающее значение для обеспечения максимальной дифракционной эффективности ДОО.

Техника измерения рельефа дифракционных решеток развивалась параллельно с технологией их изготовления, начиная с самых простых механических профилометров, более сложных и точных оптических микроинтерферометров и кончая весьма сложными компьютеризированными комплексами на основе дифрактометрии и Мюллер-поляриметрии [7]. Однако наиболее удобным и качественным методом измерения формы рельефа ДОО является сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ), позволяющая с высокой

точностью измерять рельеф структур с периодами и высотой порядка 1 мкм.

Начиная с 1995 г. [8] было опубликовано немало работ по измерению параметров дифракционных структур и голографических решеток методом СЗМ [9–16]. Однако по большей части измерения проводились на структурах, созданных в конкретной исследовательской лаборатории и относились к разным группам ДОО. Исследуемые структуры не предназначались для изготовления пленочных ДОО, поэтому высоты измеренных рельефов в каждом случае были существенно различны и не находились в диапазоне 70–110 нм ($\lambda/6$), оптимальном для пленочных ДОО. В [15] исследовались параметры рельефа записанных лазером дифракционных решеток, их никелевых копий и реплик на полиметилметакрилате, а также влияние высоты рельефа на дифракционную эффективность. Однако ни в одной из приведенных работ не измерялся рельеф конечного продукта, имеющего широкое коммерческое применение, – пленочных ДОО, изготовленных методом тиснения на металлизированных рулонных материалах.

Поэтому целью данной работы было исследование параметров рельефа именно пленочных отражающих ДОО, изготовленных разными производителями и отличающихся только разными технологиями формирования первичного рельефа, но имеющими идентичную конструкцию, и оценка влияния технологии на качество рельефа и, соответственно, дифракционную эффективность.

Рассматриваемые пленочные ДОО, как правило, имеют строение, показанное на рис. 2.

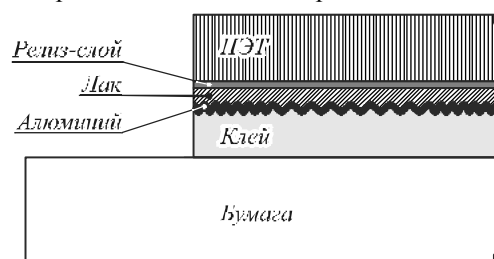


Рис. 2. Структура пленочного ДОО, выполненного в виде самоклеящейся этикетки

Функцию конструкционного элемента несет пленка из полиэтилентерефталата (ПЭТ) толщиной от 7 до 50 мкм. На ней находится тонкий (примерно 1 мкм) слой термопластичного материала (лака), на котором собственно и формируется рельеф. Иногда для легкого отделения рельефа от основы на нее наносится очень тонкий восковой релиз-слой. Для придания отражающих свойств рельефу он покрывается слоем алюминия, толщиной 50–100 нм. Алюминий наносится методом вакуумного напыления либо после тиснения рельефа по чистому термопластику (*soft embossing*), либо тиснение идет прямо по слою алюминия на термопластике (*hard embossing*). Тиснение производится никелевой матрицей, которая, в свою очередь, получается методом гальванопластики после нескольких процессов репликации и мультипликации

рельефа одиночного изображения, сформированного в слое резиста [17].

Полученный после тиснения рельеф отличается от исходного рельефа в резисте, поскольку под действием технологических факторов происходит его деградация, начиная с процесса переноса рельефа на пластик для получения групповой матрицы [15] и кончая тиснением на плёночном носителе, что сказывается на дифракционной эффективности. Изменение ДЭ может достигать более 50%. Однако и исходный рельеф в резисте также может отличаться от оптимального, причём эти отличия могут быть вызваны как случайными факторами (например, несоблюдением оптимальных режимов экспонирования и обработки резиста), так и закономерными, связанными со способом формирования рельефа.

В данной работе нами рассмотрена связь между способом записи и характером получаемого рельефа для наиболее часто используемых методов получения оригиналов.

В настоящее время для изготовления оригиналов плёночных рельефных ДОО используются следующие основные способы:

- 1) традиционная лазерная запись радужных голограмм [5];
- 2) технология, основанная на интерференции сфокусированных лазерных пучков (Dot matrix) [18, 19];
- 3) проецирование с уменьшением изображения жидкокристаллической матрицы с построенным в ней дифракционным рисунком (Kinemath) [20];
- 4) электронно-лучевая литография [21–24].

Нами были изучены рельефы дифракционных элементов, полученных всеми вышеперечисленными способами. Объектами исследования были плёночные ДОО, произведенные различными отечественными и зарубежными фирмами, используемые в виде самоклеящихся этикеток на различных товарах: CD- и DVD-дисках, фармацевтической продукции и т.д. Клеевой слой удалялся с поверхности рельефа таким образом, чтобы отражающий алюминиевый слой не повреждался. Форма рельефа изучалась на сканирующем зондовом атомно-силовом микроскопе «Смена» производства компании НТ-МДТ (г. Зеленоград). Результаты измерений приведены вместе с кратким описанием технологии изготовления рельефа производителем.

Традиционная технология

Рельеф радужной голограммы формируется путем интерференции опорного и предметного пучков освещающего лазера в слое фоторезиста. В простейшем случае взаимодействия двух пучков с плоским волновым фронтом в результате образуется интерференционная картина в виде параллельных полос с синусоидальным распределением интенсивности, причем контрастность картины максимальна при равенстве интенсивностей пучков. В процессе обработки резиста в проявителе вариации интенсивности превращаются в вариации высоты рельефа резиста, а максимальная глубина рельефа зависит от контрастности, интенсивности излучения и времени обработки. При записи голографи-

ческих дифракционных решеток, используемых в спектроскопии, удастся добиться очень хороших параметров по однородности высоты и профиля структуры на достаточно большой площади оптического элемента. В случае же записи голограммы сложного объекта, когда имеет место интерференция опорного пучка и предметного отраженного от множества различных точек объекта, структура рельефа представляет собой довольно хаотичную картину с фрагментами дифракционных решеток с направлением штрихов, соответствующих углам схождения опорного и предметного пучков. Пример такого рельефа приведен на рис. 3(а, б).

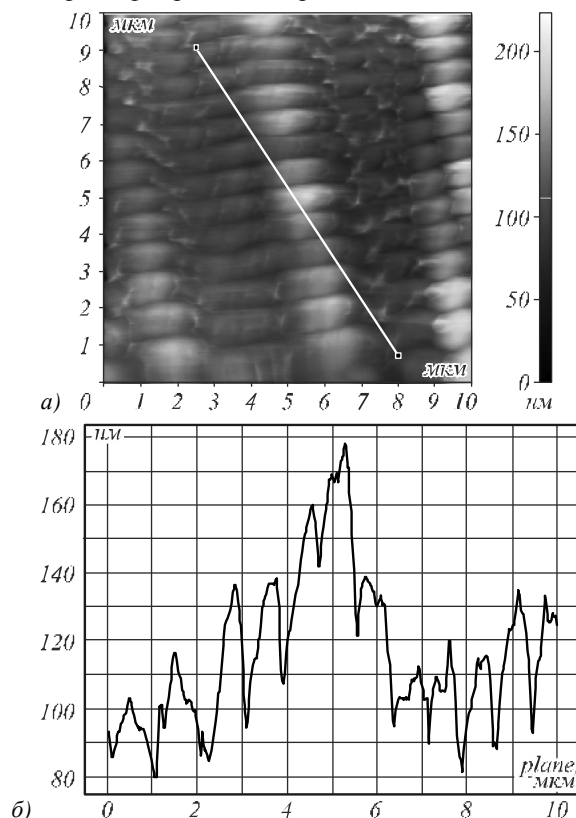


Рис. 3. Структура и рельеф тисненной радужной голограммы, полученные с помощью сканирующего зондового микроскопа: 2D-изображение площадки 10×10 мкм (а), профиль рельефа (б)

На рельефе можно выделить характерные период и направление отдельных дифракционных решеток, но высота штрихов варьируется в широких пределах – от 10 до 50 нм. На некоторых участках рельеф практически отсутствует, а там, где он есть, высота его различна и не соответствует оптимальной.

Этим обусловлена и низкая дифракционная эффективность радужных голограмм.

Технология «Dot matrix»

Она получила широкое распространение при оригинации плёночных голографических элементов по ряду причин. В основе ее лежит интерференция двух сфокусированных пучков лазера в одной точке, пятне (отсюда «dot»). Поскольку интенсивность в сфокусированном пучке очень высокая, то время экспозиции оказывается предельно малым и за это время не проис-

ходит нарушения интерференционной картины из-за механических колебаний. Это сразу снимает требования к виброзащищённости конструкции записывающей системы, что характерно для традиционной лазерной записи голограмм. Оптико-механическая система записывающего устройства позволяет достаточно быстро изменить углы схождения пучков и их угловую ориентацию относительно оптической оси. В результате появляется возможность записывать пиксели размером от 100 до 10 мкм, имеющие внутри структуру рельефной дифракционной решетки с нужным периодом и ориентацией штрихов.

Более того, короткая экспозиция позволяет размещать эти пиксели на пластине с резистом, используя двухкоординатную подвижку, без остановки на время экспозиции. Это существенно увеличивает производительность системы и упрощает конструкцию. Схема прибора «Dot matrix» приведена на рис. 4.

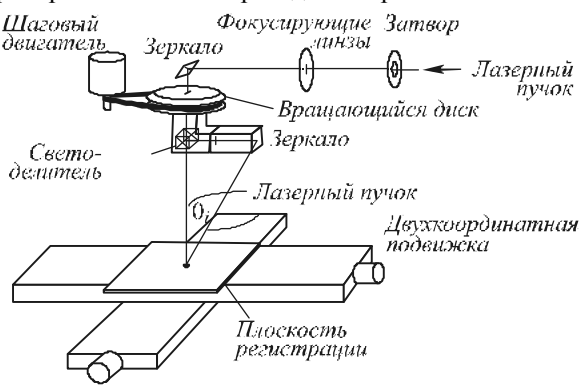


Рис. 4. Схема прибора «Dot matrix»

Заполнение эффективными решетками площади оптического элемента в «Dot matrix» существенно выше, чем в радужной голограмме. Сама же структура рельефа зависит от способа формирования пятна.

Если интерферируют два Гауссова пучка, то понятно, что интенсивность в центре существенно выше, чем на краях. Соответственно, и при проявлении резиста высота рельефа имеет тот же характер, изменяясь от 0 до 140 нм (рис. 5(а, в)). Естественно, рельеф полностью отсутствует в областях как с недостаточной, так и чрезмерной экспозицией. В Гауссовом пятне, в принципе, невозможно получить однородный рельеф, зато независимо от времени и условий проявления всегда найдутся достаточно большие по площади участки с рельефом, близким к оптимальному.

В более продвинутых системах используются пучки с равномерным по сечению профилем интенсивности и форма пучка делается не круглой, а квадратной, для лучшего заполнения поверхности элемента.

Это позволяет достичь большей эффективности при условии получения оптимальной высоты рельефа. Следует отметить, что в конкретных исследованных образцах (рис. 6(а, з)) при достаточно однородной по площади высоте рельефа величины высоты 170 нм (рис. 6(а, б)) и 250 нм (рис. 6(в, з)) сильно отличаются от оптимальной, что безусловно должно сказаться на дифракционной эффективности.

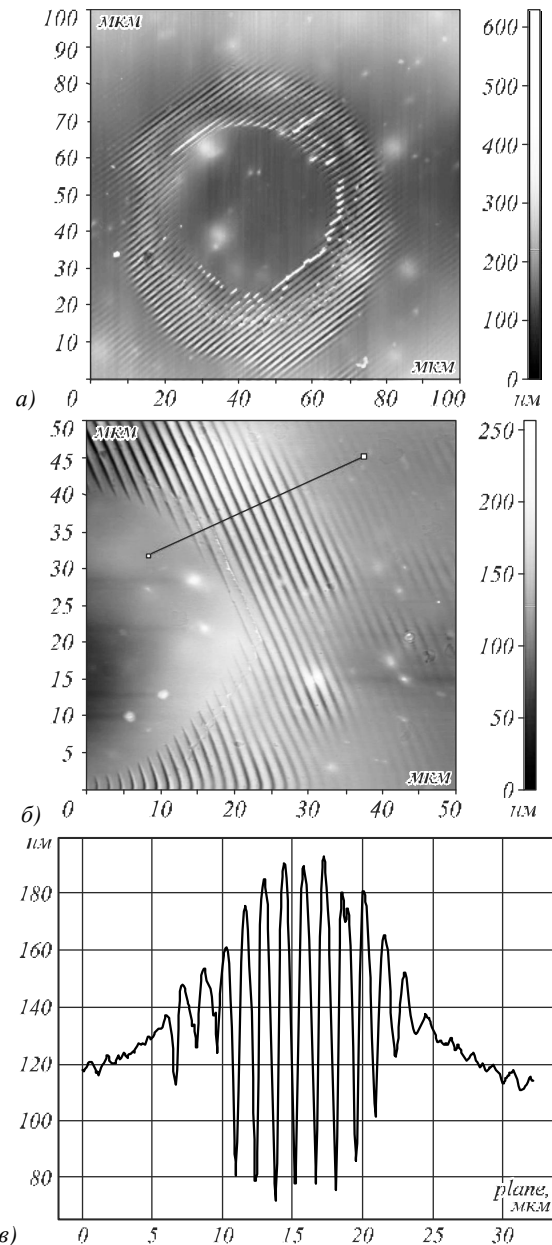


Рис. 5. Полученные в СЗМ двумерные изображения и соответствующий профиль рельефа: а, б) двумерные изображения пикселей, в) профиль рельефа

Технология «Kinetaх»

Это по сути своей цифровая технология. Здесь не используется интерференция лазерных пучков для создания рельефа дифракционных решеток.

Формирование рельефа происходит, как в фотостампах, используемых для производства рабочих фотоматриц в микроэлектронике: фотомаска проецируется с десятикратным уменьшением на пластину с фоторезистом (рис. 7).

После экспозиции пластина перемещается и снова экспонируется, пока одинаковыми изображениями не заполнится вся поверхность. В микроэлектронике промежуточные шаблоны размером до 100×100 мм уменьшают оптически и формируют изображения с размерами элементов до 0,5 мкм.

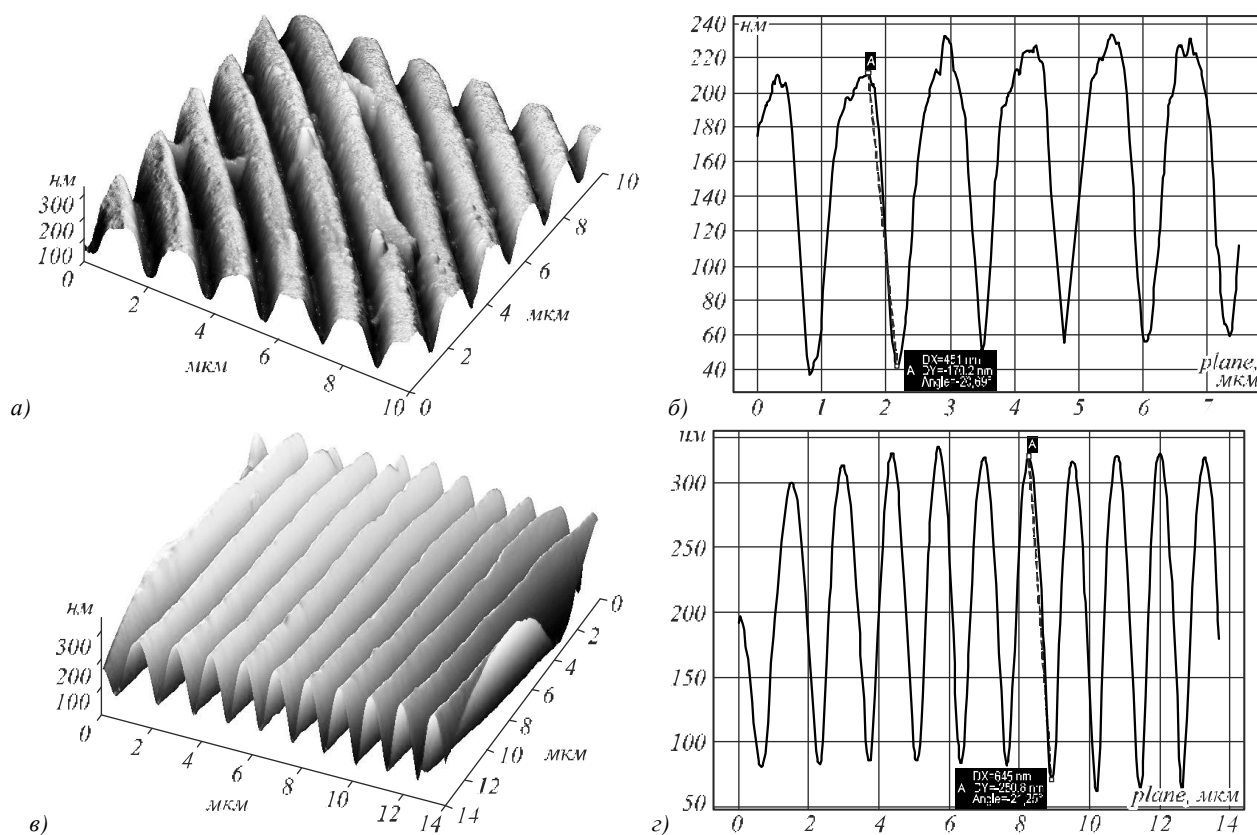


Рис. 6. 3D-изображения и профили рельефа пикселей в пятне с интенсивностью, близкой к равномерной: а, в) 3D-рельеф, б, г) соответствующие профили

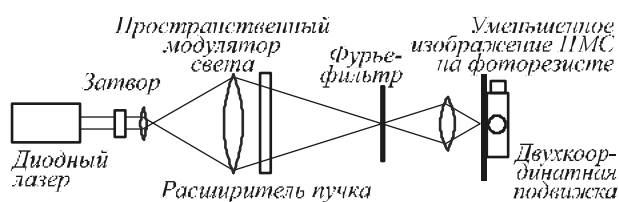


Рис. 7. Принцип формирования рельефа по технологии «Kinetax»

Если вместо фотошаблона использовать матрицу, применяемую в медиапроекторах, то, изменяя с помощью компьютера изображение решеток на ней, можно легко получать на каждом шаге разные конфигурации структуры. Поскольку при этом отсутствуют механические элементы для изменения структуры пикселя, достигается высокое быстродействие системы. Но главное качественное изменение заключается в том, что структура пикселя может быть не только синусоидальной дифракционной решеткой. На матрице можно формировать произвольные структуры, никак не связанные с интерференцией. Это могут быть как микроизображения, микронадписи, используемые, например, для идентификации подлинности элемента, так и специально рассчитанные структуры дифракционных элементов, создающих различные оптические эффекты.

Таким образом, данная цифровая технология обладает гораздо большими возможностями по сравнению с лазерными методами, которые, по сути, являются аналоговыми. С точки зрения формирования рельефа

здесь тоже есть определенные преимущества. Поскольку используются высококачественные и отработанные системы формирования пучка для видеопроекции, удается добиться большой стабильности в дозе экспозиции по всему полю. Кроме того, можно легко регулировать контрастность рисунка для получения оптимальной высоты рельефа. Исследования показали достаточно высокую стабильность геометрии рельефа решеток, полученных в технологии «Kinetax» (рис. 8), полное заполнение площади элемента решетки, хотя в некоторых исследованных образцах наблюдалось наложение полей экспонирования до 10 мкм, что, впрочем, никак не сказывается на качестве визуальных эффектов. Исследованные образцы имели достаточно высокую однородность высоты рельефа при средней высоте (70–80 нм), несколько меньше оптимальной.

Электронно-лучевая литография (ЭЛЛ)

В технологии ЭЛЛ рельеф создается за счет расстворения (или полимеризации) резиста, облученного сфокусированным пучком электронов.

Различаются два способа создания рисунка на резисте: векторное сканирование и экспонирование пятном изменяемого размера (*variable shape beam*).

При векторном сканировании сфокусированный Гауссов пучок минимального постоянного диаметра экспонирует нужные участки топологии, формируя за много проходов необходимый рисунок. Во втором случае рисунок разбивается на элементарные прямоугольники разного размера.

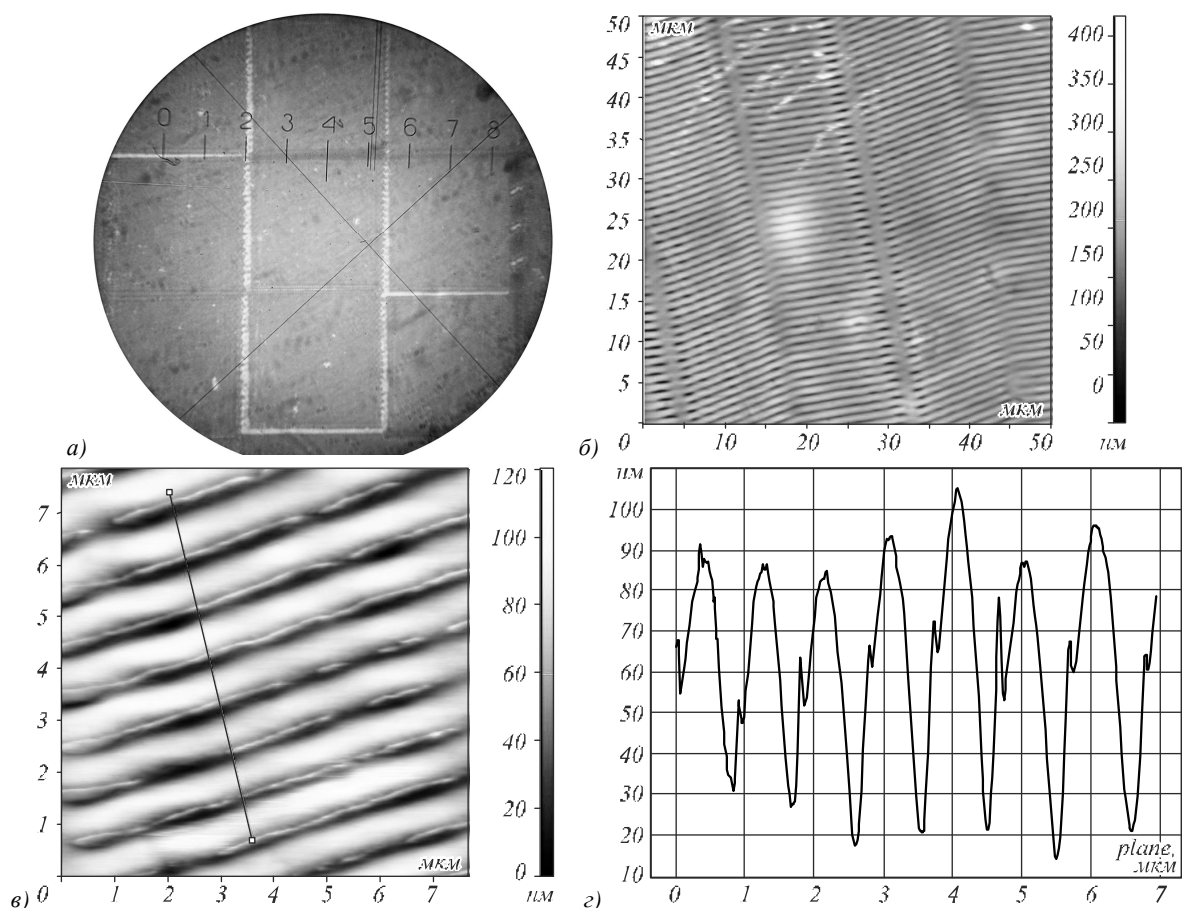


Рис. 8. Вид пикселей в технологии Kinetax (а), 2D-изображения в СЗМ (б, в) и профиль рельефа (г)

Широкий пучок электронов в колонне, проходя через диафрагмы, которые механически изменяют его форму и размеры, с уменьшением проецируется на электронрезист, облучая эти прямоугольные участки. Первый способ позволяет добиться минимальных размеров элемента, а второй – более производительный. Так, электронные литографы с Гауссовым пучком могут формировать линии размером до 10 нм, в то время как у литографов с изменяемой формой пятна минимальный размер элемента составляет примерно 100×100 нм. Однако если принять во внимание, что типичные периоды решеток в пленочных ДОО составляют величину порядка 1 мкм (т.е. линия 500 нм), то разрешения 100–200 нм оказывается достаточно для реализации большинства возможных визуальных эффектов. Эти литографы применяются рядом российских и зарубежных фирм для создания оригинального рельефа ДОО [21–24].

Для рельефа, созданного методом электронной литографии, характерна высокая однородность высоты рельефа однотипных дифракционных структур (рис. 9(а, д)).

Под однотипными в данном случае подразумеваются решетки с одинаковым направлением штрихов и периодами. Если же направление штрихов или период наклонной решетки незначительно изменяется, то за счет растровых эффектов может существенно измениться площадь экспонируемых участков и, соответственно, доза облучения, что может привести к изменению высоты рельефа. Эти эффекты могут быть учтены при экс-

понировании, хотя это и создает дополнительные трудности при подготовке информации для литографа.

Измерения образцов пленочных ДОО, сформированных с помощью электронно-лучевой литографии, показывают высокое качество профиля рельефа оптических элементов с высотой решеток 100–130 нм. Кроме того, электронный литограф за счет изменения дозы облучения в пределах ширины линии позволяет сформировать многоградационный рельеф с асимметричным профилем штриха (рис. 10(а, б)), что дает возможность создавать эффекты, недоступные для других технологий.

2. Анализ и обсуждение результатов

Рассмотренные технологии можно условно разделить на аналоговые и «цифровые». Традиционная оптическая запись является чисто аналоговой. Она принципиально не дает возможности получить однородный по высоте рельеф с эффективным заполнением решетками всей площади оптического элемента.

По-видимому, использование традиционной лазерной записи рельефных голограмм целесообразно только в тех случаях, когда главным критерием качества выступает не дифракционная эффективность, а стабильность записи периода на большой площади, что необходимо, например, для спектральных приборов.

«Dot matrix» использует дискретные пиксели, записываемые аналоговым способом, что позволяет получить только синусоидальный рельеф поверхности.

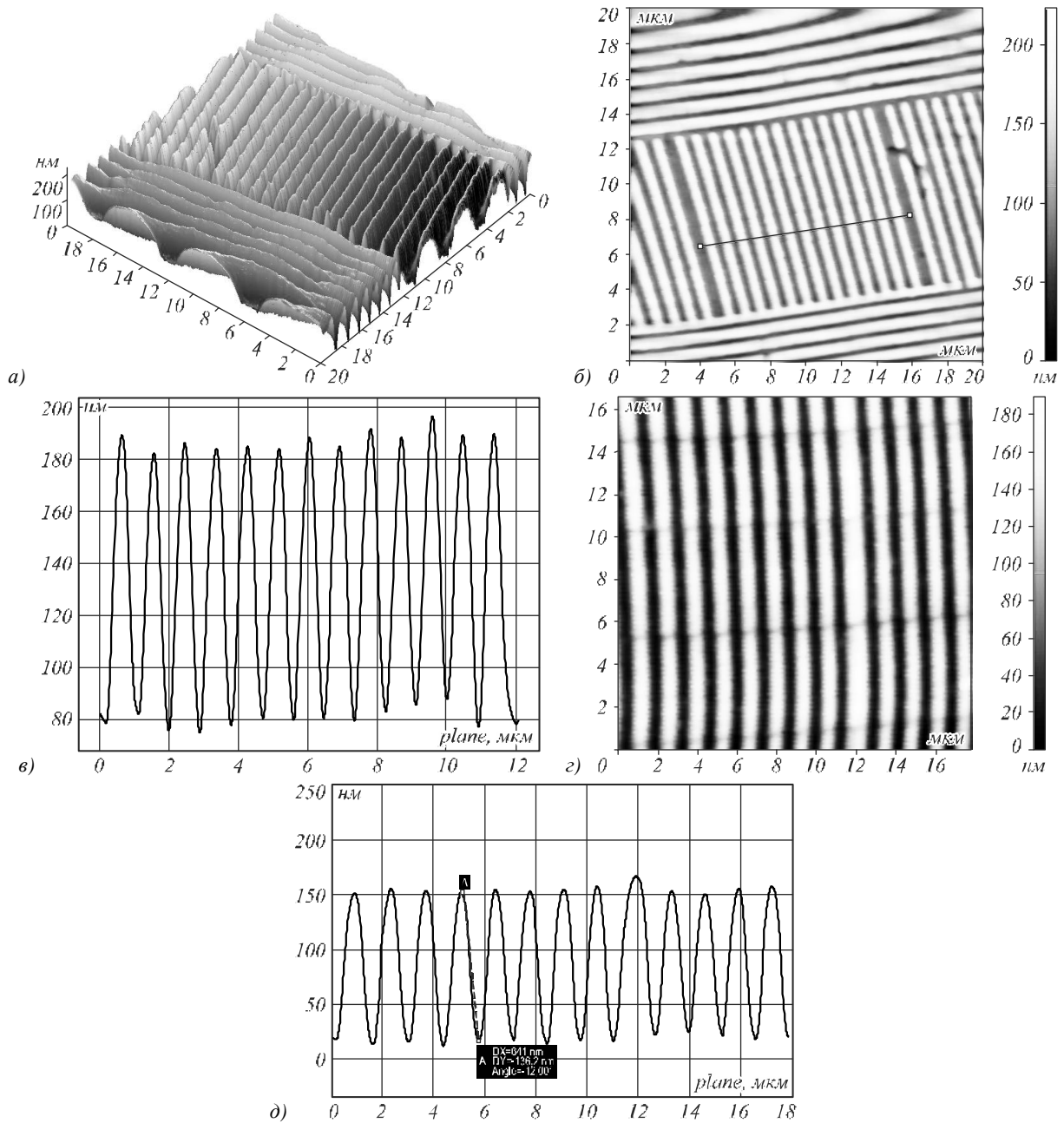


Рис. 9. Структура ДОЭ, изготовленных с применением технологии электронно-лучевой литографии: 3D-изображение рельефа (а), 2D-изображения (б, г) и соответствующие профили рельефа (в, д)

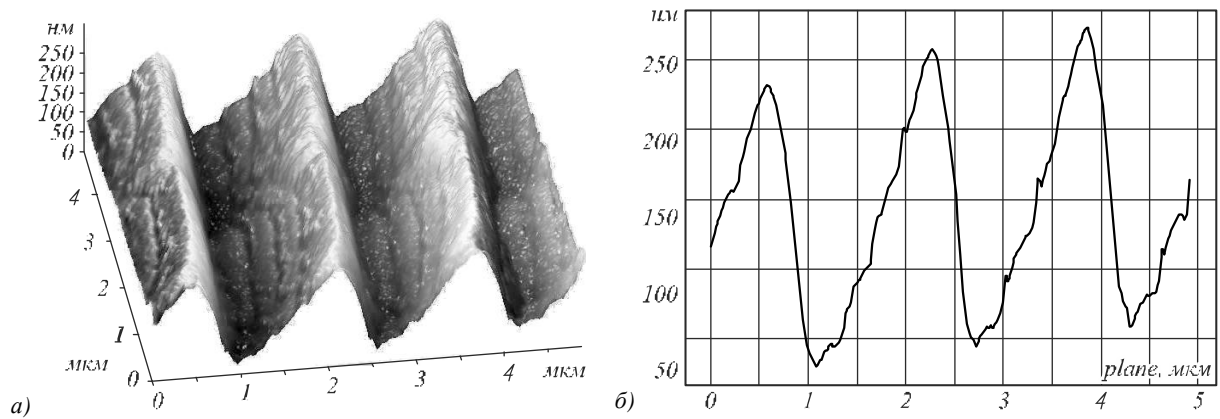


Рис. 10. Пилообразный рельеф, полученный методом ЭЛЛ: а) 3D-изображение, б) профиль рельефа

Наиболее продвинутые системы с квадратным пятном позволяют достичь хорошего заполнения и удовлетворительной равномерности. Однако абсолютное значение высоты рельефа в исследованных образцах достигала значения 250 нм, что почти в 3 раза превышает оптимальную. В этом случае приемлемый визуальный эффект достигается, по-видимому, за счет интерференции более высокого порядка, чем первый, для отдельных длин волн, что вместе с дешевизной и простотой аппаратуры позволяет этой технологии быть самой распространенной, особенно в Азии.

Технологии электронно-лучевой литографии и записи с помощью управляемых оптических транспарантов можно назвать чисто «цифровыми». Они не только создают оптический элемент из дискретных пикселей, но и в каждом пикселе могут гибко менять его структуру и форму рельефа, поэтому последние наиболее перспективны для создания ДОО как с высокой дифракционной эффективностью, так и с уникальными оптическими свойствами.

Заключение

Высота и профиль рельефа являются критически важными параметрами для пленочных ДОО, от которых напрямую зависит дифракционная эффективность. Для достижения наивысших показателей эффективности необходимо наличие как минимум двух компонентов технологии:

- 1) стабильности процесса экспонирования светочувствительного материала с контролем дозы по всей поверхности ДОО;
- 2) контроля высоты и профиля рельефа при химической обработке экспонированного материала. Наилучшим оперативным методом контроля этих параметров на сегодняшний день представляется сканирующая зондовая микроскопия.

Как показывают результаты представленного исследования, наиболее высокие показатели по качеству создаваемого первичного рельефа для пленочных ДОО демонстрируют «цифровые» технологии. Особенно перспективна электронно-лучевая литография, являющаяся базой для современной микроэлектроники. С ее помощью можно создавать, например, рельефы с асимметричным профилем, формирующие дифракцию света только в один порядок с высокой дифракционной эффективностью.

Если же нет высоких требований к качеству, а главным критерием является экономичность и производительность, то здесь преимущество имеют системы типа «Dot matrix», менее чувствительные к условиям экспонирования и обработки фоторезиста.

Литература

1. **Хомутов, В.Н.** Измерение дифракционной эффективности ДОО по многим порядкам дифракции / В.Н. Хомутов, А.Г. Полещук, В.В. Черкашин // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 2. – С. 196-202.
2. **Белоусов, Д.Ф.** Контроль пространственного распределения оптического излучения, рассеянного дифракционной

- структурой / Д.Ф. Белоусов, А.Г. Полещук, В.Н. Хомутов // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 5. – С. 678-686. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-678-686.
3. **Колочкин, В.В.** Метод когерентного контроля глубины поверхностного микрорельефа голограммных и дифракционных оптических элементов / В.В. Колочкин, Е.Ю. Злоказов, С.Б. Одинокоев, В.Е. Талалаев, И.К. Цыганов // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 4. – С. 515-520. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-515-520.
4. **Карпеев, С.В.** Исследование дифракционной решётки на выпуклой поверхности как диспергирующего элемента / С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, С.И. Харитонов // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 2. – С. 211-217.
5. **Collier, R.J.** Optical Holography / R.J. Collier, C.B. Burckhardt, L.H. Lin // New York: Academic Press, 1971. – P. 170-174.
6. **Loewen, E.G.** Diffraction gratings and applications / E.G. Loewen, E. Popov // New York: Taylor and Francis Group, 1997. – 601 p.
7. **Novikova, T.** Metrology of replicated diffractive optics with Mueller polarimetry in conical diffraction / T. Novikova, A. De Martino, P. Bulkin, Q. Nguyen, B. Drévilion, V. Popov, A. Cumakov // Optics Express. – 2007. – Vol. 15, № 5. – P. 2033-2046.
8. **Nakahara, S.** Surface Properties of Holograms Studied by Atomic Force Microscopy / Sumio Nakahara, Takeyoshi Fujita // Proceedings of SPIE. – 1995. – Vol. 2333. – P. 49-52.
9. **Leech, P.W.** Scanning probe microscope analysis of microstructures in optically variable devices / P.W. Leech, B.A. Sexton, R.J. Marnock // Microelectronic Engineering. – 2002. – Vol. 60. – P. 339-346.
10. **Savić Šević, S.** Biopolymer holographic diffraction gratings / S. Savić Šević, D. Pantelić // Optical Materials. – 2008. – Vol. 30, Issue 7. – P. 1205-1207.
11. **Leech, P.W.** Printing via hot embossing of optically variable images in thermoplastic acrylic lacquer / P.W. Leech, R.A. Lee, T.J. Davis // Microelectronic Engineering. – 2006. – Vol. 83. – P. 1961-1965.
12. **Savić Šević, S.** Relief hologram replication using a dental composite as an embossing tool / S. Savić Šević, D. Pantelić // Optics Express. – 2005. – Vol. 13, Issue 7. – P. 2747-2754.
13. **Picot, O.T.** Manufacturing of Surface Relief Structures in Moving Substrates Using Photoembossing and Pulsed-Interference Holography / O.T. Picot, R. Alcalá, C. Sanchez, M. Dai, N.F. Hughes-Brittain, D.J. Broer, T. Peijs, C.W.M. Bastiaansen // Macromolecular Materials and Engineering. – 2013. – Vol. 298(1) – P. 33-37. – DOI: 10.1002/mame.201100433.
14. **Tamulevicius, S.** Optical characterization of diffractive optical elements replicated in polymers / S. Tamulevicius, A. Guobiene, G. Janusas, A. Palevicius, V. Ostasevicius, M. Andrulevicius // Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS. – 2006. – Vol. 5, №1. – 013004.
15. **Zhurminsky, I.** Effect of replication on the groove shape of a sinusoidal holographic grating / I. Zhurminsky, R. Hauser // Optical Engineering. – 2007. – Vol. 46(6). – 063003.
16. **Sexton, B.A.** Characterization of High Resolution Resists and Metal Shims by Scanning Probe Microscopy / B.A. Sexton, R.J. Marnock // Microscopy and Microanalysis. – 2000. – Vol. 6(2). – P. 129-136. – DOI: 10.1007/s100059910012.
17. **Gale, M.T.** Replication technology for micro-optics and optical microsystems / M.T. Gale // Proceedings of SPIE. – 2003. – Vol. 5177. – P. 113-120.

18. **Lu, Y.T.** Compact, reliable a symmetric optical configuration for cost-effective fabrication of multiplex dot matrix hologram in anti-counterfeiting application / Y.T. Lu, S. Chi // *Optik*. – 2003. – Vol. 114(4). – P. 161-167.
19. **Van Renesse, R.L.** Security aspects of commercially available dot matrix and image matrix origination systems / Rudolf L.van Renesse // *SPIE International Conference on Optical Holography and Applications*, 24-27 May 2004, Kiev, Ukraine.
20. **Kley, E.-B.** Continuous profile writing by electron and optical lithography / E.-B. Kley // *Microelectronic Engineering*. – 1997. – Vol. 34, Issue 3–4. – P. 261-298.
21. **Palevičius, A.** Microstructure formation on the basis of computer generated hologram / A. Palevičius, G. Janušas, B. Narijauskaitė, R. Palevičius // *Mechanika*. – 2011. – Vol. 17(3). – P. 334-337.
22. **Girnyk, V.I.** Multilevel computer-generated holograms for reconstructing 3D-images in combined optical-digital security devices / V.I. Girnyk, S.O. Kostyukevych, P.Ye. Shepeliavyi, A.V. Kononov, I.S. Borisov // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. – 2002. – Vol. 5(1). – P. 106-114.
23. **Dubonos, S.V.** Proximity correction for 3D- structures / S.V. Dubonos, B.N. Gaifullin, H. Raith, A.A. Svintsov, S.I. Zaitsev // *Microelectronic Engineering*. – 1995. – Vol. 27. – P. 195-198.
24. **Aristov, V.V.** Three-dimension design in electron beam lithography / V.V. Aristov, S.V. Dubonos, R.Ya. Dyachenko, B.N. Gaifullin, V.N. Matveev, H. Raith, A.A. Svintsov, S.I. Zaitsev // *Journal of Vacuum Science & Technology B*. – 1995. – Vol. 13(6). – P. 2526-2528.

Сведения об авторах

Каминская Татьяна Петровна, 1953 года рождения. В 1977 году окончила физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова по специальности «Физика». Работает научным сотрудником на кафедре общей физики физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, к.т.н., доцент. Область научных интересов: сканирующая зондовая микроскопия, микро- и наноэлектроника. E-mail: ktp53@mail.ru.

Попов Владимир Викторович, 1956 года рождения. В 1979 году окончил физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова по специальности «Физика». Работает старшим научным сотрудником на кафедре общей физики физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, к.ф.-м.н. Область научных интересов: дифракционная оптика, субволновая оптика, электронно-лучевая литография, сканирующая зондовая микроскопия, цифровая голография. E-mail: vyupov@physics.msu.ru.

Салецкий Александр Михайлович, 1952 года рождения. В 1979 году окончил физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова по специальности «Физика». Работает заведующим кафедрой общей физики физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, д.ф.-м.н. Область научных интересов: лазерная и молекулярная спектроскопия, оптика, молекулярная физика, наноструктуры, низкоразмерные системы. E-mail: sam@physics.msu.ru.

Поступила в редакцию 11 марта 2016 г. Окончательный вариант – 14 апреля 2016 г.

CHARACTERIZATION OF THE SURFACE RELIEF OF FILM DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS

T.P. Kaminskaya¹, V.V. Popov¹, A.M. Saletsky¹

¹ *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

Abstract

The surface relief of film reflective diffractive optical elements (DOE) has been characterized by atomic force microscopy. The elements under study were fabricated using a variety of microfabrication techniques: traditional laser recoding of reflection rainbow holograms, Dot matrix and Kinemax technologies, and e-beam lithography. The influence of these technologies on the relief characteristics has been estimated. It has been shown that the choice of such technologies is defined by the necessity to obtain corresponding optical characteristics of diffractive optical elements.

Keywords: diffractive optical elements, atomic force microscope, diffraction efficiency, surface-relief parameters.

Citation: Kaminskaya TP, Popov VV, Saletsky AM. Characterization of the surface relief of film diffractive optical elements. *Computer Optics*. 2016; 40(2): 215-224. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-215-224.

References

- [1] Khomutov VN, Poleshchuk AG, Cherkashin VV. Measurement of diffraction efficiency of DOE in many diffractive orders. *Computer Optics* 2011; 35(2): 196-202.
- [2] Belousov DA, Poleshchuk AG, Khomutov VN. Monitoring a spatial intensity distribution of transmitted and reflected light in a diffractive structure. *Computer Optics* 2015; 39(5): 678-686. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-678-686.

- [3] Kolyuchkin VV, Zlokazov EYu, Odinkov SB, Talalaev VYe, Tsyganov IK. A coherent measurement method for checking the surface microrelief depth in holographic and diffractive optical elements. *Computer Optics* 2015; 39(4): 515-520. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-515-520.
- [4] Karpeev SV, Khonina SN, Kharitonov SI. Study of the diffraction grating on the convex surface as a dispersive element. *Computer Optics* 2015; 39(2): 211-217.
- [5] Collier RJ, Burckhardt CB, Lin LH. *Optical Holography*. New York: Academic Press; 1971: 170-174.
- [6] Loewen EG, Popov E. *Diffraction gratings and applications*. New York: Taylor and Francis Group; 1997.
- [7] Novikova T, De Martino A, Bulkin P, Nguyen Q, Drévilion B, Popov V, Cumakov A. Metrology of replicated diffractive optics with Mueller polarimetry in conical diffraction. *Optics Express* 2007; 15(5): 2033-2046.
- [8] Nakahara S, Fujita T. Surface properties of holograms studied by atomic force microscopy. *Proceedings of SPIE* 1995; 2333: 49-52.
- [9] Leech PW, Sexton BA, Marnock RJ. Scanning probe microscope analysis of microstructures in optically variable devices. *Microelectronic Engineering* 2002; 60: 339-346.
- [10] Savić Šević S, Pantelic D. Biopolymer holographic diffraction gratings. *Optical Materials* 2008; 30(7): 1205-1207.
- [11] Leech PW, Lee RA, Davis TJ. Printing via hot embossing of optically variable images in thermoplastic acrylic lacquer. *Microelectronic Engineering* 2006; 83: 1961-1965.
- [12] Savić Šević S, Pantelic D. Relief hologram replication using a dental composite as an embossing too. *Optics Express* 2005; 13(7): 2747-2754.
- [13] Picot O., Alcalá R, Sanchez C, Dai M, Hughes-Brittain NF, Broer DJ, Peijs T, Bastiaansen CWM. Manufacturing of surface relief structures in moving substrates using photoembossing and pulsed-interference holography. *Macromolecular Materials and Engineering* 2013; 298(1): 33-37. DOI: 10.1002/mame.201100433.
- [14] Tamulevicius S, Guobiene A, Janusas G, Palevicius A, Ostasevicius V, Andrulevicius M. Optical characterization of diffractive optical elements replicated in polymer. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS* 2006; 5(1): 013004.
- [15] Zhurminsky I, Hauser R. Effect of replication on the groove shape of a sinusoidal holographic grating. *Optical Engineering* 2007; 46(6): 063003.
- [16] Sexton BA, Marnock RJ. Characterization of high resolution resists and metal shims by scanning probe microscopy. *Microsc Microanal* 2000; 6(2): 129-136. DOI: 10.1007/s100059910012.
- [17] Gale MT. Replication technology for micro-optics and optical microsystems. *Proceedings of SPIE* 2003; 5177: 113-120.
- [18] Lu YT, Chi S. Compact, reliable a symmetric optical configuration for cost-effective fabrication of multiplex dot matrix hologram in anti-counterfeiting application. *Optik* 2003; 114(4): 161-167.
- [19] Van Renesse RL. Security aspects of commercially available dot matrix and image matrix origination systems. *SPIE International Conference on Optical Holography and Applications*, 24-27 May 2004, Kiev, Ukraine.
- [20] Kley E-B. Continuous profile writing by electron and optical lithography. *Microelectronic Engineering* 1997; 34(3-4): 261-298.
- [21] Palevičius A, Janušas G, Narijauskaitė B, Palevičius R. Microstructure formation on the basis of computer generated hologram. *Mechanika* 2011; 17(3): 334-337.
- [22] Girnyk VI, Kostyukevych SO, Shepeliavyi PYe, Kononov AV, Borisov IS. Multilevel computer-generated holograms for reconstructing 3D-images in combined optical-digital security devices. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics* 2002; 5(1): 106-114.
- [23] Dubonos SV, Gaifullin BN, Raith H, Svintsov AA, Zaitsev SI. Proximity correction for 3D-structures. *Microelectronic Engineering* 1995; 27: 195-198.
- [24] Aristov VV, Dubonos SV, Dyachenko RYa, Gaifullin BN, Matveev VN, Raith H, Svintsov AA, Zaitsev SI. Three-dimension design in electron beam lithography. *J Vac Sci Technol* 1995; 13(6): 2526-2528.

Authors' information

Tatiana Petrovna Kaminskaya (b.1953), graduated from Physics department of M.V. Lomonosov Moscow State University in 1977, Ph.D. Currently she works as a researcher at the General Physics chair of Physics Faculty. Specializes in the field of atomic force microscopy and micro- and nanoelectronics. E-mail: ktp53@mail.ru.

Vladimir Victorovich Popov (b.1956), graduated from Physics department of M.V. Lomonosov Moscow State University in 1979, Ph.D. Currently he works as a senior researcher at the General Physics chair of Physics Faculty. Specializes in the field of diffractive optics, subwave optics, e-beam lithography, atomic force microscopy, digital holography. E-mail: vyppopov@physics.msu.ru.

Alexander Mikhailovich Saletsky (b.1952), graduated from Physics department of M.V. Lomonosov Moscow State University in 1979, D. Sc. Currently he works as a Head of the General Physics chair of Physics Faculty. Specializes in the field lasers and molecular spectroscopy, molecular physics, nanostructures, low-dimensional systems. E-mail: sam@physics.msu.ru.

Received March 11, 2016. The final version – April 14, 2016.
