

10

Экспериментальные исследования различных полимерных композиций для создания рельефно-фазовых дифракционных решеток для систем дополненной реальности

© А.Б. Соломашенко, Г.К. Красин, Е.А. Дроздова

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005 Москва, Россия

e-mail: art_87@mail.ru

Поступила в редакцию 15.01.2020 г.

В окончательной редакции 23.03.2020 г.

Принята к публикации 28.03.2020 г.

Показана возможность копирования высокочастотных дифракционных решеток, полученных в слое фоторезиста, на стеклянные подложки с помощью полимерных композиций (ОКМ и Техновит) и проведен их сравнительный анализ. В основе механизма копирования рельефно-фазовой структуры лежит двухэтапный процесс, заключающийся в получении никелевой мастер-детали с последующим нанесением на нее полимерной композиции и ее отверждением под воздействием УФ излучения. Осуществлена оптимизация режимов копирования (время, экспозиция, толщина полимерной основы), что позволило получить рельефно-фазовые дифракционные решетки с глубиной поверхностного рельефа, сопоставимой с исходной структурой, полученной в слое фоторезиста. Проведена оценка дифракционной эффективности полученных решеток, а также оценка изменения глубины поверхностного рельефа полимерных копий, полученных с одной мастер-детали.

Ключевые слова: рельефно-фазовая дифракционная решетка, полимерная композиция, глубина рельефа, дифракционная эффективность.

DOI: 10.21883/OS.2020.07.49563.110-20

Введение

Такие рельефно-фазовые структуры, как дифракционные оптические элементы (ДОЭ), в последнее время все чаще применяются для замены элементов физической оптики [1–4]. Одной из сфер их применения являются устройства дополненной реальности, современные тенденции развития которых связаны с разработкой различных вариантов структуры ДОЭ для световодных пластин [5–7]. В большинстве своем это ДОЭ с поверхностным рельефом, причем оптимизация различных параметров такой структуры (скважность дифракционной решетки, показатель преломления, глубина поверхностного рельефа, углы наклона и период) позволяет достичь наилучших значений по угловому полю зрения, цветности и равномерности яркости изображения дополненной реальности [5].

Для изготовления таких элементов применяются методы аналоговой голографии [7], а также электронно-лучевой или нанопечатной [5] литографии. Литографические методы получения являются дорогостоящими и длительными по времени изготовления. В отличие от них метод аналоговой голографии, конечно, не обеспечивает получения требуемых вариантов структуры (в первую очередь, различные углы наклона профиля) ДОЭ, но является более доступным и производительным. При этом для каждого из вышеперечисленных

методов задача копирования поверхностного рельефа является актуальной.

Одним из методов копирования рельефно-фазовых ДОЭ является изготовление металлической мастер-детали и ее дальнейшее эмбоссирование [8] или нанесение на мастер-деталь полимерной композиции с ее отверждением под воздействием УФ излучения [9,10]. Отличительной особенностью ДОЭ для световодных пластин является достаточно высокая пространственная частота (от 1400 до 2800 mm^{-1}) [7], необходимая для ввода излучения в пластину под углами, превышающими угол полного внутреннего отражения (ПВО). В процессе копирования это может привести к существенному уменьшению глубины поверхностного рельефа (а значит, уменьшению дифракционной эффективности) или вызвать невозможность копирования в принципе. Поэтому эксперименты по копированию дифракционных решеток с помощью полимерных композиций, описанные в настоящей работе, являются актуальными, поскольку могут применяться для получения дифракционных элементов на световодных пластинах, используемых в системах дополненной реальности.

Эксперимент

В качестве объекта исследования были выбраны дифракционные решетки с пространственной частотой 1450 mm^{-1} , полученные на слое фоторезиста марки

Таблица 1. Зависимость глубины поверхностного рельефа от времени экспонирования дифракционной решетки

Время экспонирования, s	9	18	36	45	
Глубина рельефа, nm	Образец 1	40	100	221	327
	Образец 2	46	106	231	336
	Образец 3	49	108	237	348
	Образец 4	52	115	224	365
	Образец 5	43	113	218	375
Средняя глубина рельефа, nm	46	108.4	226.2	350.2	

Таблица 2. Глубина поверхностного рельефа дифракционных решеток (в nm), полученных на различных носителях

Мастер-деталь	ОКМ (копия 1)	Техновит (копия 1)
50	31	32
53	36	41
57	47	43
108	75	64
109	78	67
117	82	75
204	160	103
207	174	105
220	181	110

S1813 толщиной около $1 \mu\text{m}$. Решетки были получены на площади 1cm^2 методом голографической записи по симметричной схеме с помощью He–Cd-лазера с длиной волны $0.44 \mu\text{m}$ и мощностью $100 \mu\text{W}$. Глубина поверхностного рельефа дифракционной решетки может регулироваться или временем экспонирования, или временем проявления. Так как проявление происходит вручную и длится от 7 до 10 s, то необходимая глубина рельефа обеспечивается подбором времени экспонирования, которое отрабатывается автоматически с помощью затвора. Глубина поверхностного рельефа дифракционных решеток измерялась с помощью атомно-силового микроскопа Solver Pro, а результаты измерения представлены в табл. 1.

Далее с полученных на слое фоторезиста дифракционных решеток глубиной порядка 50, 100 и 200 nm методом гальванического копирования были получены мастер-детали. Мастер-деталью является никелевая копия, представляющая собой лист толщиной $50 \mu\text{m}$ с матрицей дифракционных решеток. Использование в качестве носителя никелевой матрицы существенно увеличивает количество снятых копий, при этом появляется возможность обрабатывать поверхность мастер-детали ацетоном для удаления остатков жидкого и отвержденного полимера.

Порядок работы по получению полимерной копии заключался в следующем.

1. Изготовление формы для заливки полимерной композиции. Форма задаёт вид и размер будущих полимерных копий. Внутренний размер формы должен быть таким, чтобы в него полностью помещалась дифракционная решетка, предназначенная для копирования, внешний размер должен быть достаточно большим, чтобы обеспечить хорошее прилегание к мастер-детали и устойчивость конструкции, толщина формы отвечает за конечную толщину полимерной копии. Для получения копий использовалась форма для заливки из силикона.

2. Приготовление фотополимерной композиции. Композиция готовится непосредственно перед использованием. В стеклянном стаканчике взвешивается необходимое количество олигомера, далее к нему добавляется фотоинициатор в количестве 1% от массы олигомера (т.е. на 100 g олигомера требуется 1 g фотоинициатора). Компоненты тщательно перемешиваются. При перемешивании образуются пузырьки, поэтому перед заливкой композицию необходимо выдержать некоторое время для выхода пузырей на поверхность. Для ускорения процесса стаканчик с композицией можно поместить в стакан с тёплой водой.

3. Изготовление полимерной копии. Поверхность мастер-детали должна быть чистая, сухая, обезжиренная. На никелевую мастер-деталь помещается силиконовая форма. Фотополимерная композиция заливается в полученную полость. Сверху кладётся чистое, обезжиренное стекло. Важно, чтобы при этом не произошло образование пузырей. Далее через верхнее стекло производится облучение ультрафиолетовым излучением. Время экспонирования определялось экспериментально, учитывая мощность излучения и толщину будущей фотополимерной копии.

В качестве полимерных композиций в эксперименте использовались композиции ОКМ и Техновит. Полимерная композиция ОКМ состоит из двух компонентов: олигомера (бис-(метакрилоксиэтиленкарбонат)-диэтиленгликоля) и фотоинициатора (дифенил (2,4,6-триметилбензоил) фосфиноксид и 2-ОН-2 метилпропиофенон в соотношении 1:1). Время воздействия (экспонирования) ультрафиолетовым излучением составило 24 min для толщины полимерного слоя 3 mm при мощности примерно $1.5 \mu\text{J}/\text{s}\cdot\text{cm}^2$ (меньшее время экспонирования не обеспечивает достаточной полимеризации композиции), 8 min для толщины 1 mm и около 3 min для толщины порядка 0.2–0.3 mm.

Полимерная композиция Техновит в процессе копирования наносится кисточкой тонким слоем на мастер-деталь, а сверху покрывается покровным стеклом. Время экспонирования композиции Техновит составляло 8 min для толщины порядка 0.2–0.3 mm. После экспонирования образовывался тонкий слой, который отделялся от никелевой мастер-детали, но оставался прикреплённым к стеклу. Адгезия к стеклу у композиции Техновит лучше, чем у ОКМ. При этом толщина полимерного слоя должна быть небольшой, т.е. до нескольких сотен

μm , так как при толщине копии около 1 mm и выше она становится не прозрачной, а мутной.

После проведения копирования дифракционных решеток с помощью полимерных композиций ОКМ и Техновит измерялись глубина поверхностного рельефа и дифракционная эффективность решеток. Глубина рельефа определялась с помощью атомно-силового микроскопа Solver Pro как полный перепад между вершинами и впадинами, а затем сравнивалась с глубиной поверхностного рельефа исходной решетки, полученной на слое фоторезиста, и мастер-детали, т.е. ее никелевой копии. Дифракционная эффективность определялась как отношение интенсивности пучка первого порядка дифракции, прошедшего через голограмму, к интенсивности падающего пучка для длины волны $0.52 \mu\text{m}$.

Результаты

В качестве исходных дифракционных решеток использовались решетки с глубиной поверхностного рельефа 50, 100 и 200 nm. Для каждой решетки была получена никелевая мастер-деталь, с которой, в свою очередь, были сняты полимерные копии.

Глубина поверхностного рельефа решеток приведена в табл. 2. Как видно из табл. 2, в случае применения всех полимерных композиций (ОКМ и Техновит) глубина поверхностного рельефа отличается от мастер-детали. В случае композиций ОКМ глубина рельефа примерно в 1.4–1.5 раза меньше, чем у оригинала, а в случае композиции Техновит глубина рельефа копии заметно меньше, чем у мастер-детали (например, для глубины рельефа 200 nm почти вдвое меньше). Таким образом, для эффективного копирования дифракционных решеток из двух описанных полимерных композиций больше подходит композиция ОКМ.

При этом высокая адгезия к стеклу композиции Техновит позволяет получать тонкие полимерные копии рельефно-фазовых решеток на стеклянных подложках, в том числе световодных, т.е. тех, которые используются в устройствах дополненной реальности. Данные стеклянные подложки могут иметь произвольную толщину (от 0.8 mm и выше) и показатель преломления, а также предварительно нанесенное покрытие, что важно для таких систем. При этом следует отметить, что изменение глубины рельефа копии дифракционной решетки неизбежно приведет к уменьшению дифракционной эффективности, но решение данного вопроса требует дальнейшего изучения.

Для обеспечения аналогичных свойств композиции ОКМ необходимо использовать адгезив — 1%-раствор 3-триметоксисилил пропилметакрилата (ТМСПМА) в смеси этиловый спирт-вода (1:1 по объему). Наносить адгезив на стекло лучше на центрифуге (скорость вращения порядка 500 s^{-1} , время нанесения 1 min) или распылением, после чего стекло необходимо прогреть при температуре 100°C в течение 3 min.

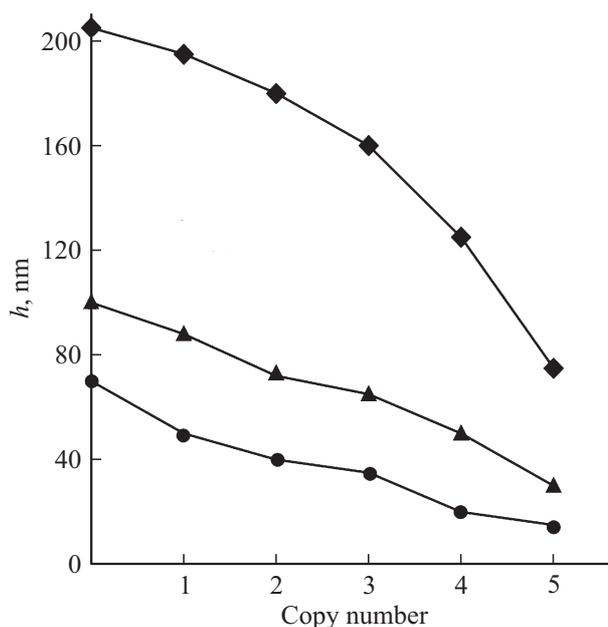


Рис. 1. Глубина поверхностного рельефа полимерных копий, полученных с одной мастер-детали.

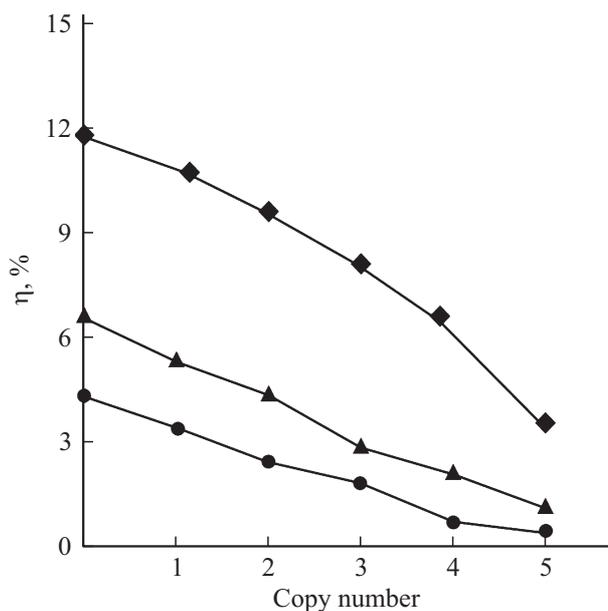


Рис. 2. Зависимость дифракционной эффективности от глубины поверхностного рельефа для различных полимерных копий.

Для оценки эффективности копирования с помощью полимерной композиции ОКМ с одной и той же мастер-детали с частотой штрихов 1450 mm^{-1} и различной глубиной рельефа (порядка 70, 100 и 240 nm) были поочередно получены 5 полимерных копий, глубина поверхностного рельефа которых представлена на рис. 1, а дифракционная эффективность на рис. 2.

На рис. 1 видно, что для первых трех копий наблюдается уменьшение глубины рельефа практически в 1.5 ра-

за по сравнению с исходной структурой, для четвертой копии глубина уменьшается в 2 раза, а для пятой — уже в 3. Значение 0 на оси абсцисс соответствует глубине рельефа мастер-детали.

Дифракционная эффективность первых трех копий отличается не более, чем в 1.3 раза от номинального значения (мастер-детали), у четвертой копий — в 1.6 раза меньше, а для пятой — более чем в 2 раза. Таким образом, на основании значений глубины рельефа и дифракционной эффективности можно сделать вывод, что с одной мастер-детали с помощью композиции ОКМ целесообразно делать не более 3 полимерных копий.

Заключение

Результаты проведенных исследований показали возможность копирования дифракционных решеток с частотой штрихов 1450 mm^{-1} , полученных на слое фоторезиста, на стеклянные подложки с помощью полимерной композиции ОКМ. Осуществлена оптимизация режимов копирования (определено время экспонирования для толщины полимерной основы до 1 мм, подобран адгезив), что позволило получить рельефно-фазовые дифракционные решетки на световодных подложках с глубиной поверхностного рельефа от 30 до 200 нм, сопоставимой с исходной структурой, полученной в слоях фоторезиста, и дифракционной эффективностью, отличающейся не более чем в 1.2 раза от номинального значения.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Kovalev M.S., Krasin G.K., Odinson S.B., Solomashenko A.B., Zlokazov E.Yu. // Opt. Express. 2019. V. 27. P. 1563. doi 10.1364/OE.27.001563
- [2] Korolkov V.P., Poleshchuk A.G., Nasyrov R.K. // Proc. SPIE. 2014. V. 9283. P. 928302. doi 10.1117/12.2073301
- [3] Одиноков С.Б., Сагателян Г.Р., Ковалёв М.С., Соломашенко А.Б., Дроздова Е.А. // Компьютерная оптика. 2013. Т. 37. № 3. С. 341.
- [4] Ручка П.А., Вереникина Н.М., Гриценко И.В., Злоказов Е.Ю., Ковалев М.С., Красин Г.К., Одиноков С.Б., Сценуро Н.Г. // Опт. спектр. 2019. Т. 127. В. 4. С. 563. doi 10.21883/OS.2019.10.48358.172-19; Ruchka P.A., Verenikina N.M., Gritsenko I.V., Zlokazov E.Yu., Kovalev M.S., Krasin G.K., Odinson S.B., Stsepuro N.G. // Opt. Spectrosc. 2019. V. 127. P. 618. doi 10.1134/S0030400X19100230
- [5] Kress B.C. // Proc. SPIE. 2019. V. 11062. P. 110620J. doi 10.1117/12.2527680
- [6] Levola T. // J. Soc. Inform. Display. 2012. V. 14. N 5. P. 467. doi 10.1889/1.1828693
- [7] Solomashenko A.B., Odinson S.B., Markin V.V., Kuznetsov A.S., Drozdova E.A. // Proc. SPIE. 2013. V. 8776. P. 87760Q. doi 10.1117/12.2017150
- [8] Iwata F., Tsujiuchi J. // Appl. Opt. 1974. V. 13. P. 1327–1336. doi 10.1364/AO.13.001327
- [9] Бабкин О.Э., Жданова А.В., Ильина В.В., Михайлов В.Н. // Мир техники кино. 2014. Т. 33. № 3. С. 32.
- [10] Ахметов М.М., Гайнутдинов И.С., Иванов В.Л., Лукашевич Я.К., Лукин А.В., Мельников А.Н., Могилюк И.А., Никаноров Н.Ю., Самтаров Ф.А. Технологии изготовления элементов дифракционной и асферической оптики. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.ruoptics.com/vedomosti-russkogo-opticheskogo-obshchestva-no3-2018-g>