

42. Особенности мультиэкспозиционной записи голографических решеток в фотополимере Bayfol

В. Н. Борисов, Р. А. Окунь, А. Е. Ангервакс, Г. Н. Востриков, Н. В. Муравьев, М. В. Попов
ООО «Исследовательский центр Самсунг», Москва, Россия

Рассмотрена задача мультиэкспозиционной записи голографических решеток в фотополимерном материале Bayfol HX. Продемонстрированы особенности такой записи, связанные как с техникой проведения эксперимента (изменение угла азимута и угла места между экспозициями), так и со свойствами самого материала (нарушение закона взаимозаместимости, темновые процессы, диффузия кислорода, усадка), а также реализованы методики подавления нежелательных эффектов.

Ключевые слова: Объемная голография, Голографические оптические элементы, Мультиэкспозиция, Фотополимер, Bayfol.

Цитирование: **Борисов, В. Н.** Особенности мультиэкспозиционной записи голографических решеток в фотополимере Bayfol / В. Н. Борисов, Р. А. Окунь, А. Е. Ангервакс, Г. Н. Востриков, Н. В. Муравьев, М. В. Попов // HOLOEXPO 2020 : XVII международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. — С. 271–274.

К настоящему времени, голографические материалы позволяют получить достаточно высокую (10^{-2} – 10^{-1}) модуляцию показателя преломления, и, как следствие, добиться дифракционной эффективности, близкой к 100%, при сравнительно небольшой (десятки мкм) толщине. Данное свойство делает голографические оптические элементы (ГОЭ) конкурентоспособными на рынке дифракционных оптических элементов (ДОЭ). При этом ГОЭ обладают возможностью варьирования селективности в широком диапазоне, что является серьезным конкурентным преимуществом ГОЭ перед ДОЭ. Селективные свойства ГОЭ определяют спектрально-угловой диапазон, в котором излучение испытывает дифракцию (рабочий диапазон ГОЭ). Посредством варьирования характеристик ГОЭ, возможно изменять как спектрально-угловое положение данного диапазона, так и его ширину. Таким образом, ГОЭ демонстрируют большую гибкость в отношении настройки их параметров и, тем самым, обладают высоким потенциалом применимости в различных научно-технических областях.

Положение рабочего диапазона ГОЭ определяется углом наклона изофазных голографических поверхностей относительно границы материала (ориентацией вектора решетки), в то время как его ширина определяется эффективной толщиной голографической решетки, которая, в большинстве случаев, связана с толщиной ГОЭ. Изменение ширины рабочего диапазона посредством варьирования толщины голографического материала — сложно реализуемая задача. Для массового использования ГОЭ необходим более эффективный инструмент точного управления шириной рабочего диапазона.

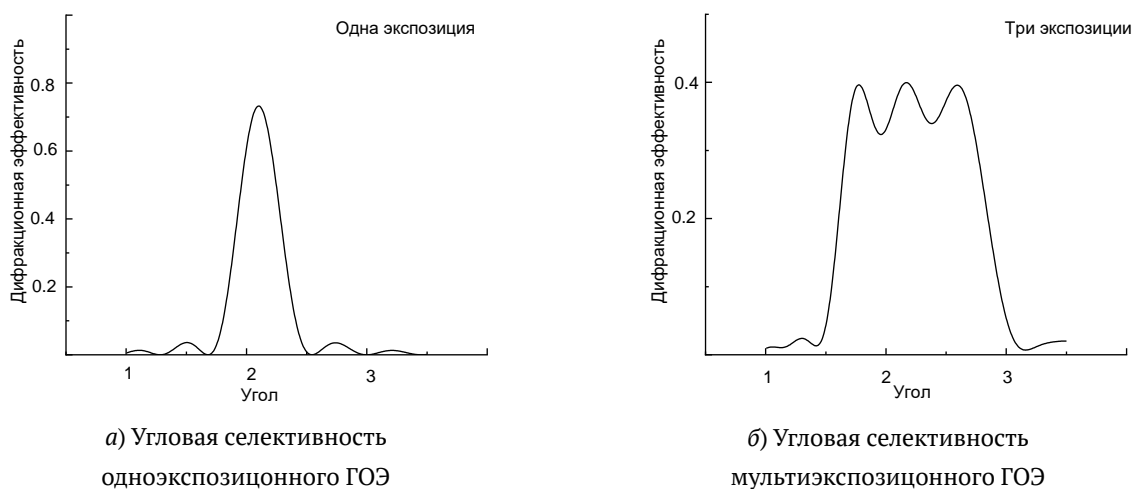


Рис. 1. Сравнение активного диапазона одноэкспозиционного и мультиэкспозиционного ГОЭ

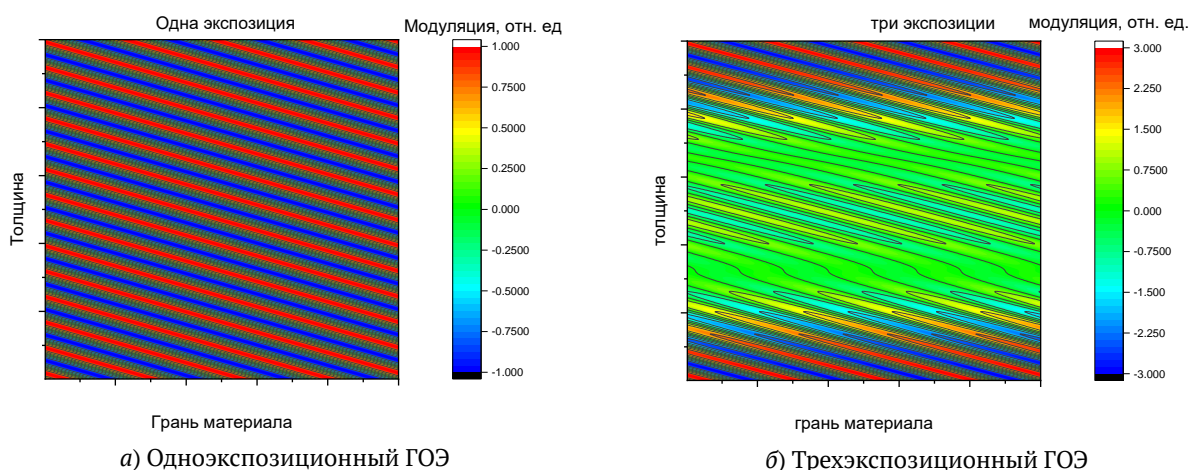


Рис. 2. Влияние мультиэкспозиции на распределение модуляции показателя преломления внутри ГОЭ и эффективную толщину голографических решеток

Одним из таких инструментов может являться мультиэкспонирование — последовательная запись серии голографических решеток с сохранением поверхностного периода интерференционной картины и изменением угла наклона голографических плоскостей относительно границ ГОЭ. Каждая голографическая решетка в такой серии активна в ограниченном спектрально-угловом диапазоне, а сохранение поверхностного периода всех дифракционных решеток гарантирует непрерывную угловую связь между референтным и дифрагированным лучами при работе ГОЭ (рисунок 1).

Изменение селективных свойств ГОЭ посредством мультиэкспонирования можно интерпретировать, как уменьшение эффективной толщины голографических решеток. При наложении нескольких интерференционных картин с одинаковым поверхностным периодом создаются пространственные участки, в которых картины интерференции находятся в противофазе, что приводит к отсутствию модуляции показателя преломления (рисунок 2). Таким образом, происходит запись голографической решетки не во всей толщине голографического материала, что расширяет ее рабочий диапазон.

Последовательная запись серии голографических решеток — комплексная задача, которая должна решаться с учетом специфики голографического материала. В настоящей работе задача мультиэкспонирования рассмотрена на примере голографического материала Baufol НХ, обладающего особенностями записи, характерными для сухих голографических фотополимеров. Материал Baufol НХ выпускается в виде светочувствительного слоя толщиной от 4 до 25 мкм, заключенного между двумя более толстыми полимерными пленками, одна из которых может быть удалена, давая возможность закрепить светочувствительный слой на стеклянной подложке.

Во время записи активированный фотоинициатор прежде всего реагирует с находящимся в композиции и более химически активным кислородом, что препятствует полимеризации [1]. Диффузия кислорода через покрывающую светочувствительный слой полимерную пленку обеспечивает его постоянный приток, из-за чего для Baufol НХ характерен порог фотополимеризации по плотности мощности экспозиции. Пороговое значение плотности мощности зависит от длины волны излучения, материала покровного слоя и его толщины, и составляет 0,1–2 мВт/см². Помимо пороговой плотности мощности, Baufol НХ также обладает пороговой плотностью энергии экспозиции, которая зависит от длины волны излучения и составляет 1–2 мДж/см².

Формирование голограмм в Baufol НХ основано на процессе фотоиндуцированного разделения фаз [2], сочетающего в себе фотополимеризацию и диффузию. Благодаря данному механизму максимально возможная модуляция показателя преломления, рассматриваемого материала при голографической записи $\Delta n \approx 0,035$, что является рекордно высоким значением для голографических фотополимеров. Это позволяет достигать значений дифракционной эффективности более 50% в материале толщиной порядка единиц мкм. Однако наличие массопереноса, как основного механизма формирования голограмм, приводит к нарушению закона взаимозаменяемости — зависимости дифракционной эффективности голограммы не только от плотности энергии экспозиции (дозы) но и от плотности мощности экспозиции или времени экспозиции с сохранением дозы.

В настоящей работе рассмотрены как преимущественно технические особенности реализации мультиэкспозиционной записи в материале Baufol НХ (изменение угла азимута и угла места между экспозициями), так и особенности работы с материалом Baufol НХ применительно к мультиэкспозиционной записи (нарушение закона взаимозаменяемости, темновые процессы, диффузия кислорода, усадка).

Изменение угла азимута между экспозициями приводит к формированию голографических решеток с разным поверхностным периодом. В свою очередь изменение угла места — к повороту интерференционной картины на поверхности ГОЭ вокруг нормали к этой поверхности. Одним из проявлений описанных различий голографических решеток в составе мультиэкспозиционного ГОЭ является нарушения непрерывной работы ГОЭ, т. е. немонотонная

связь референтного и дифрагированного лучей. Другим же — появление низкочастотных интерференционных биений (муара), вызванных наложением структур с близкими, но различающимся поверхностными периодами.

Нарушение закона взаимозаменяемости и наличие темновых процессов приводят к трудностям при подборе условий экспонирования для равномерной и равной эффективности отдельных голографических решеток [3]. Наконец, усадка влияет на финальные параметры ГОЭ, ведет к рассинхронизации откликов отдельных голографических решеток друг относительно друга [4]. Упомянутые особенности мультиэкспозиционной записи, а также реализованные методики подавления нежелательных эффектов рассмотрены в настоящей работе.

Благодарность

Авторы выражают благодарность Dr. F. K. Bruder (Covestro AG) за предоставленные образцы фотополимера Bayfol и полезные консультации.

Список источников

- [1] **Bruder, F. K.** [The chemistry and physics of Bayfol® HX film holographic photopolymer](#) / F. K. Bruder, T. Fäcke, T. Rölle // *Polymers*. — 2017. — Vol. 9. — № 10. — P. 472. — DOI: 10.3390/polym9100472.
- [2] **Lee, J. C.** [Polymerization-induced phase separation](#) // *Physical Review E*. — 1999. — Vol. 60. — № 2. — P. 1930. — DOI: 10.1103/PhysRevE.60.1930.
- [3] **Borisov, V. N.** [Theory of holographic formation in multicomponent photopolymer-based nanocomposites](#) / V. N. Borisov, V. V. Lesnichii // *Оптика и спектроскопия*. — 2020. — Том 128. — № 8. — С. 1201. — DOI: 10.21883/OS.2020.08.49732.1023-20.
- [4] **Борисов, В. Н.** [Экспериментальный метод определения направления усадки при голографической записи в среде Bayfol HX](#) / В. Н. Борисов, Р. А. Окунь, Л. Н. Бородина, В. В. Лесничий // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. — 2020. — Том 20. — № 3. — С. 307–317. — DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-307-317.