

УДК 778.38.01:535

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-307-317

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ УСАДКИ ПРИ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ В СРЕДЕ BAYFOL HX

В.Н. Борисов^а, Р.А. Окунь^б, Л.Н. Бородин^а, В.В. Лесничий^с

^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^б Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, 119991, Российская Федерация

^с Университет Фрайбурга, Фрайбург, 79104, Германия

Адрес для переписки: borisov.itmo@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 08.04.20, принята к печати 28.04.20

Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Борисов В.Н., Окунь Р.А., Бородин Л.Н., Лесничий В.В. Экспериментальный метод определения направления усадки при голографической записи в среде Bayfol HX // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 3. С. 307–317. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-307-317

Аннотация

Предмет исследования. В работе экспериментально определено направление усадки в композите Bayfol HX в ходе фотополимеризации при голографической записи. **Метод.** Методика определения направления усадки основана на фиксации изменений характеристик объемных голограмм (периода, ориентации изофазных плоскостей относительно поверхностей материала, толщины голограммы) вследствие усадки. Для этого в работе представлена двумерная модель, описывающая явление усадки в векторном виде, и с помощью геометрических законов оценено влияние усадки на изменение характеристик записанных объемных голограмм. Проведено моделирование влияния усадки различных направлений на произвольно ориентированные голограммы-решетки. Рассмотрены случаи изотропной усадки, усадки в направлении поверхностей материала, вектора решетки, а также вдоль изофазных плоскостей. Разработан эксперимент одновременной записи двух голограмм при помощи эффекта полного внутреннего отражения в фотополимеризующемся композите Bayfol HX, изменения характеристик которых позволяют однозначно установить направление действия усадки. **Основные результаты.** Экспериментально определено преимущественное направление усадки вдоль меньшей стороны материала (по толщине). Вместе с тем эксперимент продемонстрировал отклонение усадки от этого направления по вектору голографической решетки. **Практическая значимость.** Разработанная модель и экспериментальные оценки усадки в фотополимере Bayfol HX позволяют учитывать ее при моделировании процессов фотополимеризации и многокомпонентной диффузии, а также предсказывать характеристики голограмм после усадки с целью ее компенсации.

Ключевые слова

голография, усадка, фотополимер, контур селективности, вектор, объемная голография, ПВО-голография

Благодарности

Авторы благодарят доктора Фридриха-Карла Брудера за предоставление голографической среды Bayfol HX, а также за консультацию по вопросам записи ПВО-голограмм. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-01048. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках научно-исследовательского проекта № 2019-1080.

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-307-317

EXPERIMENTAL METHOD FOR DETERMINATION OF SHRINKAGE DIRECTION DURING HOLOGRAPHIC RECORDING IN BAYFOL HX PHOTOPOLYMER

V.N. Borisov^a, R.A. Okun^b, L.N. Borodina^a, V.V. Lesnichii^c

^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^b Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow, 119991, Russian Federation

^c Albert Ludwig University of Freiburg, Freiburg, 79104, Germany

Corresponding author: borisov.itmo@gmail.com

Article info

Received 08.04.20, accepted 28.04.20

Article in Russian

For citation: Borisov V.N., Okun R.A., Borodina L.N., Lesnichii V.V. Experimental method for determination of shrinkage direction during holographic recording in Bayfol HX photopolymer. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 307–317 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-307-317

Abstract

Subject of Research. The paper presents experimental determination of the main shrinkage direction caused by photopolymerization during holographic recording in Bayfol HX material. **Method.** The determination method for the main shrinkage direction is based on registration of the change in volume holograms characteristics (period, the orientation of isophase planes relative to material surfaces and hologram thickness) caused by the shrinkage. For the implementation of this method a 2D-model is presented which describes shrinkage as a vector. The effect of the shrinkage on characteristics of holograms is evaluated based on geometrical laws. We performed modeling of the shrinkage with different directions and determined its effect on a variety of arbitrarily oriented holograms-gratings. Namely, the cases of isotropic shrinkage, as well as shrinkage in the direction of the material surfaces, the lattice vector and the isophase planes were considered. The experiment is carried out involving a simultaneous recording of two total internal reflection holograms in a photopolymerizable Bayfol HX composite. The changes of their characteristics make it possible to determine clearly the main shrinkage direction. **Main Results.** The main shrinkage direction has been determined along the less side of the material (considering thickness). However, the experiment has demonstrated a deviation of this direction along the lattice vector as well. **Practical Relevance.** The developed model and the experimental method allow for taking into account the shrinkage in Bayfol HX while modeling of photopolymerization and multicomponent diffusion in this material. The studied technique also facilitates predictions of hologram characteristics after the shrinkage aimed at its compensation.

Keywords

holography, shrinkage, photopolymer, selectivity contour, vector, volume holography, total internal reflection holography

Acknowledgements

The authors thank Dr. Friedrich-Karl Bruder for providing the Bayfol HX holographic medium, as well as for consulting on TIR-holograms recording. The study was sponsored by the RFBR in the framework of the research project No. 18-32-01048. The study was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, State assignment, Passport 2019-1080.

Введение

На сегодняшний день широко распространены голографические среды на основе фотополимеризующихся композитов, подверженные, как правило, явлениям усадки, т. е. изменению линейных размеров и формы голографической среды из-за химических реакций, протекающих в материале вовремя или после голографической записи.

Эффекты усадки голографической среды имеют большое значение в прикладной голографии, так как усадка может значительно влиять на характеристики регистрируемых голограмм и голографических оптических элементов [1]. Существуют способы как минимизации усадки (посредством изменения состава исходной голографической среды [2, 3]), так и ее компенсации при записи [4]. Поскольку состав исходной среды зачастую является носителем множества характеристик, существенных для дальнейшего применения изготавливаемых на основе таких сред голографических элементов, то изменение состава исходной среды с целью минимизации усадки представляется затруднительным. При этом возможность компенсации усадки при записи определяется в каждом конкретном случае степенью проработанности моделей, описывающих соответствующие процессы.

В основном усадка проявляется в фотополимерах и является следствием увеличения плотности материала при полимеризации [5]. Согласно модели, описывающей формирование голограммы в виде процессов фотополимеризации и многокомпонентной диффузии [6], усадку можно рассматривать как следствие высвобождения, диффузии и последующего коллапса свобод-

ного объема внутри голографической среды или на его поверхности. При этом усадка в общем случае может быть анизотропной — действовать неравномерно по различным направлениям. При рассмотрении усадки с этой точки зрения можно интуитивно принять преимущественным направление вдоль наименьшей стороны материала (чаще всего протяженностью по этому направлению определяется толщина голографической среды — d). Это обусловлено тем, что плотность силы, порождаемой атмосферным давлением, будет больше именно в этом направлении.

Однако такое выделенное направление усадки — не единственно возможное. Если свободный объем удовлетворяет определенным условиям, необходимым для его коллапса (например, коллапсирует лишь на границе материала), и диффузионные свойства материала позволяют свободному объему перераспределиться внутри материала, то можно предположить, что направление усадки зависит также и от направления вектора голографической решетки. Это предположение основано на том, что диффузионные свойства мономерной и полимерной фаз отличаются как минимум на несколько порядков (при условии, что запись проводится ниже температуры стеклования полимера). При таких обстоятельствах диффузия свободного объема может происходить быстрее в мономерной фазе вдоль изофазных плоскостей к границе материала. В этом случае эффективное направление усадки может зависеть от направления изофазных плоскостей, т. е. от направления вектора записываемой решетки.

В данной работе представлен метод, позволяющий однозначно определить выделенное направление действия усадки.

Модель направленной усадки

Для корректного анализа процесса направленной усадки, прежде всего необходимо определить непротиворечивую модель ее описания. В работе усадка интерпретируется как мгновенный процесс, происходящий после записи. Это упрощение введено потому, что влияние усадки на голографическую запись является гораздо более сложным с точки зрения его описания; на данном этапе воздержимся от его рассмотрения. Также из анализа исключены внутренние механизмы усадки и следствия из них (к примеру, пространственная неоднородность сжатия полимера), усадка рассматривается с феноменологической точки зрения. Поскольку в работе усадка расценивается как анизотропное сжатие, авторы последовательно описывают ее тензором первого ранга (вектором), действующим на материал.

Усадка как направленный процесс. В работе рассматривается двумерная модель голографической среды, определяемая плоскостью, в которой лежат перпендикуляр к одной из граней материала и вектор решетки. Вектор решетки \mathbf{K} направлен перпендикулярно изофазным голографическим плоскостям, имеет размерность метр в минус первой степени и равен по модулю $|\mathbf{K}| = \frac{2\pi}{\Lambda_n}$, где Λ_n — пространственный период записываемой голограммы. Для описания усадки была выбрана система координат, единичные вектора которой совпадают со сторонами материала (направление, параллельное наименьшей стороне (толщина) обозначается как z , параллельное наибольшей — x (рис. 1). В соответствии с выбранной системой координат, голографическая запись в материале изоморфна по третьему направлению, следовательно, вектор усадки также лежит в плоскости x - z .

Усадка, как направленный процесс, действует на сегмент материала единичной площади и в общем случае может иметь любое направление. Вектор \mathbf{U} , описывающий процесс усадки материала, является безразмерной величиной и равен по модулю $|\mathbf{U}| = \frac{1}{n} - 1$, где n — безразмерный коэффициент усадки ($0 < n < 1$), показывающий отношение площади сегмента до и после усадки. Вектор усадки \mathbf{U} может быть разложен на компоненты U_x и U_z — проекции вектора \mathbf{U} на оси x и z соответственно. Тогда можно рассматривать действие усадки вдоль каждой оси в отдельности, как действие проекций вектора усадки U_x и U_z на единичные отрезки dx и dz . В результате усадки размеры единичных отрезков становятся dx^* и dz^* (рис. 2).

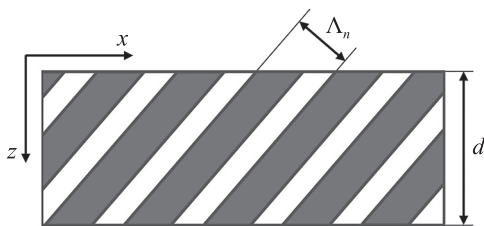


Рис. 1. Выбор системы координат с привязкой к сторонам материала

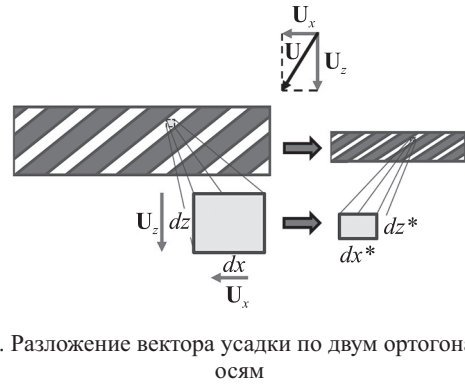


Рис. 2. Разложение вектора усадки по двум ортогональным осям

Для выбора размеров сегмента единичной площади в материале удобно пользоваться проекциями вектора решетки на грани материала: $K_x = \frac{2\pi}{\Lambda_x}$ и $K_z = \frac{2\pi}{\Lambda_z}$, где $\Lambda_x = \frac{\Lambda_n}{\sin(\alpha_{sl})}$, $\Lambda_z = \frac{\Lambda_n}{\cos(\alpha_{sl})}$ — проекции периода на оси x и z (которые также называются поверхностными периодами, рис. 3), и $0 \leq \alpha_{sl} \leq \pi$ — угол отклонения изофазных голографических плоскостей от наибольшей грани материала (α_{sl} можно определять и как угол отклонения вектора решетки от нормали к наибольшей грани материала). Для ненаклонной пропускающей голограммы $\alpha_{sl} = \frac{\pi}{2}$, для ненаклонной отражающей голограммы $\alpha_{sl} = 0$.

При выборе таких сегментов единичной площади результат усадки рассчитывается как

$$\mathbf{K}^* = \mathbf{K} + (\mathbf{K} \circ \mathbf{U}), \tag{1}$$

где \mathbf{K}^* — вектор решетки после усадки, а символ « \circ » обозначает произведение Адамара. Поэлементное произведение $\mathbf{K} \circ \mathbf{U}$ является вектором, показывающим изменение вектора решетки под воздействием эффекта усадки (рис. 4):

$$\mathbf{K}^* - \mathbf{K} = \mathbf{K} \circ \mathbf{U}.$$

Раскладывая векторное уравнение (1) на компоненты по осям базиса, получаем формулы для расчета поверхностных периодов, а также для угла наклона изофазных голографических плоскостей после усадки:

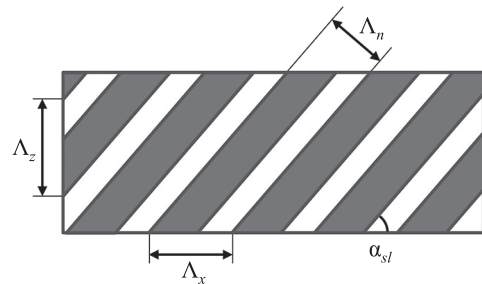


Рис. 3. Определение поверхностных периодов голограммы вдоль осей x и z , а также угла наклона изофазных голографических плоскостей

$$\Lambda_x^* = \frac{\Lambda_x}{1 + \sin(\alpha_u) \left(\frac{1-n}{n} \right)}; \quad (2)$$

$$\Lambda_z^* = \frac{\Lambda_z}{1 + \cos(\alpha_u) \left(\frac{1-n}{n} \right)};$$

$$\alpha_{sl}^* = \arctg \left(\frac{\Lambda_z^*}{\Lambda_x^*} \right), \quad (3)$$

где α_u — угол отклонения вектора усадки \mathbf{U} от оси z .

Для корректного рассмотрения данной модели необходимо обеспечить соответствие направлений векторов решетки и усадки. Как известно, выбор знака вектора решетки \mathbf{K} произволен, поэтому каждому \mathbf{K} соответствуют два угла, отличающиеся на π . При выборе одного из углов положительное направление вектора усадки \mathbf{U} необходимо выбирать таким образом, чтобы $|\mathbf{K}^*| > |\mathbf{K}|$.

Стоит отметить, что вышеописанные уравнения не будут работать корректно при $\alpha_{sl} = \frac{\pi}{2}$ (ненаклонная пропускающая голограмма), а также при $\alpha_{sl} = 0$ (отражательная голограмма Липпмана), так как в этих случаях одна из проекций вектора решетки будет равна нулю, поэтому область определения угла наклона изофазных голографических плоскостей не должна включать в себя эти значения (строгое $0 < \alpha_{sl} < \pi$). Для расчета влияния усадки в таких случаях можно положить $\alpha_{sl} = \delta_a$ для ненаклонной отражательной голограммы, и $\alpha_{sl} = \frac{\pi}{2} - \delta_a$ для ненаклонной пропускающей голограммы, где в обоих случаях δ_a является бесконечно малой положительной величиной (в пределе $\delta_a \rightarrow +0$).

Помимо влияния на вектор решетки, усадка также влияет на толщину голограммы. Для расчета толщины голограммы после усадки применяется формула

$$d^* = d \frac{\Lambda_z^*}{\Lambda_z} = \frac{d}{1 + \cos(\alpha_u) \left(\frac{1-n}{n} \right)}. \quad (4)$$

Влияние усадки различных направлений на параметры голограмм. Рассмотрим, каким образом различные направления усадки могут влиять на параметры голограммы.

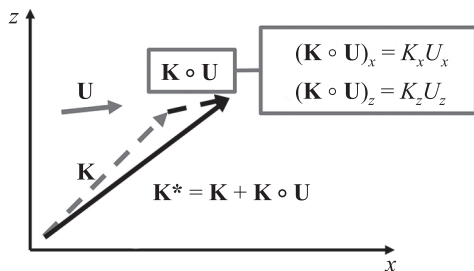


Рис. 4. Графический пример влияния вектора усадки на вектор решетки

Поскольку определить реальное направление действия усадки в материале возможно лишь экспериментально, то в анализе авторы отталкивались от измеряемых параметров голограмм. В эксперименте можно измерить:

- 1) толщину голограммы d^* :
 - напрямую посредством измерения толщины материала;
 - косвенно — по аппроксимации контуров угловой селективности при помощи теории связанных волн Когельника [7];
- 2) поверхностный период голограммы Λ_x^* :
 - опосредованно, но с хорошей точностью, по определению угла дифракции в зависимости от угла падения восстанавливающего излучения;
- 3) угол наклона изофазных голографических плоскостей α_{sl}^* :
 - опосредованно, но с хорошей точностью, по определению максимума дифракционной эффективности на контуре угловой селективности, зная при этом Λ_x^* .

Исходную толщину материала d можно определить только при помощи прямого измерения, тогда как Λ_x и α_{sl} могут быть рассчитаны исходя из условий записи.

Необходимо отметить, что измерение толщины d^* и поверхностного периода голограммы Λ_x^* после усадки для некоторых материалов может давать не вполне корректные результаты. Для тонких материалов (толщиной менее 10 мкм) прямое измерение толщины с высокой точностью не представляется возможным, а аппроксимация контуров селективности при помощи теории связанных волн Когельника может быть некорректной ввиду того, что в большинстве случаев голограммы, записанные в материалах толщиной менее 10 мкм, уже не могут рассматриваться, как толстые (критерий Клейна менее 10) [8]. Поверхностный период Λ_x^* также не всегда изменяется вследствие усадки, так как некоторые материалы (например, фотополимеры с «ортогональной химией» [9], сочетающие в себе два не влияющих друг на друга механизма полимеризации) закреплены одной или обеими поверхностями на жесткой подложке, что затрудняет поверхностные изменения. Изменение угла наклона изофазных голографических плоскостей α_{sl}^* , напротив, происходит в объеме, и значения α_{sl}^* , полученные путем аппроксимации контуров селективности первого порядка дифракции, остаются корректными даже для голограмм, у которых критерий Клейна менее 10, так как α_{sl}^* зависит не от формы, а от положения (максимума) контура селективности.

В связи с этим единственный измеряемый параметр, на оценку которого можно корректно опираться для определения направления усадки — это изменение угла наклона изофазных голографических плоскостей:

$$\Delta\alpha_{sl} = \alpha_{sl}^* - \alpha_{sl}. \quad (5)$$

В работе не будут рассмотрены полностью произвольные направления усадки, поскольку наибольший практический интерес представляют те, которые, по мнению авторов, могут быть наиболее вероятными. Можно выделить четыре таких случая в соответствии с четырьмя направлениями рассматриваемой системы:

вдоль x , вдоль z , вдоль \mathbf{K} , и перпендикулярно \mathbf{K} (вдоль направления изофазных голографических плоскостей), а также случай изотропной усадки.

1. В случае действия усадки вдоль оси x имеем $\alpha_u = \frac{\pi}{2}$, $\sin(\alpha_u) = 1$ и $\cos(\alpha_u) = 0$. Тогда уравнения (2)–(4) принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} \Lambda_x^* &= \Lambda_x n; \\ d^* &= d; \\ \alpha_{sl}^* &= \arctg\left(\frac{\text{tg}(\alpha_{sl})}{n}\right). \end{aligned}$$

Поскольку $n \leq 1$, то $\Delta\alpha_{sl} \geq 0$ (рис. 5, а).

2. В случае воздействия усадки вдоль оси z имеем $\alpha_u = 0$, $\sin(\alpha_u) = 0$ и $\cos(\alpha_u) = 1$. Тогда уравнения (2)–(4) принимают следующий вид:

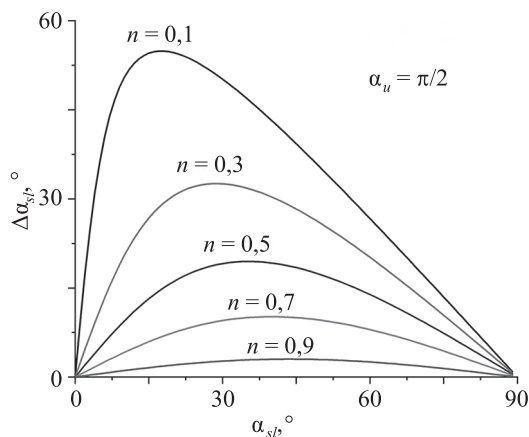
$$\begin{aligned} \Lambda_x^* &= \Lambda_x; \\ d^* &= dn; \\ \alpha_{sl}^* &= \arctg(\text{tg}(\alpha_{sl})n). \end{aligned}$$

Поскольку $n \leq 1$, то $\Delta\alpha_{sl} \leq 0$ (рис. 5, б). При этом в обоих случаях усадка линейно влияет на тангенс угла, из-за чего итоговая зависимость коэффициента усадки от угла является нелинейной.

3. В случае сонаправленности вектора усадки и вектора решетки \mathbf{K} , имеем $\alpha_u = \alpha_{sl}$, $\sin(\alpha_u) = \sin(\alpha_{sl})$ и $\cos(\alpha_u) = \cos(\alpha_{sl})$. Тогда уравнения (2)–(4) принимают вид:

$$\begin{aligned} \Lambda_x^* &= \frac{\Lambda_x}{1 + \sin(\alpha_{sl})\left(\frac{1-n}{n}\right)}; \\ d^* &= \frac{d}{1 + \cos(\alpha_{sl})\left(\frac{1-n}{n}\right)}; \\ \alpha_{sl}^* &= \arctg\left(\frac{\text{tg}(\alpha_{sl})\left(\frac{1-n}{n}\right)}{1 + \cos(\alpha_{sl})\left(\frac{1-n}{n}\right)}\right). \end{aligned}$$

а



4. В случае, когда вектор усадки направлен перпендикулярно \mathbf{K} , имеем $\alpha_u = \frac{\pi}{2}$, $\sin(\alpha_u) = \cos(\alpha_{sl})$ и $\cos(\alpha_u) = \sin(\alpha_{sl})$. Тогда уравнения (2)–(4) принимают вид:

$$\begin{aligned} \Lambda_x^* &= \frac{\Lambda_x}{1 + \cos(\alpha_{sl})\left(\frac{1-n}{n}\right)}; \\ d^* &= \frac{d}{1 + \sin(\alpha_{sl})\left(\frac{1-n}{n}\right)}; \\ \alpha_{sl}^* &= \arctg\left(\frac{\text{tg}(\alpha_{sl})\left(\frac{1-n}{n}\right)}{1 + \sin(\alpha_{sl})\left(\frac{1-n}{n}\right)}\right). \end{aligned}$$

5. В случае ненаправленной усадки угол α_u не имеет смысла, и полагаем, что $\sin(\alpha_u) = \cos(\alpha_u) = 1$. Тогда формулы для определения измеряемых параметров голограмм приобретают следующую форму: $\Lambda_x^* = \Lambda_x n$, $d^* = dn$ и $\alpha_{sl}^* = \alpha_{sl}$. Таким образом, в случае изотропной усадки имеем $\Delta\alpha_{sl} = 0$ вне зависимости от параметров голограмм или коэффициента усадки. Полагая, что

$$n^+ = \frac{1 + \sin(\alpha_{sl})\left(\frac{1-n}{n}\right)}{1 + \cos(\alpha_{sl})\left(\frac{1-n}{n}\right)},$$

имеем

$$\alpha_{sl}^* = \arctg(\text{tg}(\alpha_{sl})n^+)$$

для усадки вдоль \mathbf{K} , и

$$\alpha_{sl}^* = \arctg\left(\frac{\text{tg}(\alpha_{sl})}{n^+}\right)$$

для усадки перпендикулярно \mathbf{K} .

б

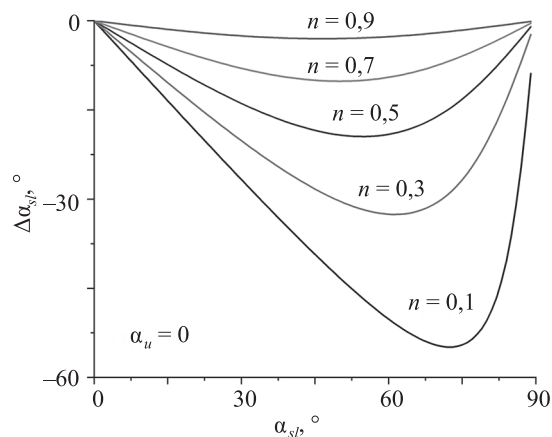


Рис. 5. Характер изменения угла наклона голографических плоскостей в зависимости от коэффициента усадки (n), если вектор усадки направлен: вдоль оси x (а); вдоль оси z (б)

Рассмотрим коэффициент n^+ подробнее. Прежде всего, можно заметить, что $n^+ = 1$ при $\alpha_{sl} = \frac{\pi}{4}$. В этом случае $\Delta\alpha_{sl} = 0$ для обоих направлений: $n^+ > 1$ при $\alpha_{sl} > \frac{\pi}{4}$ и $n^+ < 1$ при $\alpha_{sl} < \frac{\pi}{4}$. Таким образом, $\Delta\alpha_{sl} < 0$ при $\alpha_{sl} < \frac{\pi}{4}$, и $\Delta\alpha_{sl} > 0$ при $\alpha_{sl} > \frac{\pi}{4}$ для случая сонаправленности **U** и **K** (рис. 6, а). Для усадки перпендикулярно **K**, напротив, $\Delta\alpha_{sl} > 0$ при $\alpha_{sl} < \frac{\pi}{4}$ и $\Delta\alpha_{sl} < 0$ при $\alpha_{sl} > \frac{\pi}{4}$ (рис. 6, б).

При анализе зависимости $\Delta\alpha_{sl}$ от α_{sl} для различных направлений векторов усадки становится понятно, что однозначно определить направление вектора усадки из одной голограммы не представляется возможным. Однако если произвести измерение углов наклона голографических плоскостей двух голограмм (α_{sl1}^* и α_{sl2}^*), при условии, что $\alpha_{sl1} < \frac{\pi}{4}$ и $\alpha_{sl2} > \frac{\pi}{4}$, то рассмотренные выше пять случаев усадки становятся однозначно различимы (табл. 1).

Далее в работе описан и проведен эксперимент, в ходе которого осуществляется одновременная запись двух голограмм, удовлетворяющих условию, необходимому для однозначного определения направления усадки.

Экспериментальное определение направления усадки

Эксперимент по определению усадки заключается в одновременной записи двух голограмм за счет эффекта полного внутреннего отражения (ПВО-голограммы) с одинаковым поверхностным периодом при помощи прямоугольной призмы, и последующим считыванием контуров угловой селективности первого порядка дифракции.

Описание эксперимента по записи ПВО-голограмм. Эксперимент с записью ПВО-голограмм впервые был предложен Стетсоном [10]. Голографическая запись в ходе такого эксперимента производится при помощи прямоугольной равнобедренной призмы (призма Порро). Голографический материал устанавливается на грани призмы с ребром-гипотенузой в основании при помощи иммерсии или оптического контакта таким образом, чтобы создать границу раздела сред призма — голографический материал (рис. 7). Один из лучей (луч 1 на рис. 7) при записи падает на голографический материал по нормали из воздуха. Другой луч (луч 2 на рис. 7) падает по нормали на грань призмы с ребром-катетом при основании, и попадает в материал со стороны призмы, образуя с первым лучом угол приблизительно равный $\frac{3\pi}{4}$.

Луч 2 (рис. 8) испытывает эффект полного внутреннего отражения на границе голографический материал — воздух, после чего отраженный луч 2' снова

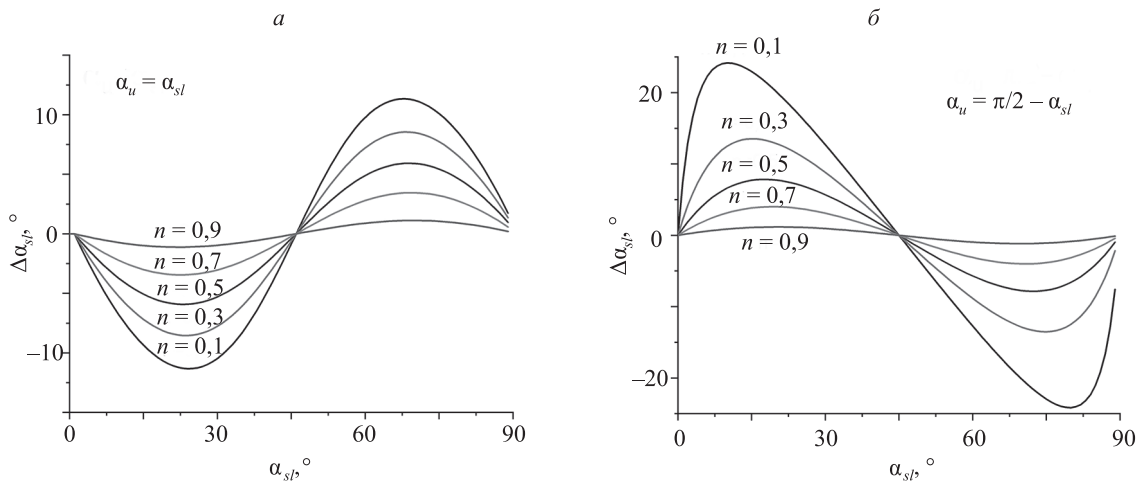


Рис. 6. Характер изменения угла наклона голографических плоскостей в зависимости от коэффициента усадки (n) для двух случаев: вектор усадки направлен вдоль вектора решетки **K** (а); перпендикулярно вектору **K** (б)

Таблица 1. Изменение угла наклона изофазных голографических плоскостей голограммы в зависимости от направления усадки

Угол наклона плоскостей	Изотропная усадка	Усадка вдоль x	Усадка вдоль z	Усадка вдоль K	Усадка перпендикулярно K
$\alpha_{sl1} < \frac{\pi}{4}$	$\Delta\alpha_{sl1} = 0$	$\Delta\alpha_{sl1} > 0$	$\Delta\alpha_{sl1} < 0$	$\Delta\alpha_{sl1} < 0$	$\Delta\alpha_{sl1} > 0$
$\alpha_{sl2} > \frac{\pi}{4}$	$\Delta\alpha_{sl2} = 0$	$\Delta\alpha_{sl2} > 0$	$\Delta\alpha_{sl2} < 0$	$\Delta\alpha_{sl2} > 0$	$\Delta\alpha_{sl2} < 0$

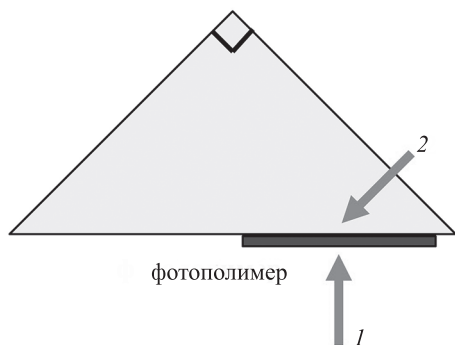


Рис. 7. Схематическое изображение записи ПВО-голограммы при помощи призмы Порро

проходит через материал, образуя с лучом 1 угол приблизительно равный $\frac{\pi}{4}$.

Из геометрии записи следует, что во время эксперимента одновременно могут быть сформированы три разных голограммы-решетки. Лучи 1 и 2 формируют отражательную голограмму ($\alpha_{s1} \approx \frac{\pi}{8}$), в то время как лучи 1 и 2' формируют пропускающую голограмму ($\alpha_{s2} \approx \frac{3\pi}{8}$). При этом обе голограммы имеют одинаковый поверхностный период Λ_x . Третья голограмма образована лучами 2 и 2' и является ненаклонной отражательной голограммой. В данном эксперименте она является паразитной, и от нее необходимо избавиться. Для этого поляризация луча 2 повернута на $\frac{\pi}{2}$.

Описанное действие приводит к тому, что поляризации лучей 2 и 2' лежат в одной плоскости с ними (лучами), и контраст интерференционной картины в этом случае будет равен 0 [11].

Как можно заметить, в случае подобной записи в голографическом материале одновременно образуются две голограммы-решетки, которые удовлетворяют условиям для определения направления усадки ($\alpha_{s1} > \frac{\pi}{4}$, $\alpha_{s2} < \frac{\pi}{4}$). Однако эти голограммы имеют одинаковый поверхностный период Λ_x , это означает, что при восстановлении на длине волны записи контуры селективности голограмм будут частично или полностью перекрываться, что заметно осложнит определение углов наклона голографических плоскостей.

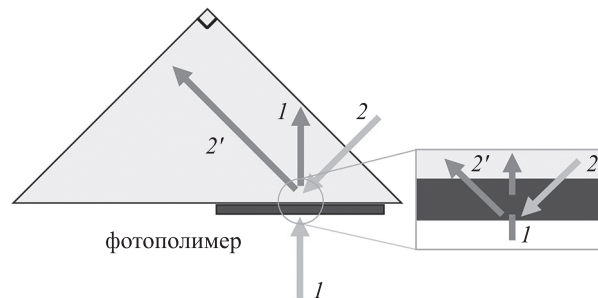


Рис. 8. Схематическое изображение хода лучей внутри голографического материала во время эксперимента

В связи с этим измерение контуров угловой селективности целесообразно проводить при помощи света с длиной волны, отличающейся от длины волны записи.

Голографическая среда. В качестве голографического материала в работе был использован фотополимер Bayfol HX [12]. Данный фотополимер реализует принцип «ортогональной химии», включающий два независимых механизма полимеризации. Один из них, с меньшей константой скорости, инициируется за счет теплового воздействия и служит для формирования полимерной матрицы (связующего, binder), внутри которой впоследствии при записи голограммы развивается второй процесс — пространственно неоднородная радикальная фотополимеризация. Материал Bayfol HX 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. Хорошая адгезия слоя и к полимерной пленке, и к стеклу препятствует его усадке в направлении x и, как следствие, изменению поверхностного периода Λ_x .

Светочувствительность материала распространяется на всю видимую область; спектр его пропускания с минимумами на 515, 610 и 655 нм показан на рис. 9.

Во время записи активированный фотоинициатор прежде всего реагирует с находящимся в композиции и более химически активным кислородом, что препятствует полимеризации [12]. Диффузия кислорода через покрывающую светочувствительный слой полимерную пленку обеспечивает его постоянный приток, из-за чего для Bayfol HX характерен порог фотополимеризации по плотности мощности экспозиции. Пороговое значение плотности мощности зависит от длины волны

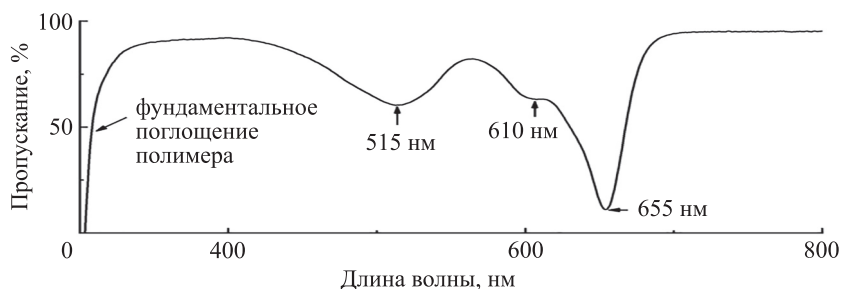


Рис. 9. Спектр пропускания Bayfol HX 200, измеренный при помощи спектрофотометра Shimadzu UV3600

излучения, материала покровного слоя и его толщины, и составляет $0,1-2$ мВт/см². Помимо пороговой плотности мощности, Bayfol HX также обладает пороговой плотностью энергии экспозиции, которая зависит от длины волны излучения и составляет $1-2$ мДж/см².

Формирование голограмм в Bayfol HX основано на процессе фотоиндуцированного разделения фаз [13], сочетающем в себе фотополимеризацию и диффузию. Благодаря данному механизму максимально возможная модуляция показателя преломления при голографической записи $\Delta n \approx 0,035$, что является рекордно высоким значением для голографических фотополимеров. Это позволяет достигать значений дифракционной эффективности более 50 % даже в материале толщиной в единицы микрометров. Однако в силу небольшой толщины материала и высокой модуляции показателя преломления, анализ контуров селективности голограмм, записанных в Bayfol HX, при помощи теории связанных волн Когельника может давать некорректные результаты по определению толщины голограммы ввиду несоблюдения двух условий применимости теории: не выполняются требования к толщине (критерий Клейна больше 10) и модуляции преломления ($\Delta n \ll n_0$) [14]. Таким образом, определение толщины материала после усадки d^* при помощи аппроксимации контуров угловой селективности не может считаться точным, прямое измерение толщины также не может быть выполнено с достаточной точностью ввиду малой толщины материала, а интерференционное измерение исходной толщины d в видимом диапазоне длин волн не может быть выполнено в силу высокой светочувствительности материала.

В данной работе использован материал Bayfol HX 200¹, состоящий из фотополимерного слоя толщиной 4 мкм, находящегося между полимерными пленками из триацетата целлюлозы толщиной 60 мкм и полиэтилена толщиной 100 мкм. Полиэтиленовая пленка удаляется непосредственно перед накаткой на стеклянную поверхность.

Условия проведения эксперимента.

Голографическая запись ПВО-голограмм была реализована лазерным источником постоянного излучения с диодной накачкой на Nd:YAG и удвоением частоты ($\lambda_{\text{записи}} = 532$ нм) в двулучевой схеме с использованием прямоугольной призмы (рис. 10).

Материал был накатан на гипотенузную грань призмы. Углы между гранями призмы γ , β и δ были предварительно измерены автоколлимационным методом с погрешностью $\pm 15''$ для последующего расчета исходных параметров голограмм. Пучок света 1 падал на материал по нормали из воздуха, тогда как пучок 2 падал по нормали на катетную грань призмы. Поляризация пучка 2 была повернута на $\frac{\pi}{2}$ для того, чтобы нивелировать интерференцию между пучком 2

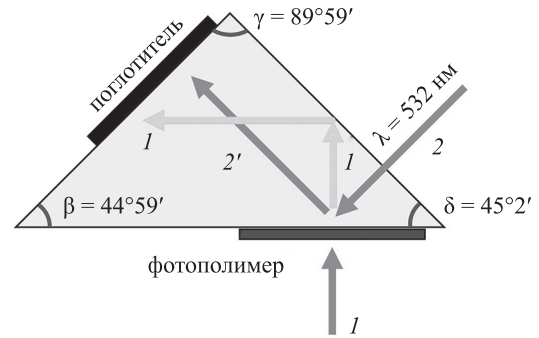


Рис. 10. Схематичное изображение геометрии записи голограмм в эксперименте

и отраженным от границы материал — воздух пучком 2'. Плотность мощности каждого из пучков 1 и 2 составила 1 мВт/см². На вторую катетную грань призмы был накатан поглощающий материал для подавления образования паразитных голограмм вследствие последующих отражений внутри призмы. Общее время экспозиции в эксперименте составило 1 с, что позволило преодолеть порог по плотности мощности и плотности энергии. Однако эффективное время экспозиции в этом случае составило порядка 0,1 с, из-за чего процесс усадки (который по нашим оценкам занимает порядка 1 с), можно считать происходящим в большей степени не во время записи, а после нее.

После записи материал подвергался фотообесцвечиванию для трансформации непрореагировавших фотоинициаторов. Во время этого процесса материал оставался накатанным на призму. Затем для определения Λ_x^* автоколлимационным методом с погрешностью $\pm 15''$ был измерен угол дифракции. Восстанавливающий луч света с длиной волны 457 нм падал на образец по нормали из воздуха. Наконец, при помощи того же источника был измерен контур угловой селективности первого порядка дифракции в диапазоне углов от -5° до 30° (положительное изменение угла против часовой стрелки) относительно нормали к материалу (рис. 11).

Сканирование по углу осуществлялось с шагом 2' при помощи поворота призмы посредством автоматизированного электромеханического поворотного столика. Фотоприемник находился в стационарном положении, тогда как дифрагированное излучение попадало в него при помощи фокусирующей оптической системы.

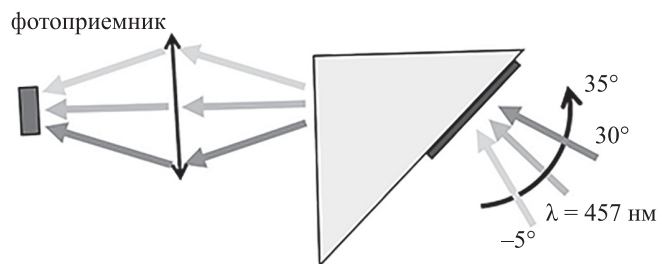


Рис. 11. Принципиальная схема измерения контура угловой селективности исследуемого образца

¹ Covestro С.О. Bayfol® HX200 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://solutions.covestro.com/-/media/covestro/solution-center/products/datasheets/imported/bayfol/bayfol-hx200_en_86194384-20033146-20033738.pdf, свободный. Яз. англ. (дата обращения 17.04.2020).

Результаты

Для определения исходных характеристик голограмм были точно измерены основные параметры при проведении эксперимента. Угол между гранями призмы с катетами при основании составил $89^{\circ}59'$, угол между гранью, на которую накатан голографический материал, и гранью, через которую производилась запись, составил $45^{\circ}2'$. Показатели преломления всех материалов, необходимые для расчета, приведены в табл. 2.

Таким образом, расчетный поверхностный период интерференционной картины во время экспозиции вдоль оси x $\Lambda_x = 494,77 \pm 0,01$ нм. Расчетные углы наклона интерференционных картин $\alpha_{sl(1+2)} = 22^{\circ}55' \pm 30''$ и $\alpha_{sl(1+2)'} = 67^{\circ}5' \pm 30''$ для отражательной и пропускающей голограмм соответственно.

Измеренный контур селективности первого порядка дифракции обеих голограмм был аппроксимирован при помощи теории связанных волн Когельника (рис. 12). В ходе аппроксимации контур каждой голограммы обрабатывался отдельно.

Наблюдаемые на измеренном контуре интерференционные биения связаны с тем, что дифрагированные лучи от отражательной и пропускающей голограмм распространяются в одном направлении, но проходят разный оптический путь и интерferируют друг с другом на фотоприемнике. По угловой частоте этих

биений можно достаточно точно определить толщину покровного слоя материала.

В результате аппроксимации представленных контуров были получены значения для углов наклона голографических плоскостей после усадки (табл. 3). По полученным значениям угла ориентации голографических плоскостей в материале до процесса усадки и после, проведена оценка влияния процесса усадки на эту величину по формуле (5).

Поскольку $\Delta\alpha_{sl} < 0$ для обеих голограмм, можно заключить, что действие усадки в данном голографическом материале направлено вдоль оси z — толщины материала, что согласуется с общепринятым знанием относительно действия усадки в тонких голографических средах.

Заключение

В работе представлен подход, позволяющий рассчитать эффект процесса усадки, происходящего в различных направлениях, влияющие на основные параметры голограмм и голографического материала. За основу подхода принято представление об усадке, как об анизотропном сжатии, характеризующемся вектором, воздействующим на вектор голографической решетки. В рамках данного подхода рассмотрены четыре моде-

Таблица 2. Показатели преломления оптических сред n , задействованных в эксперименте на двух длинах волн

Длина волны, нм	Материал		
	Призма	Bayfol HX до записи	Bayfol HX после записи
532	1,520	1,499	1,504
457	1,525	1,507	1,512

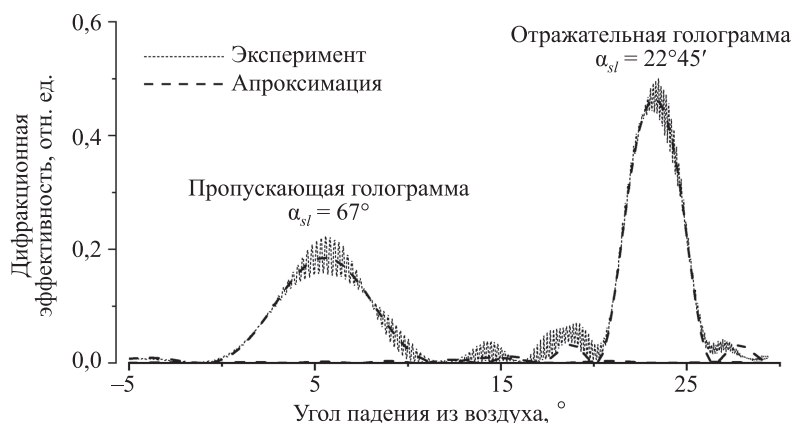


Рис. 12. Экспериментально измеренный контур угловой селективности записанной пары голограмм (пунктирная линия) и его аппроксимация по теории связанных волн Когельника (штриховая линия)

Таблица 3. Значения углов наклона голографических плоскостей до и после усадки материала, а также разность этих величин

Тип голограммы	α_{sl}	α_{sl}^*	$\Delta\alpha_{sl}$
отражательная	$22^{\circ}55' \pm 30''$	$22^{\circ}45' \pm 3'$	$-10' \pm 3'30''$
пропускающая	$67^{\circ}5' \pm 30''$	$67^{\circ} \pm 3'$	$-5' \pm 3'30''$

ли, и для каждой проанализировано влияние усадки материала на основные параметры голограмм в зависимости от угла наклона изофазных голографических плоскостей при различных коэффициентах усадки. За основные возможные направления усадки выбраны четыре случая: вдоль двух сторон материала, а также вдоль и поперек вектора решетки. Предложен простой экспериментальный подход для однозначного определения направления усадки по изменению угла наклона изофазных голографических плоскостей. Результаты измерений показали, что в исследованном материале усадка в основном направлена вдоль оси, привязанной к толщине материала.

Стоит отметить, что изменение угла наклона изофазных голографических плоскостей для отражательной голограммы практически в два раза больше по модулю, чем для пропускающей, тогда как в соответствии с моделью, рассматривающей воздействие усадки исключительно вдоль оси z , они должны быть приблизительно одной величины. Для того чтобы теоретически полученные значения $\Delta\alpha_{s,l}$ совпали с экспериментальными, вектор усадки должен быть немного повернут в сторону вектора решетки. В работе авторы не рассматривали случаи усадки в произвольном направлении.

Можно предположить, что направление вектора усадки определяется несколькими факторами. Основным можно считать отношение плотностей силы, действующих на внешние грани материала. Зависимость направления усадки от ориентации вектора решетки

в материале может проявиться для толстых решеток с критерием Клейна более 10. Для исследования влияния как изменения отношения плотностей силы, так и увеличения критерия Клейна необходим анализ голограмм, записанных в материале большей толщины (0,1–5 мм). Также представляет интерес анализ направления усадки в голографических материалах, не закрепленных одной или обеими гранями на жесткой подложке. В отсутствие жесткой подложки можно рассчитывать на наблюдение поверхностных изменений, что позволит исследовать вопросы взаимного влияния усадки нескольких голограмм, записанных одновременно, в случае если направление усадки связано с ориентацией вектора решетки в голографическом материале.

Допущение о неодновременности процессов экспонирования и усадки среды в эксперименте не является до конца подтвержденным. Для большей чистоты эксперимента целесообразно проводить запись с большей плотностью мощности излучения (более 10 мВт/см²). Наконец, методика определения угла наклона изофазных голографических плоскостей по аппроксимации контуров селективности не является достаточно точной для определения изменений угла наклона при малой усадке. Гораздо более точным является чисто геометрическое определение угла наклона изофазных плоскостей при измерении контура дифракционного отклика в +1 и –1 порядках дифракции. Эти вопросы заслуживают более глубокого рассмотрения и являются предметом будущего исследования.

Литература

1. Bruder F.K., Bang H., Fäcke T., Hagen R., Hönel D., Orselli E., Rewitz C., Rölle T., Vukicevic D., Walze G. Precision holographic optical elements in Bayfol® HX photopolymer // *Proceedings of SPIE*. 2016. V. 9771. P. 977103. doi: 10.1117/12.2209636
2. Smirnova T.N. Photopolymers for holography: interconnection between holographic characteristics and parameters of physical-chemical processes causing recording // *Proceedings of SPIE*. 1999. V. 3733. P. 364–373. doi: 10.1117/12.340083
3. Lee S., Jeong Y.-C., Heo Y., Kim S.I., Choi Y.-S., Park J.-K. Holographic photopolymers of organic/inorganic hybrid interpenetrating networks for reduced volume shrinkage // *Journal of Materials Chemistry*. 2009. V. 19. N 8. P. 1105–1114. doi: 10.1039/B815743J
4. Zhao C., Liu J., Fu Z., Chen R.T. Shrinkage-corrected volume holograms based on photopolymeric phase media for surface-normal optical interconnects // *Applied Physics Letters*. 1997. V. 71. N 11. P. 1464–1466. doi: 10.1063/1.119937
5. Veniaminov A.V., Mahilny U.V. Holographic polymer materials with diffusion development: principles, arrangement, investigation, and applications // *Optics and Spectroscopy*. 2013. V. 115. N 6. P. 906–930. doi: 10.1134/S0030400X13120199
6. Dyuryagina A.B., Borisov V.N., Shurygina N.A., Veniaminov A.V., Lesnichii V.V. Extended model of photopolymerization and multicomponent diffusion during holographic recording // *Proc. of the Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*. 2018. P. 8604429. doi: 10.1109/WECONF.2018.8604429
7. Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings // *Landmark Papers on Photorefractive Nonlinear Optics*. 1995. P. 133–171. doi: 10.1142/9789812832047_0016
8. Gaylord T.K., Moharam M.G. Thin and thick gratings: terminology clarification // *Applied Optics*. 1981. V. 20. N 19. P. 3271–3273. doi: 10.1364/AO.20.003271

References

1. Bruder F.K., Bang H., Fäcke T., Hagen R., Hönel D., Orselli E., Rewitz C., Rölle T., Vukicevic D., Walze G. Precision holographic optical elements in Bayfol® HX photopolymer. *Proceedings of SPIE*, 2016, vol. 9771, pp. 977103. doi: 10.1117/12.2209636
2. Smirnova T.N. Photopolymers for holography: interconnection between holographic characteristics and parameters of physical-chemical processes causing recording. *Proceedings of SPIE*, 1999, vol. 3733, pp. 364–373. doi: 10.1117/12.340083
3. Lee S., Jeong Y.-C., Heo Y., Kim S.I., Choi Y.-S., Park J.-K. Holographic photopolymers of organic/inorganic hybrid interpenetrating networks for reduced volume shrinkage. *Journal of Materials Chemistry*, 2009, vol. 19, no. 8, pp. 1105–1114. doi: 10.1039/B815743J
4. Zhao C., Liu J., Fu Z., Chen R.T. Shrinkage-corrected volume holograms based on photopolymeric phase media for surface-normal optical interconnects. *Applied Physics Letters*, 1997, vol. 71, no. 11, pp. 1464–1466. doi: 10.1063/1.119937
5. Veniaminov A.V., Mahilny U.V. Holographic polymer materials with diffusion development: principles, arrangement, investigation, and applications. *Optics and Spectroscopy*, 2013, vol. 115, no. 6, pp. 906–930. doi: 10.1134/S0030400X13120199
6. Dyuryagina A.B., Borisov V.N., Shurygina N.A., Veniaminov A.V., Lesnichii V.V. Extended model of photopolymerization and multicomponent diffusion during holographic recording. *Proc. of the Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 2018, pp. 8604429. doi: 10.1109/WECONF.2018.8604429
7. Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings. *Landmark Papers on Photorefractive Nonlinear Optics*, 1995, pp. 133–171. doi: 10.1142/9789812832047_0016
8. Gaylord T.K., Moharam M.G. Thin and thick gratings: terminology clarification. *Applied Optics*, 1981, vol. 20, no. 19, pp. 3271–3273. doi: 10.1364/AO.20.003271

9. Corrigan N., Yeow J., Judzewitsch P., Xu J., Boyer C. Seeing the light: Advancing materials chemistry through photopolymerization // *Angewandte Chemie — International Edition*. 2019. V. 58. N 16. P. 5170–5189. doi: 10.1002/anie.201805473
 10. Stetson K.A. Holography with total internally reflected light // *Applied Physics Letters*. 1967. V. 11. N 7. P. 225–226. doi: 10.1063/1.1755109
 11. Ehbets P., Herzig H.P., Dändliker R. TIR holography analyzed with coupled wave theory // *Optics Communications*. 1992. V. 89. N 1. P. 5–11. doi: 10.1016/0030-4018(92)90238-M
 12. Bruder F.-K., Fäcke T., Rölle T. The chemistry and physics of Bayfol® HX film holographic photopolymer // *Polymers*. 2017. V. 9. N 10. P. 472. doi: 10.3390/polym9100472
 13. Lee J.C. Polymerization-induced phase separation // *Physical Review E*. 1999. V. 60. N 2. P. 1930–1935. doi: 10.1103/PhysRevE.60.1930
 14. Gaylord T.K., Moharam M.G. Planar dielectric grating diffraction theories // *Applied Physics B*. 1982. V. 28. N 1. P. 1–14. doi: 10.1007/BF00693885
9. Corrigan N., Yeow J., Judzewitsch P., Xu J., Boyer C. Seeing the light: Advancing materials chemistry through photopolymerization. *Angewandte Chemie — International Edition*, 2019, vol. 58, no. 16, pp. 5170–5189. doi: 10.1002/anie.201805473
 10. Stetson K.A. Holography with total internally reflected light. *Applied Physics Letters*, 1967, vol. 11, no. 7, pp. 225–226. doi: 10.1063/1.1755109
 11. Ehbets P., Herzig H.P., Dändliker R. TIR holography analyzed with coupled wave theory. *Optics Communications*, 1992, vol. 89, no. 1, pp. 5–11. doi: 10.1016/0030-4018(92)90238-M
 12. Bruder F.-K., Fäcke T., Rölle T. The chemistry and physics of Bayfol® HX film holographic photopolymer. *Polymers*, 2017, vol. 9, no. 10, pp. 472. doi: 10.3390/polym9100472
 13. Lee J.C. Polymerization-induced phase separation. *Physical Review E*, 1999, vol. 60, no. 2, pp. 1930–1935. doi: 10.1103/PhysRevE.60.1930
 14. Gaylord T.K., Moharam M.G. Planar dielectric grating diffraction theories. *Applied Physics B*, 1982, vol. 28, no. 1, pp. 1–14. doi: 10.1007/BF00693885

Авторы

Борисов Владимир Николаевич — аспирант, младший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57016235200, ORCID ID: 0000-0003-3525-5698, borisov.itmo@gmail.com

Окунь Роман Александрович — аспирант, Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, 119991, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0003-2461-9978, romaokun@rambler.ru

Бородина Любовь Николаевна — лаборант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0003-2494-6987, lborodina98@mail.ru

Лесничий Василий Валерьевич — аспирант, Университет Фрайбурга, Фрайбург, 79104, Германия, ORCID ID: 0000-0002-0121-6968, vasilii.lesnichii@physchem.uni-freiburg.de

Authors

Vladimir N. Borisov — Postgraduate, Junior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57016235200, ORCID ID: 0000-0003-3525-5698, borisov.itmo@gmail.com

Roman A. Okun — Postgraduate, Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow, 119991, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0003-2461-9978, romaokun@rambler.ru

Liubov N. Borodina — Laboratory Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0003-2494-6987, lborodina98@mail.ru

Vasilii V. Lesnichii — Postgraduate, Albert Ludwig University of Freiburg, Freiburg, 79104, Germany, ORCID ID: 0000-0002-0121-6968, vasilii.lesnichii@physchem.uni-freiburg.de