

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИМЕРНЫХ РЕФРАКЦИОННЫХ
РЕНТГЕНОВСКИХ ЛИНЗ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ДВУХФОТОННОЙ
ПОЛИМЕРИЗАЦИИ: ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ КОНФОКАЛЬНОЙ
ЛАЗЕРНОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ МИКРОСКОПИИ

Р. П. Матитал¹, Д. А. Щербаков¹, Д. А. Колымагин¹, А. Г. Витухновский^{1,2}, А. В. Грищенко^{1,2}

Точность геометрической формы рефракционных элементов имеет решающее значение для оптимальных фокусирующих характеристик составных рентгеновских линз. Достижение точного контроля над формой элементов в процессе двухфотонной полимеризации методом прямого лазерного письма (TPP DLW) представляет значительную сложность вследствие комплексной зависимости от параметров процесса и трудностей внутренней визуализации. Настоящая работа посвящена изготовлению рядов трёхмерных полимерных параболических линз с радиусами кривизны в вершине параболы $R = 2$ и 5 мкм на основе фотокомпозиции PETA/4Met-BAC при мощностях лазерного излучения от 4 до 9 мВт, а также исследованию их морфологии методом конфокальной лазерной сканирующей микроскопии (CLSM). Показано, что CLSM позволяет проводить неразрушающий трёхмерный анализ структур и точно оценивать геометрические отклонения, вызванные усадкой полимера. Все изготовленные структуры демонстрируют изотропную усадку, величина которой зависит как от проектного радиуса кривизны, так и от мощности лазерного излучения: для линз с $R = 5$ мкм она составляет 5.3–6.0%, для $R = 2$ мкм возрастает до 8.0% при минимальной мощности. Снижение мощности лазерной печати уменьшает размер вокселя и значительно улучшает точность воспроизведения формы: относительное отклонение измеренного радиуса от проектного снижается с 34 до 18% ($R = 5$ мкм). CLSM в сочетании с количественным анализом изображений является эффективным инструментом оптимизации параметров двухфотонной литографии и контроля качества элементов рентгеновской оптики.

Ключевые слова: конфокальная лазерная сканирующая микроскопия, двухфотонная полимеризация, прямое лазерное письмо, рентгеновские линзы, рефракционная оптика, усадка полимера.

¹ МФТИ (национальный исследовательский университет), 141700 Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9; e-mail: scherbakov.da@phystech.edu.

² ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53.

1. *Введение.* Развитие современных методов визуализации и диагностики материалов неразрывно связано с совершенствованием рентгеновской оптики, открывающей уникальные возможности для изучения структуры вещества на микро- и наномасштабе. Устройства микро- и нанофокусировки, основанные на принципах дифракции, отражения или преломления рентгеновского излучения, широко применяются в высоко-разрешающей микроскопии, для фокусировки жёсткого рентгеновского излучения на источниках синхротронного излучения [1–5], в медицинской диагностике [6] и промышленной метрологии [7–9]. Интенсивное развитие этих направлений стимулирует поиск новых типов рентгеновской оптики, среди которых особое место занимают параболические составные преломляющие рентгеновские линзы (СПРЛ), предложенные в 1996 году [10], а также рефракционные элементы из перспективных материалов – алмаза, бериллия и полимеров [11, 12].

Несмотря на значительный прогресс в области рентгеновской оптики, изготовление рефракционных элементов с идеальной параболической геометрией и субмикронной точностью профиля остаётся сложной технологической задачей. Данная проблема особенно актуальна при использовании полимерных материалов: процессы их структурирования сопровождаются усадкой и зависят от большого числа параметров литографического процесса, что приводит к отклонениям реальной геометрии от расчётных значений и, как следствие, к возникновению аберраций, снижающих эффективность фокусировки излучения. В этой связи исследования, направленные на установление взаимосвязи между технологическими режимами изготовления и конечной формой полимерных микролинз, представляют особый научный и практический интерес.

Одним из наиболее перспективных подходов к прецизионному изготовлению трёхмерных полимерных микроструктур является метод прямого лазерного письма (DLW) на основе двухфотонной полимеризации, позволяющий создавать элементы сложной геометрии с субмикронным разрешением. Конфокальная лазерная сканирующая микроскопия (CLSM) всё шире используется для изучения полученных структур и оптимизации условий их формирования, обеспечивая неразрушающий контроль морфологии, возможность трёхмерной реконструкции и количественного анализа геометрических параметров с высоким пространственным разрешением [13, 14].

Цель настоящей работы состоит в совершенствовании способа изготовления методом двухфотонной лазерной литографии трёхмерных полимерных параболических СПРЛ на основе оригинальной фотокомпозиции с фотоинициатором 4Met-BAC, а также в исследовании их морфологии и геометрических характеристик методом CLSM

с целью определения оптимальных режимов печати, минимизирующих отклонения формы от заданных значений.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.

2.1. Фотокомпозиция. В работе использована фотокомпозиция на основе мономера пентаэритриттриакрилата (PETA) и фотоинициатора – тетраметакрилатного производного красителя бензилиденциклопентанона (4Met-BAC) [15]. Выбор данного фотоинициатора обусловлен его высокой эффективностью в процессах двухфотонного поглощения и способностью существенно повышать фотосенситивность композиции. Согласно литературным данным, добавление 4Met-BAC обеспечивает увеличение фотосенситивности на порядок по сравнению с коммерческими фоторезистами для двухфотонной литографии – IP-Dip, IP-L и Ormocomp (Nanoscribe GmbH, Германия). Дополнительным преимуществом использования данной композиции является высокая интенсивность люминесценции изготовленных микроструктур, что позволяет исследовать их методом флуоресцентной микроскопии без дополнительного окрашивания.

2.2. Изготовление микроструктур методом двухфотонной лазерной литографии.

Изготовление трёхмерных полимерных структур осуществлялось на коммерческой установке для DLW TPP Nanoscribe Photonic Professional (Nanoscribe GmbH, Германия), реализующей принцип двухфотонной полимеризации. В качестве источника возбуждения использовался фемтосекундный волоконный лазер с длиной волны 780 нм, длительностью импульса ~ 100 фс и частотой повторения 80 МГц. Фокусировка лазерного пучка осуществлялась с помощью высокоапертурного планапохроматического иммерсионного объектива Zeiss (Plan-Apochromat 63 \times /1.4 Oil). Средняя мощность лазерного излучения варьировалась в диапазоне от 4.0 до 9.0 мВт для определения оптимальных условий полимеризации.

Для каждого из двух проектных радиусов кривизны (2 и 5 мкм) было изготовлено по три образца при различных мощностях лазерного излучения: 9.0; 6.5 и 4.0 мВт. Геометрические параметры линз: апертура 20.0 мкм (радиус кривизны в вершине параболы $R = 2$ мкм) и 28.0 мкм ($R = 5$ мкм), высота линзы 26.8 мкм, высота основания 50 мкм. Модели проектировались в САД-системе и с помощью встроенного программного обеспечения DeScribe нарезались на слои для последующей печати на установке Nanoscribe.

После экспозиции образцы проявлялись по следующему протоколу: 25 мин в монометилацетате пропиленгликоля (PGMEA) для удаления неполимеризованной компози-

ции, затем промывка в изопропиловом спирте (IPA) в течение 5 мин и естественная сушка на воздухе.

2.3. Конфокальная лазерная сканирующая микроскопия (CLSM). Морфология изготовленных микроструктур исследовалась на конфокальном лазерном сканирующем микроскопе LSM 510 META (Carl Zeiss, Германия). Возбуждение люминесценции осуществлялось аргоновым лазером мощностью 30 мВт на длинах волн 458, 477, 488 и 514 нм. Выбор данных длин волн обусловлен необходимостью определения оптимальных условий возбуждения для получения максимального сигнала люминесценции от фотоинициатора 4Met-BAC. Для фокусировки возбуждающего излучения и сбора сигнала использовался иммерсионный объектив Plan-Neofluar 40×/1.3 Oil DIC. Сигнал люминесценции регистрировался с помощью фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). Для получения трёхмерных изображений и последующего количественного анализа геометрии проводилось послойное сканирование структур с шагом 0.5 мкм вдоль оси Z .

2.4. Сканирующая электронная микроскопия. Обработка результатов конфокальной микроскопии дополнялась исследованием на сканирующем электронном микроскопе Emcrafts Cube II. Измерения проводились при ускоряющем напряжении 5 кВ с целью подтверждения общей морфологии, целостности изготовленных линз и отсутствия видимых структурных дефектов.

2.5. Обработка изображений и количественный анализ геометрических параметров. Количественный анализ формы микролинз выполнялся путём обработки послойных конфокальных изображений с помощью оригинального скрипта на языке Python. Алгоритм обработки включал следующие этапы.

А. Сегментация изображений. Для каждого сечения контур структуры выделялся с использованием пороговых методов или ручной корректировки для исключения артефактов.

Б. Аппроксимация профиля. Выделенный контур в каждом сечении аппроксимировался параболической функцией вида $y = x^2/(2R)$, где y – координата на оси, параллельной оси параболы, x – горизонтальная координата (полуапертура), R – радиус кривизны в вершине параболы (далее – радиус кривизны).

В. Определение радиуса кривизны. Для каждого слоя радиус кривизны определялся двумя способами: В.1 – методом прямой аппроксимации по коэффициентам аппроксимирующей параболы; В.2 – расчётным методом по измеренным значениям апертуры A и сагиттальной глубины L (расстояние от вершины параболы до плоскости апертуры)

по формуле для параболоида вращения:

$$R = A^2 / (8L). \quad (1)$$

Данный подход позволяет верифицировать результаты прямой аппроксимации и оценить вклад возможных локальных искажений формы.

Г. Усреднение и статистическая обработка. Итоговое значение радиуса кривизны для каждой структуры определялось как среднеарифметическое значение, полученное для всех слоёв, с последующим вычислением среднеквадратического отклонения. Аналогичным образом определялись средние значения апертуры и сагиттальной глубины.

Д. Оценка усадки. Величина линейной усадки вычислялась как относительное изменение полной высоты линзы (или основания) по сравнению с САД-моделью: $\varepsilon = (H_{\text{CAD}} - H_{\text{meas}}) / H_{\text{CAD}} \times 100\%$, где H_{CAD} и H_{meas} – высоты по САД-модели и измеренная, соответственно.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.

3.1. Морфология и геометрия изготовленных микролинз. На рис. 1(а) представлено СЭМ-изображение типичной трёхмерной полимерной рефракционной рентгеновской микролинзы, напечатанной без верхней половины, с проектным радиусом кривизны $R = 2$ мкм, изготовленной на стеклянной подложке. Линза сформирована на цилиндрическом основании высотой 50 мкм, что обеспечивает её пространственное отделение от подложки и минимизирует паразитное рассеяние при рентгенооптических измерениях. Общие размеры линзы соответствуют САД-модели: апертура 20.0 мкм, полная высота 26.8 мкм.

Морфологический анализ, выполненный методами CLSM (рис. 1(б), (в)) и СЭМ, показал удовлетворительное воспроизведение проектной геометрии. Измеренные значения по данным CLSM: высота основания – 49 мкм, высота линзы – 25 мкм, апертура – 18.9 мкм. Радиус кривизны, рассчитанный по формуле (1) для параболического профиля, составил 1.9 мкм, что незначительно отличается от заданного значения 2.0 мкм. Наблюдаемое незначительное уменьшение всех геометрических размеров ($\sim 4\text{--}5\%$) свидетельствует об изотропной усадке полимерного материала в процессе проявки и сушки, характерной для структур, формируемых методом двухфотонной полимеризации [16].

3.2. Люминесцентные свойства и оптимизация параметров конфокальной микроскопии. Благодаря использованию фотоинициатора 4Met-BAC в составе фотополимеризуемой композиции изготовленные микролинзы проявляют интенсивную

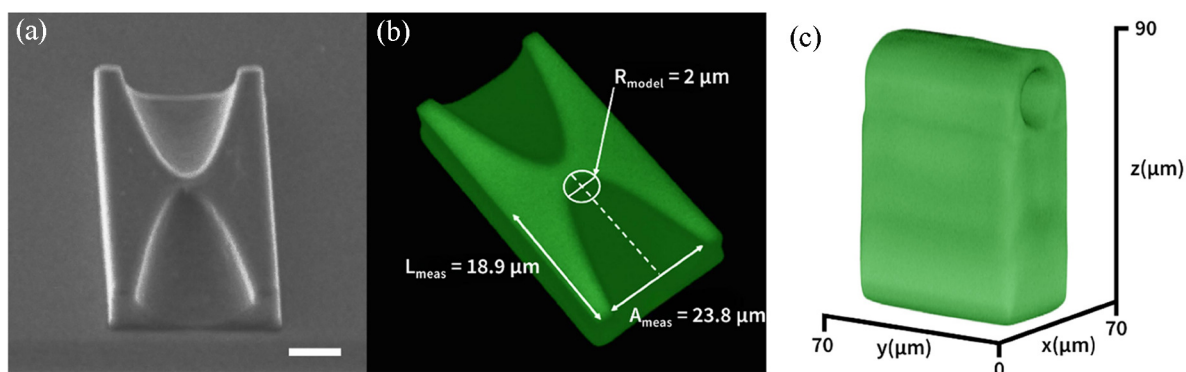


Рис. 1: Морфология трёхмерной полимерной рефракционной рентгеновской микролинзы с проектным радиусом кривизны $R = 2$ мкм: (а) СЭМ-изображение линзы, напечатанной без верхней части, масштабная метка 10 мкм; (б) поперечное сечение (плоскость XY), полученное методом CLSM ($\lambda^{exc} = 488$ нм); (в) трёхмерная реконструкция линзы по данным CLSM (шаг сканирования 0.5 мкм вдоль оси Z).

люминесценцию в видимом диапазоне, что позволяет визуализировать их внутреннюю структуру методом CLSM без дополнительного окрашивания. На рис. 2(а), (б) представлены поперечные сечения линз с радиусами кривизны 2 и 5 мкм, полученные при возбуждении аргоновым лазером ($\lambda = 488$ нм). Равномерное распределение интенсивности по объёму свидетельствует об отсутствии значительных градиентов плотности полимера и незаполимеризованных областей.

Для выбора оптимальной длины волны возбуждения при конфокальных измерениях была исследована зависимость интенсивности люминесценции от длины волны возбуждения при фиксированной мощности лазера (рис. 2(в)). Установлено, что максимальная интенсивность достигается при $\lambda = 488$ нм; при смещении в коротковолновую (458, 477 нм) или длинноволновую (514 нм) области интенсивность снижается, причём при $\lambda = 514$ нм снижение составляет почти семикратную величину по сравнению с $\lambda = 488$ нм. Данное поведение хорошо коррелирует с известным спектром однофотонного поглощения фотоинициатора 4Met-BAC, имеющего широкую полосу поглощения в области 450–500 нм с максимумом вблизи 490 нм [15]. Поскольку люминесценция возбуждается по однофотонному механизму, её интенсивность пропорциональна коэффициенту поглощения на данной длине волны. Данный результат согласуется с данными для фотоинициатора 4Met-BAC в диметилсульфоксиде (ДМСО). Таким образом, длина волны 488 нм является оптимальной для исследования морфологии подобных структур методом CLSM.

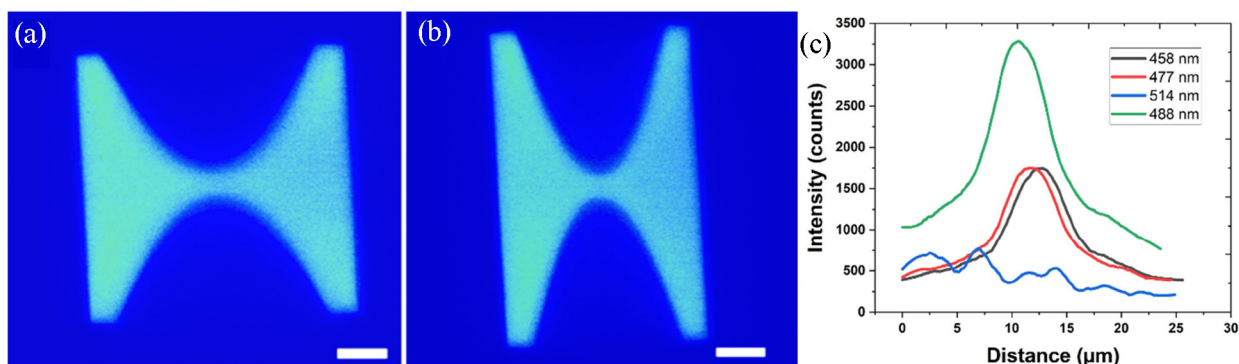


Рис. 2: Люминесцентные свойства трёхмерных полимерных рентгеновских микролинз из композиции PETA/4Met-BAC: (а), (б) поперечные сечения (CLSM, $\lambda^{exc} = 488$ нм) линз с проектными радиусами кривизны $R = 2$ мкм и $R = 5$ мкм, соответственно, демонстрирующие равномерное распределение люминесценции по всему объёму структуры; (в) зависимость нормированной интенсивности люминесценции от координаты вдоль оси параболы при разных длинах волн возбуждения при фиксированной мощности лазера (30 мВт). Максимальная интенсивность наблюдается при $\lambda = 488$ нм, что соответствует максимуму поглощения фотонициатора 4Met-BAC. Масштабная метка на (а) и (б) 5 мкм.

3.3. Влияние мощности лазерной печати на точность воспроизведения формы. Количественный анализ геометрических параметров изготовленных линз выполнялся на основе послойной обработки конфокальных изображений. Для каждого образца измерялись апертура A и расстояние L от вершины параболы до плоскости апертуры; радиус кривизны определялся двумя способами: прямой аппроксимацией профиля параболой в каждом сечении с последующим усреднением (столбец “Измеренный радиус R ” в табл. 1) и расчётным методом по формуле (1) с использованием средних значений A и L (столбец “Радиус по формуле (1)”). В табл. 1 также приведены проектные параметры САД-модели и величина линейной усадки, рассчитанная как относительное изменение полной высоты линзы.

Из данных табл. 1 следует, что все изготовленные структуры претерпевают изотропную усадку, величина которой зависит от радиуса кривизны и мощности лазерного излучения. Для линз с проектным радиусом 5 мкм усадка составляет 5–6%, причём несколько большие значения наблюдаются при минимальной мощности печати (образец № 3). Для линз с радиусом 2 мкм усадка возрастает с уменьшением мощности: с 2.7% при 9.0 мВт до 8.0% при 4.0 мВт. Данный эффект объясняется увеличением отношения

поверхность/объём для структур меньшего размера, что усиливает влияние диффузии непрореагировавшего мономера и его вымывания на стадии проявки [19]. Кроме того, снижение мощности лазера приводит к уменьшению степени конверсии (DC) полимера: согласно [20] при мощности 5.0 мВт DC достигает насыщения на уровне 35%, тогда как при 4.0 мВт снижается до $\sim 30\%$. Более низкая степень сшивки способствует большей усадке при удалении непрореагировавшего материала, что согласуется с наблюдаемым увеличением усадки для образцов № 3 и № 6.

Т а б л и ц а 1

Геометрические параметры микролинз с проектными радиусами кривизны 5 мкм (образцы №№ 1–3) и 2 мкм (образцы №№ 4–6), изготовленных при различных мощностях лазерного излучения

№	Мощность, мВт	L , мкм	A , мкм	Измер. радиус R , мкм	Радиус по форм. (1), мкм	Усадка
Радиус кривизны 5 мкм						
1	9.0	18.6±0.1	26.4±0.1	6.7±3.0	4.7±0.1	5.3%
2	6.5	18.6±0.1	26.5±0.1	6.6±2.4	4.7±0.1	5.3%
3	4.0	18.2±0.1	26.7±0.1	5.9±1.6	4.9±0.1	6.0%
Параметры САД-модели						
–	–	19.6	28.0	5.0	5.0	–
Радиус кривизны 2 мкм						
4	9.0	18.7±0.1	24.7±0.1	4.8±0.3	1.8±0.1	2.7%
5	6.5	18.9±0.1	23.8±0.1	4.1±0.1	1.9±0.1	5.0%
6	4.0	18.2±0.1	23.3±0.1	4.0±0.1	1.8±0.1	8.0%
Параметры САД-модели						
–	–	20.0	25.0	2.0	2.0	–

Анализ радиусов кривизны, полученных методом аппроксимации профиля, показывает, что отклонение от проектного значения существенно уменьшается со снижением мощности печати. Для $R = 5$ мкм относительное отклонение (по отношению к измеренному радиусу) снижается с 34% (образец № 1) до 18% (образец № 3); для $R = 2$ мкм – со 140% (образец № 4) до 100% (образец № 6). Столь значительные отклонения для малых радиусов обусловлены тем, что при $R < 10$ мкм размер вокселя – характеристического объёма полимеризации – становится сопоставимым с геометрическими размерами линзы, что приводит к искажению формы, особенно вблизи вершины параболы [16].

Снижение мощности лазерного излучения уменьшает размер вокселя и, как следствие, обеспечивает более точное воспроизведение заданной геометрии.

Вместе с тем значения радиусов, рассчитанные по формуле (1) на основе средних A и L , оказываются близкими к проектным (отклонение не превышает 6% для $R = 5$ мкм и 10% для $R = 2$ мкм), что подтверждает корректность общей параболической формы линз и указывает на локализацию основных искажений в области вершины с максимальной кривизной.

Таким образом, для получения микролинз с высокой точностью формы целесообразно использовать минимально возможную мощность лазерного излучения, обеспечивающую стабильную полимеризацию (в данном случае 4.0 мВт). Однако необходимо учитывать компромисс между точностью воспроизведения геометрии и механической устойчивостью структуры, поскольку снижение степени конверсии может привести к уменьшению радиационной стойкости полимера при длительном воздействии рентгеновского излучения.

4. Заключение. Методом двухфотонной полимеризации (DLW) изготовлены ряды трёхмерных полимерных параболических линз (СПРЛ) с радиусами кривизны в вершине параболы 2 и 5 мкм при мощностях лазерного излучения 4.0–9.0 мВт. Метод конфокальной лазерной сканирующей микроскопии обеспечил неразрушающий анализ морфологии и точные измерения геометрических параметров структур. Фотокомпозиция PETA/4Met-BAC обеспечивает высокую интенсивность люминесценции, что позволяет проводить CLSM-визуализацию без дополнительного окрашивания.

Все структуры демонстрируют изотропную усадку, зависящую как от проектного радиуса, так и от мощности лазерного излучения: 5.3–6.0% для $R = 5$ мкм и до 8.0% для $R = 2$ мкм при минимальной мощности. Снижение мощности с 9.0 до 4.0 мВт уменьшает размер вокселя и значительно улучшает точность воспроизведения формы: относительное отклонение измеренного радиуса от проектного снижается с 34 до 18% ($R = 5$ мкм) и со 140 до 100% ($R = 2$ мкм). Обнаружена корреляция между увеличением усадки и снижением степени конверсии полимера, что согласуется с литературными данными. Эффекты усадки более выражены для малых радиусов вследствие увеличения отношения поверхность/объём.

Таким образом, CLSM в сочетании с количественным анализом изображений является эффективным инструментом оптимизации параметров двухфотонной литографии и контроля качества элементов рентгеновской оптики.

Авторы выражают благодарность Российскому научному фонду за поддержку работ по разработке методов и исследованию 3D-печати микроструктур для нанопечатной репликации (проект № 25-79-20031).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 25-79-20031.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] B. Lengeler, C. G. Schroer, B. Benner, et al., *Journal of Synchrotron Radiation*. **9**(3), 119 (2002). <https://doi.org/10.1107/S0909049502003436>.
- [2] A. K. Petrov, V. O. Bessonov, K. A. Abrashitova, et al., *Opt. Express*. **25**(13), 14173 (2017). <https://doi.org/10.1364/OE.25.014173>.
- [3] S. D. Shastri, N. Moldovan, *Opt. Express*. **29**(4), 5644 (2021). <https://doi.org/10.1364/OE.405566>.
- [4] P. Karvinen, D. Grolimund, M. Willmann, et al., *Opt. Express*. **22**(14), 16676 (2014). <https://doi.org/10.1364/OE.22.016676>.
- [5] J. Vila-Comamala, K. Jefimovs, J. Raabe, et al., *Ultramicroscopy* **109**(11), 1360 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2009.07.005>.
- [6] M. M. Koc, N. Aslan, A. P. Kao, A. H. Barber, *Microsc. Res. Tech.* **82**(6), 812 (2019). <https://doi.org/10.1002/jemt.23225>.
- [7] J. Miao, K. O. Hodgson, T. Ishikawa, et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **100**(1), 110 (2003). <https://doi.org/10.1073/pnas.232691299>.
- [8] D. Shapiro, P. Thibault, T. Beetz, et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **102**(43), 15343 (2005). <https://doi.org/10.1073/pnas.0503305102>.
- [9] W. A. Kalender, *Phys. Med. Biol.* **51**(13), R29 (2006). <https://doi.org/10.1088/0031-9155/51/13/R03>.
- [10] A. Snigirev, V. Kohn, I. Snigireva, B. Lengeler, *Nature* **384**, 49 (1996). <https://doi.org/10.1038/384049a0>.
- [11] S. Kimura, Y. Imai, *Jpn. J. Appl. Phys.* **55**(3), 038001 (2016). <https://doi.org/10.7567/JJAP.55.038001>.
- [12] M. I. Sharipova, T. G. Baluyan, K. A. Abrashitova, et al., *Opt. Mater. Express*. **11**(2), 371 (2021). <https://doi.org/10.1364/OME.416457>.
- [13] B. Lengeler, C. Schroer, J. Tümmler, et al., *J. Synchrotron Radiat.* **6**(6), 1153 (1999). <https://doi.org/10.1107/S0909049599009747>.
- [14] F. Seiboth, M. Scholz, J. Patommel, et al., *Appl. Phys. Lett.* **105**(13), 131110 (2014). <https://doi.org/10.1063/1.4896914>.

- [15] E. R. Zhiganshina, M. V. Arsenyev, D. A. Chubich, et al., *Eur. Polym. J.* **162**, 110917 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2021.110917>.
- [16] A. D. Patolyatov, D. A. Shcherbakov, D. A. Kolymagin, et al., *Phys. Wave Phenom.* **30**(5), 325 (2022). <https://doi.org/10.3103/S1541308X22050089>.
- [17] F. Mayer, S. Richter, J. Westhauser, et al., *Sci. Adv.* **5**(2), eaau9160 (2019). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aau9160>.
- [18] J. Yong, F. Chen, Q. Yang, et al., *ACS Appl. Mater. Interfaces* **5**(19), 9382 (2013). <https://doi.org/10.1021/am402923t>.
- [19] A. Bauhofer, Multiscale effects of photochemical shrinkage in direct laser writing, Diss. ETH Zurich, 2019. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000339159>.
- [20] A. E. Egorov, A. A. Kostyukov, D. A. Shcherbakov, et al., *Polymers* **15**(1), 71 (2022). <https://doi.org/10.3390/polym15010071>.

Поступила в редакцию 27 апреля 2026 г.

После доработки 5 мая 2026 г.

Принята к публикации 6 мая 2026 г.