

## УСТАНОВКА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ СТРУКТУР МЕТОДОМ ДВУХФОТОННОЙ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ФОКУСИРОВКИ

© 2021 г. Е. О. Епифанов<sup>а</sup>, Е. А. Мигаль<sup>б</sup>, Ф. В. Потемкин<sup>б</sup>, А. А. Антошин<sup>а</sup>,  
В. И. Юсупов<sup>а</sup>, Н. В. Минаев<sup>а,\*</sup>

<sup>а</sup> Институт фотонных технологий ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН  
Россия, 108840, Москва, Троицк, ул. Пионерская, 2

<sup>б</sup> Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, Москва

\*e-mail: minaevn@gmail.com

Поступила в редакцию 17.05.2021 г.

После доработки 27.05.2021 г.

Принята к публикации 07.06.2021 г.

Описана установка для лазерной трехмерной печати методом двухфотонной полимеризации с использованием схемы пространственно-временной фокусировки фемтосекундного лазерного излучения. Основанная на доступных компонентах система позволяет формировать трехмерные структуры сантиметрового масштаба с микронным разрешением по всем направлениям, что является ее основным достоинством относительно других систем, в том числе коммерческих. При создании установки использовано минимальное количество оптических и оптомеханических компонент, что значительно повышает доступность таких установок в различных лабораториях. С помощью установки можно изготавливать трехмерные структуры различного назначения, в том числе скаффолд-структуры для задач тканевой инженерии.

DOI: 10.31857/S0032816221060021

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Лазерные аддитивные технологии в настоящее время переживают бурное развитие. В области трехмерной печати лазерное излучение широко используется для спекания порошковых металлических и полимерных материалов методом селективного лазерного спекания [1, 2], а также для отверждения жидких полимерных материалов методом стереолитографии [3, 4]. Развиваются технологии биологической трехмерной печати, в основе которых лежит использование импульсного лазерного излучения для реализации пространственного переноса вещества и живых микробиологических объектов [5–13]. Изделия, сформированные с помощью лазерной трехмерной печати, в настоящее время широко используются как в серийной промышленности, так и в быту благодаря развитию новых лазерных источников и появлению доступных установок для трехмерной лазерной печати, использующих их возможности [14–16].

Среди всего многообразия технологий лазерной трехмерной печати отдельно можно выделить технологию двухфотонной полимеризации [17, 18], в основе которой лежит принцип нелинейно-

го поглощения фемтосекундного лазерного излучения в фокальной точке микрообъектива – так называемом “вокселе” (3D-аналог двумерного “пикселя”), который обычно имеет форму вытянутого вдоль оптической оси эллипсоида вращения. Благодаря высокой локальности этого процесса, отверждение может происходить в крайне компактной области, которая в случае использования микроскопических объективов с высокими кратностью и числовой апертурой может иметь субмикронные размеры. Однако у такой системы есть ряд недостатков. Из-за крайне малого размера области, в которой происходит процесс фотоотверждения материала (что изначально является преимуществом), возникают значительные проблемы с производительностью метода при формировании крупных структур. Так, процесс получения структур с характерным размером несколько миллиметров при сохранении микронного разрешения может занимать часы и даже несколько суток. Это в первую очередь связано с необходимостью “заполнения” объема формируемых структур отдельными проходами лазерного излучения, т.е. с большим количеством микроскопических “вокселей” отвержденного материала.

ла. Небольшой прирост производительности достигается при применении высокочастотных лазерных источников и систем высокоскоростного перемещения лазерного пятна (например, гальваносканеров) в сочетании с использованием быстроотверждаемых полимерных материалов. Однако малое рабочее поле микрообъектива имеет фундаментальное ограничение: для обычно используемого объектива с двадцатикратным увеличением и числовой апертурой 0.4 оно составляет  $250 \times 250$  мкм, а для объектива со стократным увеличением и числовой апертурой 1.4 –  $40 \times 40$  мкм. Это ограничение не позволяет формировать структуры с большими размерами в горизонтальной плоскости. Также вертикальный размер создаваемых структур в значительной степени ограничен рабочим расстоянием объектива. Формирование структур с высоким аспектным соотношением возможно лишь с помощью сложных схем [19]. Стоит отметить, что использование объективов с большим фокусным расстоянием для этих целей приводит к резкому ухудшению разрешающей способности метода в вертикальном направлении [20]. Так, при использовании микрообъектива с четырехкратным увеличением и числовой апертурой 0.1 аспектное соотношение для образованного “вокселя” может составлять уже 1 : 20. Все эти факторы значительно ограничивают возможности метода двухфотонной полимеризации при использовании его на практике, в том числе для актуальных задач формирования трехмерных конструкций из биосовместимых полимерных материалов для тканевой инженерии [21, 22]. Для решения подобных практических задач необходимо обеспечить высокую производительность с возможностью формирования относительно крупных (сантиметрового масштаба) трехмерных структур с характерным разрешением 5–10 мкм во всех направлениях.

## 2. МЕТОДИКА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ФОКУСИРОВКИ ДЛЯ ЗАДАЧИ ДВУХФОТОННОЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ

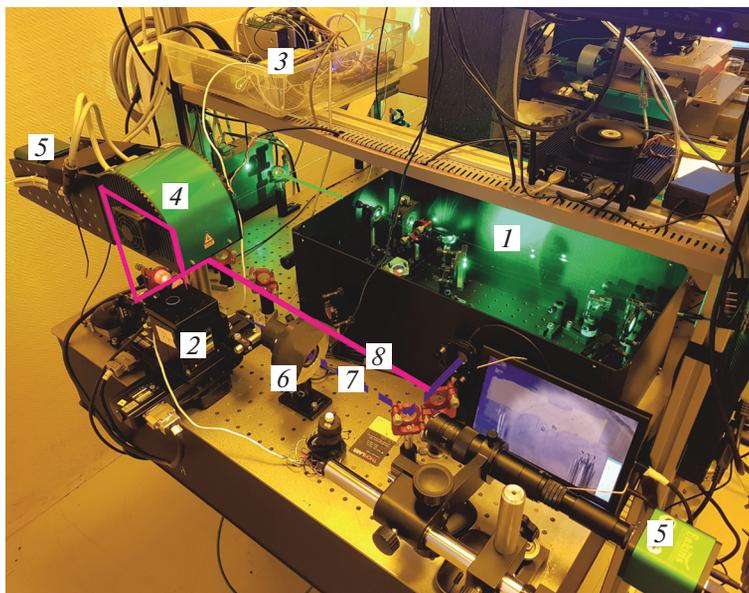
Сформулированная выше задача может быть решена с помощью пространственно-временной фокусировки (simultaneous spatiotemporal focusing – SSTF) фемтосекундного лазерного излучения [23–25]. Пространственно-временная фокусировка обеспечивает сжатие эллиптической области в перетяжке объектива (вдоль оси распространения излучения) за счет дополнительной пространственно-временной фокусировки спектральных компонент фемтосекундного лазерного импульса, имеющего пространственный чирп (разнесение частотных компонент по пространству). Такая схема формирования фемтосекундного лазерного импульса исключительно в фокальной области объектива позволяет превратить вертикально вытянутый

эллиптический воксель, в котором формируются условия для двухфотонного поглощения лазерного излучения, практически в сферу. При этом пространственно-временная фокусировка позволяет также в значительной степени избавиться от нежелательного перегрева отверждаемого полимерного материала (благодаря более высокой концентрации энергии лазерного импульса в “вокселе” по сравнению с обычной фокусировкой).

Пространственно-временная фокусировка заключается в использовании пространственно-чирпированного импульса, малая длительность которого (а значит, и максимальная интенсивность) достигается непосредственно в фокальной плоскости микрообъектива. Для реализации этой схемы на первом этапе фемтосекундный импульс растягивается по времени до пикосекундных значений путем добавления положительного чирпа с помощью оптической схемы стретчера (расширителя импульсов). Затем с помощью оптической схемы компрессора проводится пространственное разделение спектральных компонент лазерного импульса с одновременной компенсацией разницы оптических путей отдельных компонент (устраняется временной чирп) для пространственной и временной сборки лазерного импульса после объектива. Фактически появляется дополнительная степень фокусировки, благодаря тому что спектральные компоненты лазерного излучения собираются вместе только в области фокальной точки.

Технология пространственно-временной фокусировки уже успешно применялась для решения задач, связанных с двухфотонной полимеризацией. Так, в работах [26, 27] представлены варианты конфигурации систем двухфотонной полимеризации, в которых используются дорогостоящие мощные фемтосекундные лазерные источники с низкой частотой следования лазерных импульсов. Конструктивно такие системы основаны на принципе усиления чирпированных импульсов, поэтому они уже имеют в своем составе пару “стретчер–компрессор”, которая может быть адаптирована под задачу пространственно-временной фокусировки. Однако для задач двухфотонной полимеризации также могут быть использованы и широкодоступные фемтосекундные высокочастотные (с частотой  $\sim 80$  МГц) лазерные источники, компактные и значительно более дешевые. Для таких источников целесообразно использовать отдельную оптическую систему, позволяющую реализовать пространственно-временную фокусировку, чему и посвящена настоящая публикация.

В данной работе предлагается вариант полнофункциональной лабораторной системы двухфотонной полимеризации, реализованной с использованием схемы пространственно-временной фокусировки с минимальным количеством



**Рис. 1.** Фотография экспериментальной системы. 1 – модуль стретчера и компрессора; 2 – трехкоординатная моторизированная подвижка; 3 – контроллер для управления трехмерной подвижкой с сопутствующей электроникой; 4 – гальваносканер; 5 – цифровые камеры с телескопическим объективом; 6 – фокусирующий микрообъектив. Луч 7 (штриховая линия) показывает конфигурацию системы с использованием трехмерного транслятора, 8 (сплошная линия) – с использованием гальваносканера.

доступных стандартных компонент. Эта система обладает обширным функционалом и является экономически доступной.

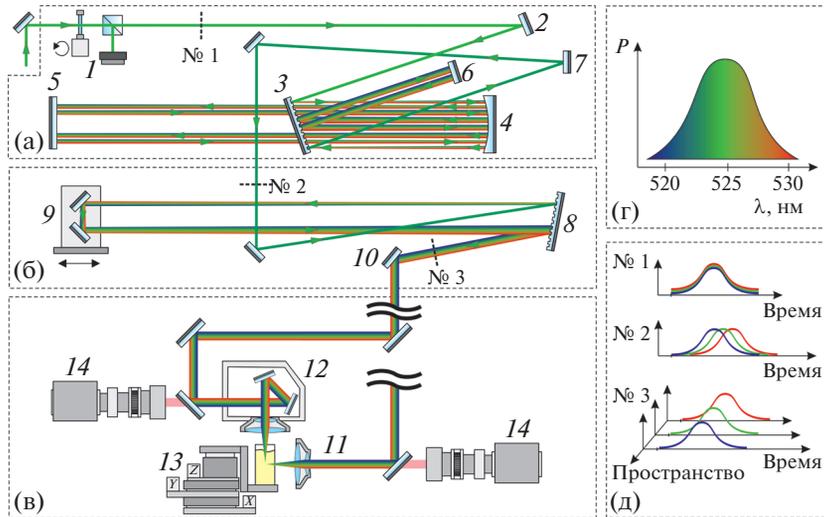
### 3. УСТРОЙСТВО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Внешний вид разработанной нами системы для формирования трехмерных структур методом двухфотонной фемтосекундной полимеризации с использованием пространственно-временной фокусировки представлен на рис. 1. Схема установки приведена на рис. 2. В установке используется излучение второй гармоники фемтосекундного лазера ТЕМА-100 (Авеста-проект, Россия) с центральной длиной волны 525 нм, шириной спектра ~4 нм, частотой следования импульсов 80 МГц и длительностью импульса 100 фс. Вся система собрана на оптической плите (см. рис. 1). Установка состоит из блока стретчера и компрессора 1; моторизированного XYZ-транслятора 2 с контроллером и блоком сопутствующей электроники 3; гальваносканирующей системы 4; а также двух цифровых камер 5 с телескопическими объективами, одна из которых установлена в гальваносканере.

Система собрана одновременно в двух конфигурациях. Первая реализует режим формирования структур с помощью только моторизированного трехмерного транслятора. В этом случае излучение заводится через объектив 6 (штриховой луч 7 на рис. 1). Вторая конфигурация обеспечи-

вает высокоскоростное формирование структур с использованием гальваносканирующей системы. При этом излучение заводится через гальваносканер 4 (сплошной луч 8 на рис. 1).

В обеих конфигурациях образцы фотоотверждаемого полимера размещают на моторизованном трехмерном трансляторе, собранном из двух моторизированных горизонтальных подвижек (оси  $X$  и  $Y$ ) OSMS20-85 и одной вертикальной подвижки OSMS80-20ZF (OptoSigma, Japan). Шаговые моторы транслятора через внешние драйверы MD5-HD14 (Autonics, Корея) подключены к управляющему контроллеру Bigtreotech SKR PRO V1.2 (Bigtreotech, Китай) с прошивкой Marlin 2.0, осуществляющему управление моторизованным транслятором с помощью команд G-code и программного обеспечения с открытым кодом Pronterface. К контроллеру также подключены два дополнительных моторизированных транслятора. Первый используется для управления средней мощностью лазерного излучения с помощью модуля аттенюации 1 (см. рис. 2), состоящего из поляризационного светоделительного куба и расположенного перед ним поворотного моторизованного транслятора. В последнем закреплена полуволновая пластинка, вращением которой задается средняя мощность излучения на выходе из модуля аттенюации. Вторым транслятором 9 задействован в оптической схеме компрессора и отвечает за управление степенью пространственно-временной дисперсии; он позволяет в автоматическом режиме подстраивать параметры



**Рис. 2.** Схема основной части установки двухфотонной полимеризации с использованием принципа пространственно-временной фокусировки излучения: **а** – стретчер, **б** – компрессор, **в** – система формирования трехмерных структур, **г** – условная иллюстрация цветового отображения спектра лазерного излучения, **д** – иллюстрация сечений лазерного пучка в различных точках оптической схемы. 1 – модуль аттенюации лазерного излучения; 2, 5–7, 10 – диэлектрические зеркала; 3, 8 – дифракционные решетки; 4 – сферическое зеркало; 9 – уголкового отражателя на моторизированной платформе; 11 – фокусирующий микроскопический объектив; 12 – гальваносканер с установленным микроскопическим объективом; 13 – моторизированный трехкоординатный транслятор; 14 – цифровая камера с телескопическим объективом.

системы пространственно-временной фокусировки под используемый объектив.

Для сборки системы использовались следующие оптические элементы: диэлектрические зеркала 2, 5–7, 10 на длины волн 515–535 нм с коэффициентом отражения  $>99.5\%$  для углов  $0^\circ$  и  $45^\circ$  (OPTOGAMA, Литва); сферическое зеркало (4) SM254-500-E02 (THORLABS, США) с фокусным расстоянием  $f = 500$  мм; две отражающие дифракционные решетки (3 и 8) GR50-1205 (THORLABS, США) с  $d = 1200$  линий/мм и длиной волны блеска 500 нм; набор стандартных оптомеханических оправок.

В качестве гальваносканирующей системы 12 использован гальваносканер LScanXY (Атеко-ТМ, Россия) с программным обеспечением LDesigner, позволяющим реализовать процесс формирования трехмерной структуры по данным цифровой трехмерной модели. В этом случае управление моторизированными трансляторами осуществлялось с помощью блока управления гальваносканера.

Для визуального контроля процесса формирования трехмерных структур и точной юстировки в системе использовались цифровые камеры (14) XFCAM1080PHV (ТорпТек, КНР) с модулем автофокусировки и телескопическим объективом, которые позволяли получать изображение из фокальной плоскости объектива.

Подготовка управляющей программы с использованием стандартных команд G-code осу-

ществлялась с помощью программы с открытым кодом Cura на основе анализа трехмерных моделей, что обеспечивало процесс лазерного “рисования” объемных структур при движении кюветы с фотоотверждаемым материалом относительно точки фокусировки лазерного луча.

Фокусировка лазерного излучения осуществлялась телецентрическим F-theta-объективом (11) TSL-532-10-56Q-D20 (RonarSmith, Сингапур) с рабочим расстоянием 22 мм, который либо размещался на оптическом столе, либо устанавливался после гальваносканера 12.

Установка для двухфотонной полимеризации с использованием схемы пространственно-временной фокусировки работает следующим образом. Лазерное излучение с длиной волны 525 нм, частотой 80 МГц и длительностью импульсов  $\sim 100$  фс заводится в модуль пространственно-временной фокусировки, состоящий из последовательно установленных оптических схем стретчера (рис. 2а) и компрессора (рис. 2б) и размещенный на отдельной оптической плите. Вначале лазерный луч заводится через модуль ослабления энергии 1, состоящий из моторизированной поворотной подвижки, в которую установлена полуволновая пластинка, обеспечивающая поворот поляризации излучения на необходимый угол. Далее излучение проходит через светоделительный поляризационный куб, который задает соотношение между проходящим и отраженным излучением в зависимости от угла поворота поляризации падающего излучения, что позволяет

автоматически выставлять необходимую мощность лазерного излучения.

С помощью диэлектрического зеркала 2 излучение заводится в схему стретчера типа Мартинез (Martinez type) в компактной геометрии, состоящего из дифракционной решетки 3, сферического зеркала 4, плоского заднего зеркала 5 и ретро-рефлектора 6. Излучение попадает на дифракционную решетку под углом  $\alpha = 10.2^\circ$  к ее нормали.

Фемтосекундный лазерный импульс представляет собой совокупность спектральных компонент с различными длинами волн (рис. 2г) с шириной спектра  $\sim 7$  нм (по уровню  $1/e^2$ ). Для расчетов оптической системы были приняты следующие граничные длины волн:  $\lambda_b = 520$  нм и  $\lambda_r = 530$  нм. Угол отражения  $\beta$  излучения от дифракционной решетки, соответствующий первому дифракционному максимуму, определяется из известного условия  $d(\sin\alpha + \sin\beta) = \lambda$ , где  $d$  – период решетки,  $\lambda$  – длина волны падающего излучения. Из этого соотношения можно определить углы отражения для центральной и граничных длин волн:  $\beta = 26.93^\circ$  (для  $\lambda = 525$  нм),  $\beta_b = 26.54^\circ$  (для  $\lambda_b = 520$  нм) и  $\beta_r = 27.32^\circ$  (для  $\lambda_r = 530$  нм).

После отражения от решетки разделенные в пространстве спектральные компоненты попадают на сферическое зеркало 4 с фокусным расстоянием  $f = 500$  мм, удаленное от решетки на расстоянии 300 мм. Стоит отметить, что дифракционная решетка 3 слегка повернута вверх, чтобы отражаемые пучки уходили из горизонтальной плоскости и в дальнейшем могли проходить над решеткой. Сферическое зеркало расположено таким образом, чтобы центральная компонента  $\lambda = 525$  нм (с  $\beta = 26.93^\circ$ ) попадала в его центр. Граничные компоненты с длинами волн  $\lambda_b$  и  $\lambda_r$  ведут себя иначе. На рис. 3 представлена упрощенная схема, показывающая траекторию компоненты лазерного луча с  $\lambda_b = 520$  нм.

Первое отражение от решетки в точке  $A$  (см. рис. 3) происходит под углом  $\beta_b = 26.54^\circ$ , после чего излучение с  $\lambda_b$  снова попадает на сферическое зеркало 4 и отражается от него в точке  $B$ , чтобы проследовать над дифракционной решеткой в точку  $C$  зеркала 5. На момент нахождения лазерного пучка на сферическом зеркале в точке  $B$  спектральные компоненты  $\lambda_b = 520$  нм и  $\lambda_r = 530$  нм разнесены на расстояние  $S = 4.04$  мм. Попадая на зеркало 5 в точку  $C$ , компоненты отдаляются друг от друга уже на расстояние  $S = 6.73$  мм. Далее в точке  $D$  на сферическом зеркале 4 расстояние между этими компонентами становится максимально большим:  $S = 9.42$  мм. После этого излучение возвращается на дифракционную решетку в точку  $E$ . Угол падения излучения на решетку  $\angle FED$  равен  $26.54^\circ$  и практически не отличается от  $\beta_b = 26.54^\circ$ , при этом расстояние между точка-

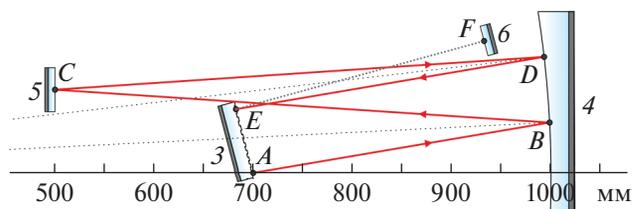


Рис. 3. Упрощенная принципиальная схема, показывающая траекторию спектральной компоненты лазерного пучка с  $\lambda_b = 520$  нм. Обозначения элементов соответствуют рис. 2: 3 – дифракционная решетка; 4 – сферическое зеркало; 5, 6 – диэлектрические зеркала.

ми  $E$  и  $A$  составляет  $L \approx 3.02$  мм. Красная компонента спектра лазерного пучка  $\lambda_r = 530$  нм проходит такой же оптический путь, попадая на дифракционную решетку на аналогичное удаление, что дает ширину разнесения спектральных компонент лазерного пучка на решетке  $L \approx 6.04$  мм.

При отражении от дифракционной решетки компоненты собираются в практически плоско-параллельный пучок, выходящий под тем же самым углом, под которым излучение падало на решетку 3. Затем, из-за наличия небольшого наклона дифракционной решетки, излучение попадает на зеркало 6, от которого отражается, и возвращается на решетку, но под небольшим углом – чуть выше положения точек первоначального отражения при первом проходе. Второй проход через оптическую систему и повторное взаимодействие с оптическими элементами 3, 4 и 5 убирают пространственное разнесение спектральных компонент (пространственный чирп) и дополнительно увеличивают длительность лазерного импульса за счет внесения положительной дисперсии спектральных компонент (временное чирпирование). После прохождения стретчера импульс приобретает дисперсию второго порядка, около  $3.7 \cdot 10^5$  фс<sup>2</sup>, что приводит к увеличению длительности импульса до 10 пс.

После прохождения стретчера лазерное излучение поступает в модуль компрессора типа Трейси (Treacy type) (см. рис. 2б). С помощью системы зеркал оно заводится на дифракционную решетку 8 под углом  $\alpha = 15^\circ$ . После отражения от дифракционной решетки центральная спектральная линия с  $\lambda = 525$  нм выходит под углом  $\beta = 21.79^\circ$ , а спектральные компоненты начинают расходиться в пространстве под разными углами:  $\beta_b = 21.42^\circ$ ,  $\beta_r = 22.16^\circ$ . Далее лазерное излучение попадает на уголкового отражателя 9, закрепленный на подвижной моторизированной платформе, что позволяет изменять длину компрессора, подстраивая его дисперсию под дисперсию стретчера. После второго отражения от дифракционной решетки лазерный пучок с разнесенными в пространстве



**Рис. 4.** Фотографии тестовых структур (слева и в центре), сформированных методом двухфотонной полимеризации с использованием пространственно-временной фокусировки (структуры белого цвета) и классической схемы (зеленого цвета). Справа приведена фотография фрагмента структуры с демонстрацией разрешения при рабочих параметрах (20 мкм).

спектральными составляющими (пространственно-чирпированное) становится плоскопараллельным и выходит под углом, близким к углу исходно падающего, растянутого во времени фемтосекундного импульса, после чего с помощью зеркала  $10$  выводится из модуля компрессора.

Изменяя расстояние между дифракционной решеткой и уголковым отражателем, можно управлять параметрами выходного излучения. Так, при расстоянии  $L = 200$  мм диаметр спектрально-чирпированного пучка составит  $\sim 5.5$  мм, при этом разность хода спектральных компонент  $\lambda_b$  и  $\lambda_r$  примерно равна 3.61 мм, что обеспечивает практически полную компенсацию положительного временного чирпирования из стретчера с получением минимальной длительности импульса  $\sim 120$  фс. При изменении расстояния  $L$  до 300 мм диаметр пучка составит уже  $\sim 8.2$  мм. При этом будет происходить сильная перекомпенсация дисперсии, и длительность импульса увеличится до  $\sim 5$  пс. Возможность перекомпенсации дисперсии важна не только для точного согласования стретчера и компрессора, но также для компенсации положительной дисперсии, вносимой фокусирующими многолинзовыми объективами. Фактически такое решение позволяет в процессе эксперимента изменять вносимую дисперсию и тем самым осуществлять точную юстировку компрессора и всей системы пространственно-временной фокусировки в автоматическом режиме, что необходимо при настройке системы и смене фокусирующей оптики.

#### 4. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ. АПРОБАЦИЯ НА ПРАКТИКЕ

С использованием разработанной установки был изготовлен набор тестовых структур (рис. 4) сантиметрового масштаба. Представленные на рисунке крупные структуры с характерным размером до 1 см были изготовлены из коммерческого материала Dental Clear (HARZ Labs, Россия) с добавлением фотоинициатора. Для их формирования были подобраны следующие параметры: мощность лазерного излучения 42 мВт, скорость

перемещения лазерного пятна 30–60 мм/мин, при этом перемещение осуществлялось с помощью трехмерного позиционера. Время изготовления самой крупной структуры, диаметром 10 мм и высотой 5 мм, составило более 7 ч, однако при использовании более подходящего фотоотверждаемого материала, обеспечивающего более эффективный процесс полимеризации, и схемы с гальваносканером для перемещения лазерного луча можно достичь значительно более высоких скоростей формирования структур. При используемых параметрах было получено характерное разрешение 20 мкм. На рис. 4 для сравнения приведены максимально возможные по размеру трехмерные структуры (зеленого цвета), изготовленные “классическим” методом фокусировки лазерного излучения с помощью микроскопического объектива с двадцатикратным увеличением из материала Basic Green (Anycubic, Китай).

#### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и протестирована система для формирования трехмерных структур методом двухфотонной фемтосекундной полимеризации с использованием пространственно-временной фокусировки. Показана возможность формирования относительно крупных трехмерных структур сантиметрового масштаба с микронным разрешением во всех направлениях. Предложенная система собрана из минимального количества стандартных компонент, что делает ее экономически доступной. Система адаптирована под работу с излучением высокочастотных (80 МГц) фемтосекундных лазерных источников, которые доступны и обеспечивают высокую производительность при формировании трехмерных структур методом двухфотонной полимеризации. Предложенное решение с использованием доступного контроллера и программного обеспечения с открытым кодом позволило обеспечить полную автоматизацию системы при формировании трехмерных структур с автоматическими настройками разрешения печати и настройку системы пространственно-

временной фокусировки под различную фокусирующую оптику.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят П.И. Жарикова за помощь при сборке экспериментальной системы.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-75-00108.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Awad A., Fina F., Goyanes A., Gaisford S., Basit A.W.* // Int. J. Pharm. Elsevier. May 2020. V. 586. P. 119594. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119594>
2. *Kruth J.P., Wang X., Laoui T., Froyen L.* // Assem. Autom. 2003. V. 23. № 4. P. 357. <https://doi.org/10.1108/01445150310698652>
3. *Schmidleithner C., Kalaskar D.M.* // Stereolithography. Intechopen, July 2018. V. 32. P. 137. <https://doi.org/10.5772/intechopen.78147>
4. *Bártolo P.J.* Stereolithography: materials, processes and applications. Springer Science & Business Media, 2011.
5. *Fernández-Pradas J.M., Colina M., Serra P., Domínguez J., Morenza J.L.* // Thin Solid Films. 2004. V. 453–454. P. 27. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2003.11.154>
6. *Ebrahimi Orimi H., Hosseini Kolkoooh S.S., Hooker E., Narayanswamy S., Larrivé B., Boutopoulos C.* // Sci. Rep. 2020. V. 10. № 1. P. 9730. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66565-x>
7. *Willis D.A., Grosu V.* // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 86. № 24. P. 244103. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66565-x>
8. *Kuznetsov A.I., Kiyan R., Chichkov B.N.* // Opt. Express. 2010. V. 18. № 20. P. 21198. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66565-x>
9. *Mezel C., Souquet A., Hallo L., Guillemot F.* // Biofabrication. 2010. V. 2. № 1. P. 1–7. <https://doi.org/10.1088/1758-5082/2/1/014103>
10. *Antoshin A.A., Churbanov S.N., Minaev N.V., Zhang D., Zhang Y., Shpichka A.I., Timashev P.S.* // Bioprinting. 2019. V. 15. P. e00052. <https://doi.org/10.1016/j.bprint.2019.e00052>
11. *Yusupov V., Churbanov S., Churbanova E., Bardakova K., Antoshin A., Evlashin S., Timashev P., Minaev N.* // Int. J. Bioprinting. 2020. V. 6. № 3. P. 1. <https://doi.org/10.18063/ijb.v6i3.271>
12. *Yusupov V.I., Gorlenko M.V., Cheptsov V.S., Minaev N.V., Churbanova E.S., Zhigarkov V.S., Chutko E.A., Evlashin S.A., Chichkov B.N., Bagratashvili V.N.* // Laser Phys. Lett. 2018. V. 15. № 6. P. 065604. <https://doi.org/10.1088/1612-202X/aab5ef>
13. *Gorlenko M.V., Chutko E.A., Churbanova E.S., Minaev N.V., Kachesov K.I., Lysak L.V., Evlashin S.A., Cheptsov V.S., Rybaltovskiy A.O., Yusupov V.I., Zhigarkov V.S., Davydova G.A., Chichkov B.N., Bagratashvili V.N.* // Journal of Biological Engineering. 2018. V. 12. № 1. P. 27. <https://doi.org/10.1186/s13036-018-0117-4>
14. *Минаев Н.В., Епифанов Е.О., Юсупов В.И.* // ПТЭ. 2021. № 3. С. 119. <https://doi.org/10.31857/S0032816221020166>
15. *Минаев Н.В., Антонов Е.Н., Минаева С.А., Чурбанов С.Н.* // ПТЭ. 2019. № 1. С. 150. <https://doi.org/10.1134/S003281621901018X>
16. *Минаев Н.В., Миронов А.В., Минаева С.А., Миронова О.А., Сячина М.А., Krumins E., Howdle S., Попов В.К.* // ПТЭ. 2020. № 2. С. 153. <https://doi.org/10.31857/S0032816220020135>
17. *Nguyen A.K., Narayan R.J.* // Mater. Today. 2017. V. 20. № 6. P. 314. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.06.004>
18. *LaFratta C.N., Baldacchini T.* // Micromachines. 2017. V. 8. № 4. P. 1–25. <https://doi.org/10.3390/mi8040101>
19. *Obata K., El-Tamer A., Koch L., Hinze U., Chichkov B.N.* // Light. Sci. Appl. 2013. V. 2. P. 8–11. <https://doi.org/10.1038/lsa.2013.72>
20. *Cheng Y., Sugioka K., Midorikawa K., Masuda M., Toyoda K., Kawachi M., Shihoyama K.* // Opt. Lett. 2003. V. 28. № 1. P. 55. <https://doi.org/10.1364/ol.28.000055>
21. *Kaplin V.S., Glagolev N.N., Shashkova V.T., Matveeva I.A., Shershnev I.V., Zarkhina T.S., Solovieva A.B., Minaev N.V., Aksenova N.A., Shavkuta B.S., Kopylov A.S., Kuznetsova D.S., Timashev P.S., Shpichka A.I., Bezrukov E.A.* // Polymers (Basel). 2020. V. 12. № 11. P. 1. <https://doi.org/10.3390/polym12112525>
22. *Demina T., Bardakova K., Minaev N., Svidchenko E., Istomin A., Goncharuk G., Vladimirov L., Grachev A., Zelenetskii A., Timashev P., Akopova T.* // Polymers (Basel). 2017. V. 9. № 12. P. 302. <https://doi.org/10.3390/polym9070302>
23. *He F., Cheng Y., Lin J., Ni J., Xu Z., Sugioka K., Midorikawa K.* // New J. Phys. 2011. V. 13. P. 083014. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/13/8/083014>
24. *He F., Xu H., Cheng Y., Ni J., Xiong H., Xu Z., Sugioka K., Midorikawa K.* // Opt. Lett. 2010. V. 35. № 7. P. 1106. <https://doi.org/10.1364/OL.35.001106>
25. *Vitek D.N., Adams D.E., Johnson A., Tsai P.S., Backus S., Durfee C.G., Kleinfeld D., Squier J.A.* // Opt. Express. 2010. V. 18. № 17. P. 18086. <https://doi.org/10.1364/OE.18.018086>
26. *Chu W., Tan Y., Wang P., Xu J., Li W., Qi J., Cheng Y.* // Adv. Mater. Technol. 2018. V. 3. № 5. P. 1. <https://doi.org/10.1002/admt.201700396>
27. *Tan Y., Chu W., Wang P., Li W., Qi J., Xu J., Wang Z., Cheng Y.* // Phys. Scr. IOP Publishing. 2019. V. 94. № 1. P. 015501. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/aaec99>