

## Разработка комплекса фабрикации метаповерхностей методом прямого лазерного переноса с независимым перемещением подложек донор–акцептор

© Д.А. Кочуев, А.С. Черников, Р.В. Чкалов, К.С. Хорьков, М.Ю. Губин, А.В. Шестериков, А.В. Прохоров

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых,  
600000 Владимир, Россия  
e-mail: khorkov@vlsu.ru

Поступило в Редакцию 8 декабря 2025 г.  
В окончательной редакции 8 декабря 2025 г.  
Принято к публикации 8 декабря 2025 г.

Представлена разработка комплекса для фабрикации метаповерхностей методом лазерно-индуцированного прямого переноса с использованием системы независимого перемещения подложек донор–акцептор. Проведен анализ основных параметров процесса: энергии лазерного излучения, распределения плотности мощности лазерного пучка, толщины донорной пленки, параметров фокусирующих объективов и расстояний между подложками. Обоснована необходимость строгого контроля каждого из этих параметров для обеспечения стабильного и воспроизводимого переноса наночастиц. Основные результаты экспериментов продемонстрировали эффективный перенос кремниевых наночастиц с оптимальной толщиной пленок около 40 нм, использование объективов с высокой числовой апертурой для минимизации энергетических параметров, а также влияние расстояния донор–акцептор на формирование сферических наночастиц и предотвращение повреждений акцепторной поверхности. Предложенный комплекс и методика обеспечивают стабильное формирование метаповерхностей с точным позиционированием и контролем периода.

**Ключевые слова:** лазерно-индуцированный прямой перенос, лазерная печать, метаповерхности.

DOI: 10.61011/JTF.2026.05.62766.331-25

### Введение

Технология лазерного переноса является эффективным и достаточно универсальным методом получения метаповерхностей и 4D-печати материалов. Современные темпы развития данной технологии позволяют ожидать от нее качества формирования структур на уровне литографии. Особенности данного метода открывают простор для построения структур, комбинации материалов и геометрии формируемых ячеек. Лазерно-индуцированный прямой перенос (LIFT) является бесконтактным способом транспортировки веществ для применений в различных областях физики, химии, биологии и медицины. В отличие от фотолитографии, лазерно-индуцированный подход имеет тенденцию значительно сокращать время и уменьшать количество шагов изготовления требуемого шаблона [1]. В [2,3] описаны современные технологии печати функциональных материалов и биопринтинга с анализом проблем и перспектив развития метода, включая механизмы переноса, виды лазеров и применяемые материалы. Наносекундные и фемтосекундные импульсы создают разные механизмы переноса наноматериалов, причем использование фемтосекундных импульсов дает более точный и чистый перенос [4]. Также данный метод успешно используется для печати гидрогелей с живыми клетками, сохраняя высокую жизнеспособность и структуру тканей [5,6]. Параметры лазерного излучения, в осо-

бенности длительность и форма импульсов, позволяют контролировать процесс переноса, повысить качество и точность осаждения наночастиц [7–10]. Технология LIFT позволяет осуществлять перенос металлических пленок, создавать микроузлы с высокой разрешающей способностью [11], элементы чувствительных микросенсоров с низким энергопотреблением [2,3], проводящие чернила, что важно для гибкой и носимой электроники [12], 3D-микроструктуры с контролируемой топологией и высокой функциональностью [13], полимерные композиты с разнообразными свойствами и структурами [14], графеновые паттерны, обеспечивающие создание функциональных электронных компонентов [15,16].

Несмотря на большой интерес и вовлеченность множества научных сообществ в данную тематику, можно выделить ряд проблем при осуществлении данной операции: периодичность структур, использование различных материалов, а также производительность операции переноса.

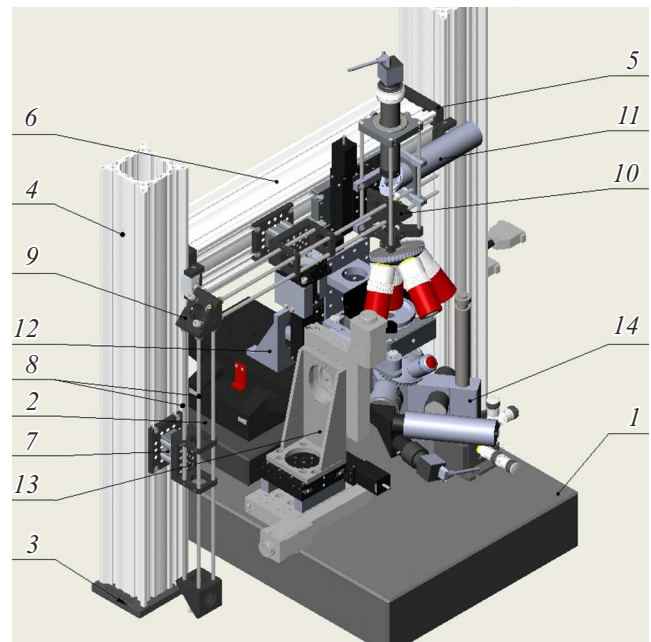
Целью настоящей работы является освещение проблемы выполнения лазерного переноса различных материалов путем независимого перемещения подложки донора и акцептора. Концепция данного подхода основана на опыте построения аналогичных систем, описанных в литературе [17–22]. Использование данных источников в качестве отправной точки обусловлено близкими характеристиками имеющегося оборудования применительно к решениям и целям, представленным в этих работах.

## 1. Материалы и схемы проведения экспериментов

Процесс лазерной печати требует использования высокоточных и стабильных систем линейного перемещения. Период получаемых структур определяется параметрами используемой оптики, расстоянием донор–акцептор, а также типом переносимых материалов. Система перемещения донор–акцептор определяет характер возможных структур, формируемых в процессе лазерного переноса, а также точность воспроизведения периода. Лазерный прямой перенос при размещении донора над поверхностью акцептора в статичном исполнении устанавливает ограничение по периоду переносимых наночастиц. Период ограничен областью воздействия лазерного луча на поверхность донорной пленки. В процессе выполнения операции переноса на донорной пленке формируется кратер (порядка  $1\ \mu\text{m}$ ), значительно превосходящий по размерам перенесенное тело. Кратер представляет собой область с нарушенной поверхностью и отсутствием пленки, повторное попадание в которую будет нарушать режим стабильного переноса, соответственно, период формируемой метаповерхности не может быть меньше  $1\ \mu\text{m}$  (без учета вероятного нарушения адгезии пленки донора в зоне лазерного воздействия), что выходит за рамки требований к периодам структур, работающих в видимом оптическом диапазоне. Организация независимого перемещения донор–акцептор открывает возможность, помимо снижения периода переносимых структур до близкого к размерам переносимых структур, формирования метаповерхностей из различных материалов с периодом, близким к размерам переносимых частиц, однако накладываются достаточно жесткие требования к точности и воспроизводимости систем перемещения.

Общий вид разработанной экспериментальной установки для работ по лазерному прямому переносу наночастиц с поверхности донора на поверхность акцептора представлен на рис. 1.

Описываемая система построена на основе технологической установки, которая используется в работах [23–25]. В качестве источника использовалась фемтосекундная лазерная установка ТЕТА-10 с длиной волны  $515\ \text{nm}$ , длительностью импульса  $300\ \text{fs}$ , частотой следования импульсов до  $10\ \text{kHz}$ . Для производства метаповерхностей использовались тестовые пленки-доноры: Si ( $25, 40, 70, 100, 130\ \text{nm}$ ) и Au ( $40\ \text{nm}$ ), нанесенные на кварцевое стекло ( $120\text{–}300\ \mu\text{m}$ ). Поверхность акцептора — Au ( $8\ \text{nm}$ ), нанесенное на кварцевое стекло ( $120\ \mu\text{m}$ ). Наиболее успешные результаты прямого лазерного переноса удалось осуществить с пленками толщиной  $40\ \text{nm}$ . Пленки  $25\ \text{nm}$  показали меньшую стабильность переноса, связанную с высокой чувствительностью положения относительно фокальной плоскости используемого микрообъектива и перепадам энергии излучения. Использование пленок  $70, 100$  и  $130\ \text{nm}$  не позволяет получить формирование одиночной



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки лазерного переноса с независимым перемещением донор–акцептор: 1 — общее основание системы, выполненное на гранитной поверочной плите  $400 \times 600 \times 100$  кл.00; 2 — компенсационная гранитная поверочная плита  $300 \times 200 \times 50$  кл.00; 3 — крепление опоры портала; 4 — вертикальная опора портално-перископической системы транспортировки излучения; 5 — кронштейн горизонтальной направляющей портално-перископической системы; 6 — горизонтальная направляющая портално-перископической системы; 7 — сборка узла крепления монтажных спиц к портално-перископической системе; 8 — монтажные спицы  $6\ \text{mm}$  длиной  $450\ \text{mm}$ ; 9 — кинематический держатель зеркала с установленным зеркалом на две длины волны ( $515$  и  $1030\ \text{nm}$ ); 10 — точка крепления дихроичного зеркала прозрачного на видимый диапазон, глухого для  $1030$  или  $515\ \text{nm}$ , в зависимости от используемого излучения; 11 — система визуализации области воздействия лазерного луча; 12 — система перемещения донора, выполненная с использованием прецизионных линейных направляющих с ходом  $100 \times 100 \times 25\ \text{mm}$  и пьезокерамического ультраточного позиционера с ходом  $100 \times 100 \times 20\ \text{mm}$ ; 13 — система перемещения акцептора, выполненная на базе прецизионных линейных направляющих с ходом  $100 \times 100 \times 25\ \text{mm}$ ; 14 — система визуализации процесса переноса в темном/светлом поле, оснащенная объективом  $50\times$  и спектрально-селективной системой подсветки.

частицы на поверхности акцептора в виде большого объема выбрасываемого материала. Расстояние между донором и акцептором составляло порядка  $10\ \mu\text{m}$ . Образцы размещались на разработанном вакуумном держателе, позволяющем фиксировать различные образцы без разработки специализированной оснастки. Основное требование к образцам — толщина меньше рабочего отрезка используемого объектива (записи структур или наблюдения в темном поле). Данный метод позволяет осуществлять монтаж и демонтаж образцов без меха-

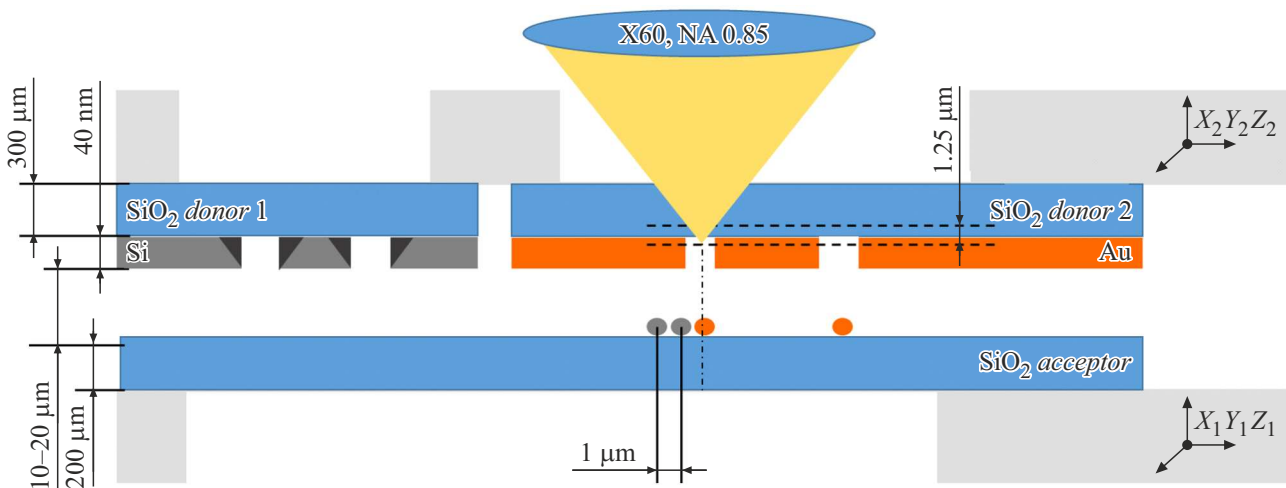


Рис. 2. Схема процесса переноса нескольких материалов в рамках одного технологического процесса.

нического воздействия как на прецизионные элементы установки, так и непосредственно на устанавливаемые образцы (донор и акцептор). Данный эффект особенно выражен при использовании тонких ( $120\text{--}150\ \mu\text{m}$ ) кварцевых подложек. Для обеспечения воспроизводимого результата необходима точность перемещения не хуже  $0.1\ \mu\text{m}$  по всем осям. Минимальное перемещение в линейных плоскостях в разработанной установке составляло  $1\ \text{nm}$  с двунаправленной повторяемостью  $\pm 75\ \text{nm}$ . Процесс переноса контролируется в режиме реального времени с использованием метода микроскопии темного поля, эффективного для качественной оценки результатов переноса в зависимости цвета точек рассеяния от размера получаемых частиц.

Осуществление возможности переноса нескольких материалов в рамках одного технологического процесса возможно при использовании независимых подложек донор-акцептор и их отдельного перемещения. Таким образом, решается проблема формирования структур вне зависимости от зоны повреждения на донорной подложке, которая, в свою очередь, зависит от комплекса взаимосвязанных факторов. Данная возможность реализована в разрабатываемом комплексе. Общий вид схемы переноса нескольких материалов представлен на рис. 2.

## 2. Проблемы лазерного переноса наночастиц

Нарушение структуры донорной пленки ведет к неконтролируемому разрушению и, как следствие, формированию разупорядоченных структур различного размера и случайного количества, что представлено на рис. 3. Наблюдаемые дефекты — это отклонение направления переносимой частицы. Данный эффект можно наблюдать, попадая в участки пленки, которые имеют напряженное состояние (зона, близкая к области воздействия лазерного луча, но визуально не отличающаяся), а также

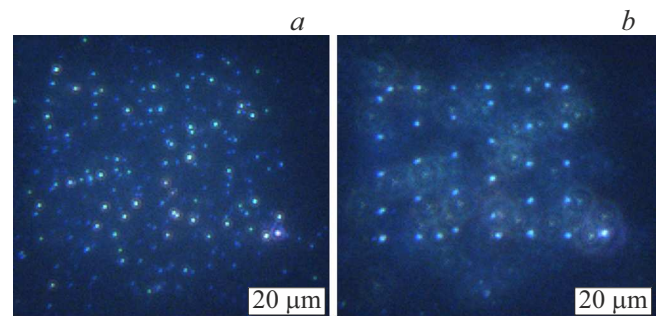
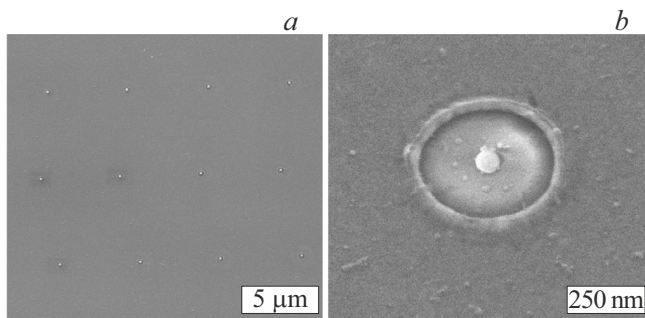


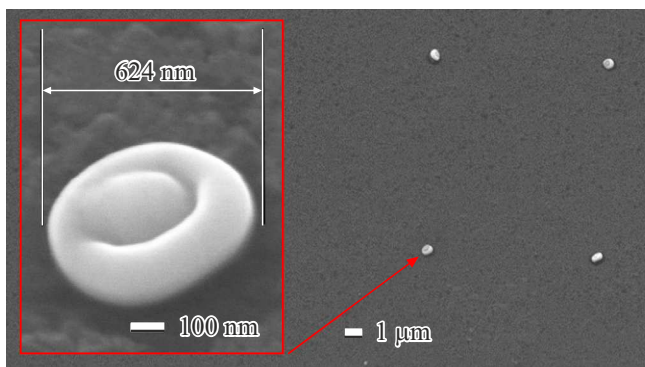
Рис. 3. Изображение, полученное методом микроскопии темного поля в процессе настройки процесса переноса Si на поверхность акцептора  $\text{SiO}_2$ : *a* — в проходящем/отраженном свете, *b* — в темном поле.

при использовании пленок низкого качества (нестабильная адгезия пленки к подложке, флуктуации толщин). Повысить разрешение и воспроизводимость лазерного переноса возможно, исключив работу с поврежденными участками пленки, путем смещения зоны воздействия на расстояние от единиц до нескольких десятков микрометров. Сохранить период получаемых структур на акцепторе возможно путем независимого перемещения донорной подложки относительно акцепторной. Данный подход позволяет, помимо стабильного переноса, осуществлять фабрику поверхности, используя различные материалы.

Последующий анализ перенесенных структур, геометрических характеристик частиц, формируемого массива и количества переносимых частиц осуществлялся с использованием метода электронной микроскопии (рис. 4). На данном изображении представлен результат стабильного переноса кремниевых наночастиц на поверхность акцептора, содержащего золотую пленку. Диаметр перенесенных наночастиц на поверхности ак-



**Рис. 4.** СЭМ изображения лазерного переноса кремниевых наночастиц на поверхность акцептора с нанесенной золотой пленкой: *a* — массив перенесенных наночастиц, *b* — изображение отдельной наночастицы.



**Рис. 5.** СЭМ изображение и вставка деформации перенесенного объекта.

цептора варьируется в пределах 80–90 нм. Перенос данных частиц выполнен с использованием объектива ЛОМО 60X NA 0.85 с энергией лазерного излучения 1–10 нДж в шахматном порядке с шагом 5 мкм, смещение четного ряда — 1 мкм.

Расстояние донор–акцептор оказывает влияние на время полета частицы, что позволяет сформироваться переносимому материалу в тело сферической формы. В процессе полета контакт с атмосферными газами позволяет остыть выброшенному материалу в форме сферы. При переносе „горячих“ частиц нередко встречается явление деформации. Форма сферы искажается, что представлено на рис. 5.

### 3. Результаты и их обсуждение

В разд. 3 выделены доминирующие параметры, вносящие наибольший вклад в процесс и требующие особого внимания при выполнении лазерного прямого переноса.

I. Энергия лазерного излучения определяет объем удаляемого материала и его состояние при выбросе. В процессе взаимодействия лазерного излучения с границей раздела стекло–материал донора могут развиваться последовательные физические процессы в зависимости

от возрастания энергии: акустический отрыв пленки, локальное оплавление, образование плазмы. Поглощение и диссипация энергии фемтосекундных лазерных импульсов носят нелинейный характер и зависят от свойств и состояния обрабатываемого материала. При лазерной обработке тонких пленок размерный эффект играет ключевую роль, так как толщина пленки влияет как на процессы, происходящие во время воздействия, так и на релаксационные процессы после него. Передача энергии лазерных импульсов вызывает интенсивное движение электронного газа внутри кристаллической решетки материала. Для тонких пленок энергия адгезии пленки к подложке в сопоставлении с энергией колебаний атомов решетки (где смещения атомных позиций достигают нескольких периодов решетки) приводит к отрыву пленки от подложки. В дальнейшем при движении отделенной пленки за счет теплопроводности материал переходит в расплавленное состояние, что уравнивает энергетическое состояние всего выброшенного кластера. Под воздействием поверхностного натяжения расплавленный кластер принимает сферическую форму. При выбросе может формироваться ряд таких сфер в зависимости от толщины пленки, начальной энергии лазерного излучения и распределения мощности в лазерном пучке. Идеальным результатом является формирование одной основной сферы диаметром от нескольких десятков до нескольких сотен нанометров. Стабильный перенос возможен при точной настройке энергии лазерного излучения и поддержании высокой стабильности данного параметра.

II. Распределение плотности мощности в поперечном сечении лазерного пучка является одним из ключевых параметров, определяющих эффективность и точность процесса лазерно-индуцированного прямого переноса. Пятно должно иметь строгое осесимметричное распределение энергии лазерного излучения. В противном случае невозможно добиться переноса наночастиц соосно с оптической осью системы. В результате этого возможны дефекты в виде отклоненных перенесенных частиц от оптической оси системы, формирования неконтролируемого числа переносимых капель на поверхности акцептора вместо одной. Таким образом, качество распределения плотности мощности в зоне каустики должно строго соответствовать дифракционному качеству пучка лазера и контролироваться с высокой точностью для обеспечения соосного однородного переноса материала.

III. Толщина пленки оказывает существенное влияние на объем материала, выбрасываемого при лазерно-индуцированном прямом переносе. В данной технологии существует фундаментальное ограничение, связанное с длиной волны используемого лазерного излучения, которое определяет минимальный размер области воздействия на пленку донора при соблюдении дифракционного качества пучка. Теоретически разрешающая способность может достигать значения порядка  $\lambda/2$ . В настоящей работе использовано лазерное излучение с длиной волны  $\lambda = 515$  нм, что позволяет формировать

Параметры объективов и области перетяжки лазерного излучения

Используемый микрообъектив	Диаметр перетяжки, $\mu\text{m}$	Длина перетяжки, $\mu\text{m}$	Рабочий отрезок, mm	Пропускание, % (при 515 nm)
Mitutoyo M Plan Apo Nir 50x/0.42	1.1	1.86	17	71
Mitutoyo M Plan Apo Nir 100x/0.50	0.8	1.33	12	42.5
Mitutoyo M Plan Apo Nir HR 100x/0.70	0.75	0.7	10	48
ЛОМО ПЛАН-АПО 60x/0.85	0.75	0.46	0.45	55

пятно воздействия диаметром порядка 250 nm, что соответствует потенциальному пределу пространственного разрешения переносимого материала. Таким образом, регулировать выбрасываемый объем возможно путем изменения толщины пленки.

IV. Фокусирующий объектив должен обеспечивать формирование лазерного пятна минимального размера и дифракционного качества на границе раздела подложка–донорная пленка. Используемый объектив должен передавать достаточную энергию для инициирования отрыва минимального участка материала, при этом предотвращая избыточный объемный прогрев. Применение объективов с высокой числовой апертурой позволяет значительно сократить длину зоны фокусировки (зону каустики), уменьшая перетяжку лазерного воздействия. Это способствует концентрации энергии в переносимом материале, минимизируя неоднородности и разделение аблируемого участка пленки на множественные объекты.

Оценка значений параметров перетяжки при фокусировке различными объективами осуществлялась методом ножа по уровню 10% / 90% мощности, шаг смещения ножа составлял 50 nm. Измеренные величины отклоняются от теоретических величин ( $D_{Airy} = 1.22 \cdot \lambda/NA$ ) не более чем на 10%. Длина перетяжки (длина Рэлея) определялась аналитически согласно соотношению ( $Z_R = \lambda/\pi \cdot NA^2$ ). Значения длины Рэлея и длины перетяжки представлены в таблице. Стоит отметить, что в задачах LIFT в описанной конфигурации экспериментальной установки, контролируемый перенос удалось осуществить с помощью микрообъекта ЛОМО ПЛАН-АПО 60x/0.85. Вероятно, результат связан с небольшой по сравнению с объективами, обладающими меньшей числовой апертурой, длиной перетяжки, формируемой данным микрообъективом. Использование микрообъективов с числовой апертурой до 0.85 не позволило сформировать на поверхности акцепторной подложки одиночные частицы.

V. Расстояние между подложками в процессе лазерно-индуцированного прямого переноса, согласно литературным данным, должно находиться в диапазоне 10–200  $\mu\text{m}$ . Увеличение данного расстояния приводит к значительному отклонению траектории перенесенных наночастиц от оси распространения лазерного излучения, что может выходить за пределы допустимого

смещения относительно периода формируемой структуры. При расстояниях менее 10  $\mu\text{m}$  существует высокая вероятность повреждения поверхности акцепторной подложки лазерным излучением, что особенно критично для акцепторов с тонкими пленочными покрытиями, что иллюстрируется на рис. 4, b.

VI. Донорная пленка, подвергаемая воздействию лазерного излучения, должна обладать изотропными свойствами, обеспечивающими равномерную величину адгезии к подложке на всех участках пленки, а также поддерживать постоянную толщину по всей поверхности. Каждый из этих параметров оказывает критическое влияние на стабильность и воспроизводимость процессов лазерного переноса. Отклонения от заданных значений параметров приводят к нарушению режима стабильного переноса или делают невозможным определение адекватных параметров для прогнозируемого переноса материала с донора на акцептор.

## Заключение

Разработанная в рамках выполнения работы установка позволяет осуществлять стабильный лазерный перенос одиночных частиц с донорной подложки (кремний) на поверхность акцептора (подложка из оксида кремния с тонкой золотой пленкой). Оптимальные параметры донорных пленок (толщина  $\sim 40$  nm) обеспечивают формирование одиночных наночастиц диаметром 80–90 nm с высокой степенью контроля. Перенос частиц осуществлялся на лазерной установке со следующими параметрами:  $\lambda = 515$  nm,  $\tau = 300$  fs,  $f = 10$  kHz,  $E = 6$  nJ. В экспериментах использовался объектив ЛОМО 60X NA 0.85, который позволял фокусировать пучок диаметром порядка 1  $\mu\text{m}$  по уровню  $1/e^2$ . Система контроля процесса переноса на основе метода микроскопии темного поля позволяет эффективно управлять процессом переноса (контролировать период и размер) формируемых структур на основе темнопольного изображения. Система вакуумной фиксации образцов к предметным столикам позволяет исключить механическое воздействие на подложки донор–акцептор, что, в свою очередь, исключает нарушение плоскостности и взаимную разориентацию образцов друг относительно друга по высоте. Независимое перемещение подложек донор–

акцептор позволяет преодолеть ограничения, связанные с периодичностью формируемых структур, добиться воспроизводимости и стабильности процесса, формировать упорядоченные структуры из групп материалов за один технологический процесс.

Разработанный подход расширяет возможности лазерной микрофабрикации метаповерхностей и открывает перспективы для создания интегрированных устройств с нанометровой точностью.

### Финансирование работы

Исследование процессов формирования наночастиц и сборка экспериментальных схем выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 24-12-20015. Подготовка и анализ образцов выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема FZUN-2024-0019.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] M. Colina, P. Serra, J.M. Fernández-Pradas, L. Sevilla, J.L. Morenza. *Biosens. Bioelectron.*, **20** (8), 1638 (2005). DOI: 10.1016/j.bios.2004.08.047
- [2] C.K.W. Lee, Y. Pan, R. Yang, M. Kim, M.G. Li. *Top. Curr. Chem.*, **381** (4), 18 (2023). DOI: 10.1007/s41061-023-00429-6
- [3] P. Serra, A. Piqué. *Adv. Mater. Technol.*, **4** (1), 1800099 (2019). DOI: 10.1002/admt.201800099
- [4] N.T. Goodfriend, I. Mirza, A.V. Bulgakov, E.E. Campbell, N.M. Bulgakova. *Mater. Res. Express*, **12** (6), 065004 (2025). DOI: 10.1088/2053-1591/ade497
- [5] V. Yusupov, S. Churbanov, E. Churbanova, K. Bardakova, A. Antoshin, S. Evlashin, P. Timashev, N. Minaev. *Int. J. Bioprinting*, **6** (3), 271 (2020). DOI: 10.18063/ijb.v6i3.271
- [6] Н.В. Минаев, В.С. Жигарьков, В.С. Чепцов, В.И. Юсупов. *Оптика и спектр.*, **132** (1), 97 (2024). DOI: 10.61011/OS.2024.01.57557.16-24
- [7] Z.U. Rehman, F. Yang, M. Wang, T. Zhu. *Opt. Laser Technol.*, **160**, 109065 (2023). DOI: 10.1016/j.optlastec.2022.109065
- [8] L. Duvert, C. Murru, A. Al-Kattan, A.P. Alloncle, F. Magdinier, S. Testa, A. Casanova. *Int. J. Bioprinting*, **11**, 290 (2025). DOI: 10.36922/ijb.7788
- [9] Y. Shan, L. Wu, B. Jiang. *AIP Adv.*, **15** (9), 095021 (2025). DOI: 10.1063/5.0271907
- [10] J. Chang, X. Sun. *Front. Bioeng. Biotechnol.*, **11**, 1255782 (2023). DOI: 10.3389/fbioe.2023.1255782
- [11] Z. Wang, Z. Cheng, Y. Zhang, Y. Yu, X. Zhai, Z. Zhao, L. Hu, Y. Hu. *Chem. Eng. J.*, **429**, 132512 (2022). DOI: 10.1016/j.cej.2021.132512
- [12] P. Sopena, J.M. Fernández-Pradas, P. Serra. *Appl. Surf. Sci.*, **507**, 145047 (2020). DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.145047
- [13] M.A. Mahmood, A.C. Popescu. *Polymers*, **13** (13), 2034 (2021). DOI: 10.3390/polym13132034
- [14] X. Huang, M. Li, Q. Yin, X. Wang, R. Xu, T. Ma, Z. Chen, J. Chen, J. Lai. *Opt. Laser Technol.*, **192**, 113914 (2025).
- [15] E.C. Smits, A. Walter, D.M. De Leeuw, K. Asadi. *Appl. Phys. Lett.*, **111** (17), 173101 (2017). DOI: 10.1063/1.5001712
- [16] J. Li, J. Hong, Y. Zhang, X. Li, Z. Liu, Y. Liu, D. Chu. *Cameras and Display Systems Towards Photorealistic 3D Holography* (Springer, Cham., 2023), ch. 8. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-45844-6\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-45844-6_8)
- [17] A.A. Ionin, S.I. Kudryashov, A.A. Rudenko, L.V. Seleznev, D.V. Sinitsyn, S.V. Makarov. *Opt. Mater. Express*, **7** (8), 2793 (2017). DOI: 10.1364/OME.7.002793
- [18] D.M. Zhigunov, A.B. Evlyukhin, A.S. Shalin, U. Zywiets, B.N. Chichkov. *ACS Photonics*, **5** (3), 977 (2018). DOI: 10.1021/acsphotonics.7b01275
- [19] U. Zywiets, A.B. Evlyukhin, C. Reinhardt, B.N. Chichkov. *Nat. Commun.*, **5** (1), 3402 (2014). DOI: 10.1038/ncomms4402
- [20] P.A. Dmitriev, S.V. Makarov, V.A. Milichko, I.S. Mukhin, A.M. Mozharov, A.A. Samusev, A.E. Krasnok, P.A. Belov. *J. Phys. Conf. Ser.*, **690** (1), 012020 (2016). DOI: 10.1088/1742-6596/690/1/012020
- [21] F. Zacharatos, M. Duderstadt, E. Almpanis, L. Patsiouras, K. Kurselis, D. Tsoukalas, C. Reinhardt, N. Papanikolaou, B.N. Chichkov, I. Zergioti. *Opt. Laser Technol.*, **135**, 106660 (2021). DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106660
- [22] D. Pavlov, S. Syubaev, A. Kuchmizhak, S. Gurbatov, O. Vitrik, E. Modin, S. Kudryashov, X. Wang, S. Juodkazis, M. Lapine. *Appl. Surf. Sci.*, **469**, 514 (2019). DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.11.069
- [23] R. Chkalov, K. Khorkov, D. Kochuev, N. Davydov, V. Prokoshev, V. Kostrov. *Proceed. Intern. Conf. WWW/INTERNET 2018 and APPLIED COMPUTING 2018 (IADIS, Budapest, 2018)*, p. 395–399. ISBN: 978-989-8533-82-1
- [24] R. Chkalov, K. Khorkov, V. Prokoshev. *Intern. Conf. Industrial Eng. Applications and Manufacturing (ICIEAM, 1–5 IEEE, 2019)*, DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8743072
- [25] R.V. Chkalov, K.S. Khorkov, D.A. Kochuev, A.N. Zolotov, V.G. Prokoshev. *J. Phys. Conf. Ser.*, **1164** (1), 012009 (2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1164/1/012009