

УДК 57.621.383

**В.С. Терентьев¹, А.В. Достовалов^{1, 2}, В.П. Бессмельцев¹,
М.А. Грачев³, С.А. Бабин^{1, 2}**

¹ Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³ Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

**ИЗГОТОВЛЕНИЕ МАТРИЦ НАНООТВЕРСТИЙ
В ТОНКОЙ АЛЮМИНИЕВОЙ ПЛЕНКЕ
МЕТОДОМ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ АБЛЯЦИИ
С ПОМОЩЬЮ ДИФРАКЦИОННОГО МУЛЬТИПЛИКАТОРА**

Представлено экспериментальное исследование возможности изготовления матрицы субмикронных отверстий в пленке алюминия толщиной 100 нм, расположенной на кварцевой подложке, методом фемтосекундной лазерной абляции с использованием дифракционного оптического элемента (ДОЭ). Из одного луча с длиной волны 513 нм фемтосекундного лазера ДОЭ формирует матрицу независимых лучей (3×3), которые с помощью оптической системы фокусируются на пленку. Получены матрицы отверстий со средними размерами 800/550 нм по длиной/короткой оси отверстий и со среднеквадратичным отклонением 30 нм. Обсуждаются возможности дальнейшего развития метода.

Ключевые слова: фемтосекундная лазерная абляция; тонкие металлические пленки, дифракционный оптический элемент мультипликатор.

**V.S. Terentyev¹, A.V. Dostovalov^{1, 2}, V.P. Bessmeltsev¹,
M.A. Grachev³, S.A. Babin^{1, 2}**

¹ Federal State Scientific Institution Institute of Automation and Electrometry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

³ Federal State Scientific Institution Limnological Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

**FABRICATION OF NANOHOLE MATRICES IN THIN ALUMINUM
FILM BY FEMTOSECOND ABLATION METHOD USING
DIFFRACTION MULTIPLICATOR**

The paper presents an experimental study of the possibility of manufacturing a matrix of submicron holes in a 100 nm aluminum film located on a quartz substrate by femtosecond laser ablation using

a diffraction optical element (DOE). From a single beam of a femtosecond laser with a wavelength of 513 nm, DOE forms a matrix of independent beams (3x3), which focus on the film with the help of an optical system. Hole matrices with an average size of 800/550 nm along the long/short axis of the holes and a standard deviation of 30 nm are obtained. The possibilities of further development of the method are discussed.

Keywords: femtosecond laser ablation; thin aluminum film, diffraction optical multiplicator.

Введение

Для целей одномолекулярной флуоресцентной спектроскопии (ОФС) требуется изготовление наноотверстий диаметром до нескольких сот нанометров в пленке алюминия толщиной 100 нм [1, 2]. В частности, одним из наиболее приоритетных направлений ОФС является ДНК-секвенирование [3], в котором используются «волноводы нулевой моды» (ВНМ) – матрицы наноотверстий с вышеуказанными характеристиками, при этом процесс секвенирования может быть распараллелен, т.е. возможно одновременное считывание оптического сигнала из тысяч ВНМ [4].

Диаметр и форма отверстия ВНМ влияют на распределение светового поля внутри объема ВНМ, на краях отверстия, т.е. определяют внутреннее пространство, в котором электрическое поле световой волны возбуждающего света осветителя (лазера) ослабляется в e раз, и таким образом характерный объем взаимодействия с молекулами флюорфора. Например, доказано, что для целей ДНК-секвенирования оптимальный диаметр отверстия должен находиться в диапазоне от 70 до 150 нм [5]. Для других приложений размеры могут быть больше – до 400 нм и некруглой прямоугольной формы. Для изготовления отверстий таких малых размеров используют методы электронно-лучевой, ионно-лучевой литографии [6]. Основным способом создания таких структур является фотолитографический метод, использующий технологию взрыва фоторезиста «Lift-OFF- литография [7]. Данные методы обеспечивают высокое пространственное разрешение вплоть до 2 нм из-за возможности фокусировки энергии в малую пространственную область для фрезеровки (испарения) металлической пленки. Возможно использование и фотолитографического метода, если предварительно изготовить маску отверстий методами электронной литографии. Однако недостатки таких методов заключаются в длительности процесса изготовления на относительно больших площадях ($100 \times 100 \text{ мкм}^2$) и высокой себестоимости.

Альтернативным и сравнительно более быстродействующим методом для изготовления наноотверстий в металлических пленках является фемтосекундная лазерная аблация (ФЛА) [8, 9]. Процесс лазерной аблации может быть существенно ускорен, если применить оптические методы распараллеливания с помощью мультиплексии исходного лазерного луча, например, с помощью дифракционных оптических элементов (ДОЭ). Данный метод описан в литературе и в простейшем случае представляет собой интерференционную картину четырех лучей на поверхности [10]. В других работах минимальный размер зоны аблации/модификации составляет более 5 мкм [11, 12], либо используется ограниченное количество пучков [13].

Целью данной работы являются экспериментальное исследование комбинации методов ФЛА алюминиевой пленки и оптической мультиплексии лазерного луча с помощью ДОЭ для изготовления матриц отверстий менее 1 мкм на длине волны 513 нм и оценка возможностей получения матриц ВНМ данным методом с высоким качеством и повторяемостью.

1. Метод фемтосекундной лазерной аблации

Методы лазерной аблации успешно применяются для резки, перфорирования металлов в промышленности с использованием наносекундных лазеров. Однако для создания субмикронных отверстий данный тип лазеров не применим, поскольку в случае недлительности импульсов процесс аблации сопровождается плавлением металла в области фокусировки лазерного излучения и формированием широкой зоны теплового воздействия:

$$l = \sqrt{\tau k}, \quad (1)$$

где τ – длительность импульса, k – коэффициент температуропроводности, для 1 нс длительности для алюминия $l = 300$ нм. Это существенно снижает пространственное разрешение и качество создаваемых отверстий. Фемтосекундная (1 фс = 10^{-15} с) лазерная аблация металлов лишена данных недостатков, поскольку в этом случае процесс поглощения излучения происходит настолько быстро, что материал посредством различных механизмов (кулоновский взрыв, фрагментация и др.) испаряется и, возможно, минует фазу расплава. Более того, зона теплового воздействия в данном случае минимальна, что в совокупности

и обеспечивает высокое пространственное разрешение и качество создания отверстий. Также было показано [14], что поскольку процесс абляции имеет пороговый характер, то возможно создание отверстий с диаметром d меньше дифракционного предела:

$$d^2 = 2w_0^2 \ln\left(\frac{F_0}{F_{th}}\right), \quad (2)$$
$$F_0 = \frac{2E_p}{\pi w_0^2},$$

где E_p – энергия импульса; w_0 – радиус гауссовского луча; F_{th} – пороговая плотность энергии (флюенс) абляции металла.

В предыдущей работе [15] нами были продемонстрированы результаты по созданию субмикронных отверстий в Al-фольге толщиной 100 нм с использованием УФ-отражательного микрообъектива с числовой апертурой 0,65. Были найдены зависимости диаметра кратера от энергии и числа импульсов, демонстрирующие хорошее согласие эксперимента и теории, были определены оптимальные энергия и число фемтосекундных импульсов для формирования наноотверстий с размером < 150 нм. Экспериментальные результаты продемонстрировали возможность быстрого изготовления наноотверстий в алюминиевой пленке для целей одномолекулярной спектроскопии. В данной работе этот подход был развит с целью одновременного формирования в фокальной плоскости объектива матрицы отверстий с помощью ДОЭ. Поскольку имеющийся ДОЭ эффективно работает в видимой области спектра, в первых экспериментах по проверке возможностей метода использовалось фемтосекундное излучение с длиной волны 513 нм.

2. ДОЭ-мультиплексор

ДОЭ-мультиплексор формирует матрицу сфокусированных точек, изображение которых переносится в фокальную плоскость объектива. ДОЭ представляет собой многоуровневый фазовый узор диаметром 8 мм, нанесенный на кварцевую подложку методом лазерной фотолитографии [16]. Из лазерного луча, проходящего через ДОЭ, формируется 25×25 лучей, фокусирующихся на расстоянии 150 мм от ДОЭ в матрицу световых пятен с геометрическими размерами $7,2 \times 7,2$ мм между центрами крайних пятен. Диаметр пятен близок к

дифракционному пределу в 20 мкм (на длине волны 532 нм), расстояние между пятнами – 300 мкм. Можно выделить два фактора, которые оказывают влияние на профиль интенсивности каждого пятна в матрице. Как следует из (1), процесс абляции является пороговым процессом, и диаметр d образующегося отверстия зависит от превышения над порогом F_{th} интенсивности F_0 , т.е. на параметры отверстий будут прямое влияние оказывать степень равномерности распределения интенсивности в матрице световых пятен, а также стабильность интенсивностью углов дифракции лучей ДОЭ от длины волны. Поскольку излучение фемтосекундного лазера имеет сравнительно широкий спектр до 10 нм, а световые ряды в матрице пятен есть фактически дифракционные порядки относительно центра матрицы, то угол дифракции α_{mn} для точки из определенных ряда и столбца с номером m, n от центра будет пропорционален длине волны $\alpha_{mn} = C(m^2 + n^2)^{1/2}\lambda$, где C – константа. При изменении длины волны на $\Delta\lambda$ угол дифракции изменится на $C(m^2 + n^2)^{1/2}\Delta\lambda$, что может привести к заметному изменению угла для больших m и n . Это означает «размытие» сфокусированного светового пятна вдоль радиального направления от центра матрицы, и эффект будет максимальным для угловых точек. Очевидно, что это приведет к некруглой форме отверстий. Однако влияние данного паразитного эффекта может снижаться, если работать вблизи пороговых плотностей энергии (и/или в малых порядках дифракции), так как энергия фемтосекундного импульса неравномерно распределена по длинам волн, имеет максимум на определенной длине волны и может быть аппроксимирована функцией Гаусса.

3. Экспериментальная установка

Оптическая схема установки представлена на рис. 1. Коллимированный луч фемтосекундного лазера Pharos-6W (Л) проходит через 5х-расширитель пучка, затем, отражаясь от поворотного зеркала, попадает на ДОЭ-мультиплексор, который разбивает исходный луч на матрицу лучей, которые фокусируются в плоскости фокусировки (ПФ) на расстоянии $f_{ДОЭ} = 150$ мм от ДОЭ. Для того чтобы иметь возможность ограничивать количество пучков, вблизи ПФ размещается ирическая диафрагма (ИД). Далее на расстоянии $f_{ТЛ} = 100$ мм от ПФ расположена тубусная линза (ТЛ), после которой лучи становятся сколли-

мированными и сходящимися. В плоскости схождения лучей, где наблюдается минимальный диаметр пятна, размещается входная апертура объектива (О) с фокальным расстоянием f_O . Лучи фокусируются на поверхность алюминиевой пленки (Al). Используемый в данной работе ДОЭ имел сравнительно большую неоднородность интенсивности между центральными и периферийными лучами. Кроме этого была опасность повреждения объектива, если использовать все 625 лучей из-за высокой плотности мощности излучения, падающего на входную апертуру микрообъектива. Поэтому исходная матрица лучей диафрагмировалась, чтобы оставить около 10 лучей.

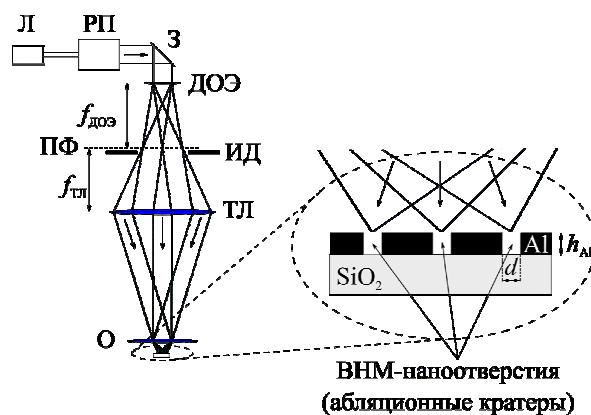


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: Л – фемтосекундный лазер; РП – расширитель пучка 5x; З – поворотное зеркало; ДОЭ – дифракционный оптический элемент-мультiplикатор; ПФ – плоскость фокуса ДОЭ; ИД – ирисовая диафрагма; ТЛ – тубусная линза; О – объектив; $f_{ДОЭ}$, $f_{ТЛ}$ – фокальные расстояния ДОЭ и ТЛ соответственно; Al – алюминиевая пленка; SiO_2 – кремниевая подложка; h_{Al} – толщина алюминиевой пленки; d – диаметр ВНМ

Алюминиевая пленка нанесена на кварцевую подложку (SiO_2) методом магнетронного вакуумного напыления. Перед напылением подложка была нагрета до 120 °C в течение 30 минут. Давление буферного газа (аргона) в вакуумной камере составляло $1 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. Источник питания магнетронов был стабилизирован по напряжению (напряжение разряда – 1 кВ, ток – 0,3 А). Для определения скорости напыления были сделаны тестовые напыления при определенной длительности, а толщина пленки измерялась на интерферометре белого света. Для получения заданной толщины в 100 нм кратно изменялось время напыления.

Длительность лазерных импульсов составляла 230 фс с частотой следования 1 кГц. Длина волны – 513 нм, диаметр – $2w_0 = 3,5$ мм (по уровню интенсивности e^{-2}). Линзовый объектив Mitutoyo 100Х с числовой апертурой 0.7 и эффективным фокусным расстоянием $fo = 2$ мм фокусирует излучение на подложку с пленкой Al, расположенную на 3D-позиционере ABL1000 (Aerotech).

Настройка положения фокусировки осуществлялась с помощью системы визуализации, состоящей из подсветки и видеокамеры (не показана на рисунке).

4. Результаты

В работе использовался метод ФЛА, аналогичный изложенному в статье [16], который заключается в поиске оптимальной энергии в лазерном импульсе и количества их повторений для формирования минимально возможного диаметра отверстий в матрице, обеспечения полной заполняемости матрицы и наименьшего отклонения геометрических размеров отверстий между собой.

Полная энергия импульсов измерялась с помощью головки PD10-pJ-C с фильтром и измерителя энергии излучения LaserStar Dual Channel (Ophir) в плоскости апертуры объектива и составляла 35,3, 57,6 и 81,6 нДж. При этом из-за разницы в диаметрах апертуры объектива (3 мм) и сходящихся коллимированных лучей (5 мм) в объектив попадала только часть энергии, измеренной в плоскости входной апертуры $(3/5)^2$. Учитывая этот коэффициент, энергия импульсов на выходе из объектива оценочно составляла: 12,7 ($\approx 1,2$ нДж/луч), 20,7 ($\approx 1,9$ нДж/луч) и 29,4 нДж ($\approx 2,7$ нДж/луч), частота следования импульсов 1 кГц. Частота следования импульсов выбиралась минимально возможной, чтобы избежать влияния эффектов температурного многоимпульсного накопления (пленка успевает остывать за время между импульсами). Менялось и время воздействия, т.е. количество импульсов, приходящихся на одно отверстие, оно варьировалось от 5 до 1000 с целью определения пороговых значений и поиска оптимальных характеристик. Процедура предварительной юстировки оптической системы состояла в угловом перемещении образца таким образом, чтобы при латеральном смещении образца на расстояние до 1 мм сдвиг по фокусу составлял менее 2 мкм. Плоскость фокусировки матрицы лазерных лучей совмещалась с плоскостью видеоматрицы. Обра-

зование наноотверстий наблюдалось на видеоматрице в режиме реального времени.

Предварительно для данной пленки была измерена энергия порога аблации для одного луча (без ДОЭ и ТЛ) в одноимпульсном режиме, которая составила около 3,6 нДж. С использованием ДОЭ были получены матрицы отверстий для 5, 10, 100 и 1000 импульсов. Снимки со сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Hitachi TM3000 представлены на рис. 2. Отверстия получились эллиптичной формы, что, по всей видимости, обусловлено аберрациями, присутствующими в оптической схеме записи. При 5 импульсах и энергии 4 нДж/луч наблюдалось неполное заполнение матрицы, а также плохое качество границы отверстий (см. рис. 2, а). При росте числа импульсов порог понижался, а качество отверстий улучшалось (см. рис. 2, б, в, г). Наиболее стабильные результаты были получены при 1000 импульсах. Далее было проведено более детальное исследование для количества импульсов с 700 до 1000 при разных величинах энергии импульсов.

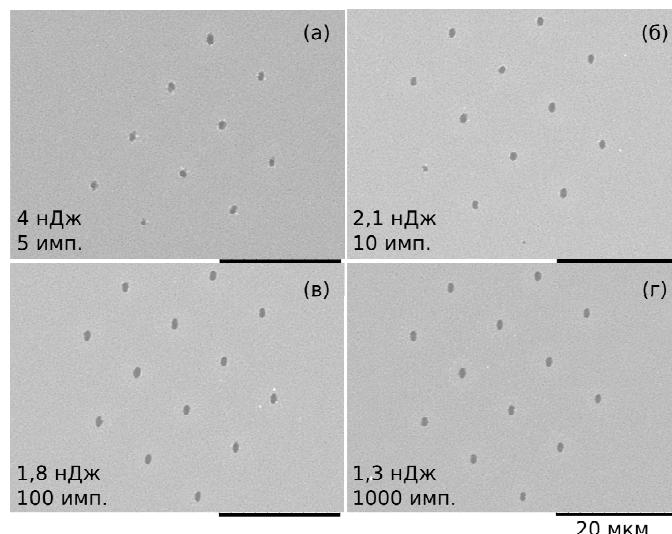


Рис. 2. Снимки СЭМ-матриц отверстий при разных энергиях и количестве импульсов:
а – 4 нДж/луч, 5 импульсов; б – 2,1 нДж/луч, 10 импульсов; в – 1,8 нДж/луч,
100 импульсов; г – 1,3 нДж/луч, 1000 импульсов

Было выполнено 1000, 950, 925 импульсов при энергии 1,2 нДж/луч. На рис. 3, а слева представлен снимок СЭМ-матрицы отверстий для 1000 импульсов, а справа – проходящий через него белый

свет, полученный на оптическом микроскопе. Отверстия прозрачны для света, что указывает на отсутствие металла внутри аблационного кратера. Это подтверждается черным цветом внутренней части кратеров на снимке с электронного микроскопа, который показывает отсутствие стекания заряда (для надежного стекания заряда достаточен слой проводящего металлического покрытия в 3–5 нм). Для 950 и 925 импульсов геометрия и повторяемость оказались достаточно близки, однако присутствует небольшой рост среднеквадратических отклонений при уменьшении числа импульсов. Для исследования характеристик была выбрана зона из девяти точек 3×3 , обведенная штриховой линией на рисунках. В таблице приводятся средние размеры изготовленных матриц отверстий по длинной (D_L) и короткой (D_S) осям отверстий, а также их среднеквадратические отклонения. При 900 импульсах диаметр кратеров уменьшается, однако происходит рост разброса диаметра кратеров и падает коэффициент заполнения (рис. 3, б).

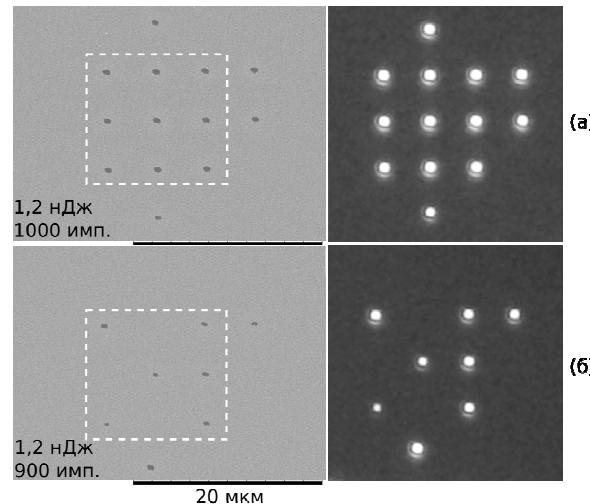


Рис. 3. Снимки СЭМ-матриц отверстий при 1,2 нДж/луч (слева), оптического микроскопа на пропускание в белом свете (справа).

Количество импульсов: *а* – 1000; *б* – 900

Повышение энергии до 1,9, а затем и до 2,7 нДж/луч привело как к увеличению диаметра кратеров, так и к большему среднеквадратичному отклонению размеров (рис. 4, см. таблицу).

Результаты повышения энергии

№ п/п	Число импульсов	D_L , нм	σ_L , нм	D_S , нм	σ_S , нм	Заполняе- мость матрицы
1,2 нДж/луч						
1	1000	802	35	556	26	9/9
2	950	784	28	547	37	9/9
3	925	824	41	535	62	9/9
4	900	623	118	375	29	6/9
1,9 нДж/луч						
5	1000	924	117	583	40	9/9
2,7 нДж/луч						
6	1000	1072	141	702	32	9/9
7	700	1046	109	664	53	9/9

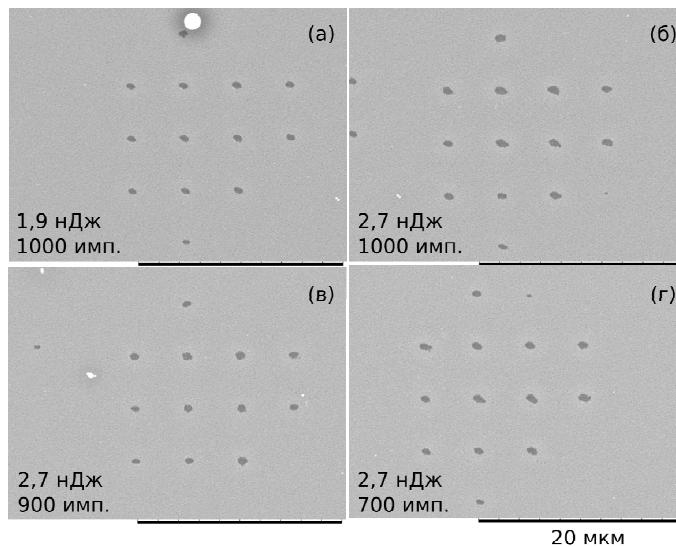


Рис. 4. Снимки СЭМ-матриц отверстий: *а* – 1,9 нДж/луч, 1000 импульсов; *б* – 2,7 нДж/луч, 1000 импульсов; *в* – 2,7 нДж/луч, 900 импульсов; *г* – 2,7 нДж/луч, 700 импульсов

Наиболее стабильный результат с хорошей повторяемостью, размерами отверстия 802/556 и точностью около 30 нм соответствовал в наших экспериментах энергии 1,2 нДж/луч и 1000 импульсов с частотой 1 кГц. При увеличении количества лучей до 1000 на объектив

будет падать энергия порядка 1 мкДж, что может быть близко к пределу лучевой стойкости его элементов, поэтому необходимо использовать специальные объективы, рассчитанные на заданную энергию фемтосекундного импульса.

5. Обсуждение результатов

Полученные экспериментальные результаты показали, что при увеличении количества импульсов резко уменьшается порог абляции, а также улучшаются качество отверстий и повторяемость параметров матрицы. Говоря о физическом механизме формирования отверстий при фс-лазерном воздействии, нужно отметить, что полученные результаты не могут быть объяснены постепенным локальным повышением температуры в пленке от импульса к импульсу. Согласно формуле (1) можно оценить характерный размер зоны нагрева за временной промежуток в 1 мс между импульсами для сред, окружающих зону отверстия, за исключением воздуха. Примем коэффициенты температуропроводности: для алюминия – $k_{Al} = 8,4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, кварца – $k_{SiO_2} = 0,14 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$. Если сравнить площади оттока тепла в эти среды, то они будут сравнимы по порядку величины: в алюминий через стенки отверстия – $S_{Al} \approx 2(0,8 \text{ мкм} + 0,5 \text{ мкм})0,1 \text{ мкм} = 0,26 \mu\text{m}^2$, в подложку – $S_{Al} \approx \pi/4 \cdot 0,8 \text{ мкм} \cdot 0,5 \text{ мкм} = 0,31 \text{ мкм}^2$. Поскольку температуропроводности различаются значительно, основной поток диссипации тепла будет направлен в окружающую пленку. Характерный размер зоны распространения температуры в пленке за 1 мс из (1) будет равен 290 мкм. Если оценить изменение температуры ΔT_1 данной зоны за один импульс с энергией $Q = 1,2 \text{ нДж}$, то с учетом только нагрева алюминиевой пленки с удельной теплоемкостью $c_{Al} = 920 \text{ Дж}/(\text{кг К})$, плотности $\rho_{Al} = 2700 \text{ кг}/\text{м}^3$, и коэффициента поглощения света $A_{Al} = 0,08$: $\Delta T = Q \cdot A_{Al} / (c_{Al} \rho_{Al}) = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ К}$, т.е. является пренебрежимо малой величиной. Однако здесь нужно учитывать, что в случае 1000 параллельных лучей, сосредоточенных в зоне менее 100 мкм, ΔT может быть кратно выше из-за взаимного температурного влияния.

На наш взгляд, наблюдаемое в экспериментах снижение порога абляции при образовании отверстий с увеличением количества импульсов может быть обусловлено эффектом «накопления» (англ. «incubation» effect [17] или «accumulation» effect [18]), который связан

с постепенным изменением оптических свойств поверхности при взаимодействии с пико- и фемтосекундными импульсами либо из-за химических реакций с окружающей средой, приводящих в итоге к увеличению коэффициента поглощения для последующих импульсов. Согласно феноменологической теории порог аблации для N импульсов связан с таковым для одного импульса простым соотношением:

$$F_N = F_1 N^{S-1}, \quad (3)$$

где коэффициент $S \leq 1$ определяется длительностью импульса и свойствами обрабатываемого материала. В наших экспериментах мы получили снижение порога в 3 раза для 900 импульсов, что соответствует $S = 0,84$ для наших экспериментальных данных, что близко к данным из [19] по аблации авиационного сплава Al–Mg, содержащего значительную долю алюминия (>94 %).

Основываясь на формуле (2) и экспериментальных результатах предыдущей работы [15], можно предположить, что для уменьшения размеров отверстий с использованием данного метода необходим переход на более короткую длину волны (в нашем случае это 256 нм). При этом диаметр отверстий в матрице уменьшится с хорошей повторяемостью примерно в два раза, до 200–250 нм.

Заключение

В работе проведено экспериментальное исследование по формированию матриц субмикронных отверстий в пленке алюминия толщиной 100 нм методом фемтосекундной лазерной аблации с помощью фемтосекундного излучения с длиной волны 513 нм. Особенность используемого метода состоит в одновременной записи всей матрицы отверстий с помощью применения специального ДОЭ-мультипликатора, который формирует матрицу лучей, каждый из которых удалось сфокусировать в пятно с размерами, близкими к диаметру Эйри-объектива (880 нм). Исследовалась зависимость от энергии и числа импульсов с целью получения максимальной повторяемости результатов формирования отверстий, а также их размеров и качества. Различие относительных интенсивностей в матрице лучей сделало невозможным получение качественных матриц отверстий при малом количестве импульсов. Были определены оптимальные параметры по энергии импульсов (1,2 нДж/луч) и количеству импульсов (1000) для получения наилуч-

ших с точки зрения цели работы матриц отверстий со средними диаметрами 800/550 нм вдоль длинной/короткой оси, с точностью 30 нм, и имеющих полную заполняемость.

Возможность повышения качества и уменьшения диаметра отверстий при переходе в УФ область открывает интересные возможности изготовления данным методом матрицы наноотверстий для ДНК-секвенатора с многоканальным осветителем на основе дифракционного мультиплексора лазерных лучей [20].

Работа частично выполнена в рамках темы госзадания ЛИН СО РАН (№ 0345-2016-0005) и комплексной программы фундаментальных научных исследований СО РАН «Междисциплинарные интеграционные исследования», проект №38 (0319-2017-0011).

Список литературы

1. Plasmonic antennas and zero-mode waveguides to enhance single molecule fluorescence detection and fluorescence correlation spectroscopy toward physiological concentrations / D. Punj, P. Ghenuche, S.B. Moparthi, J. de Torres, V. Grigoriev, H. Rigneault, J. Wenger // WIREs Nanomed Nanobiotechnol. – 2014. – Т. 6. – Р. 268–282. DOI: 10.1002/wnan.1261
2. Taylor A.B., Zijlstra P. Single-Molecule Plasmon Sensing: Current Status and Future Prospects // ACS Sens. – 2017. – 2. – Р. 1103–1122. DOI: 10.1021/acssensors.7b00382
3. Levene M.J. Zero-Mode Waveguides for Single-Molecule Analysis at High Concentrations // Science. – 2003. – 299:682–6.
4. Real-Time DNA Sequencing from Single Polymerase Molecules / J. Eid, A. Fehr, J. Gray, K. Luong, J. Lyle, G. Otto [et al.] // Science. – 2009. – 323:133–8.
5. Parallel confocal detection of single molecules in real time / P.M. Lundquist [et al.] // Opt. Lett. – 2008. – 33. – 1026.
6. Single molecule fluorescence in rectangular nano-apertures / J. Wenger, P.-F. Lenne, E. Popov and H. Rigneault // Opt. Express. – 2005. – Vol. 13, No. 18. – Р. 7035–7044.
7. Bouchiat V., Esteve D. Lift-off lithography using an atomic force microscope // Appl. Phys. Lett. – 1996. – № 69. – Р. 3098. DOI: 10.1063/1.117317

8. Venkatakrishnan K., Tan B., Sivakumar N.R. Sub-micron ablation of metallic thin film by femtosecond pulse laser // Optics & Laser Technology. – 2002. – Vol. 34. – P. 575–578.
9. Ионин А.А., Кудряшов С.И., Самохин А.А. Абляция поверхности материалов под действием ультракоротких лазерных импульсов // УФН. – 2017. – 187. – С. 159–172.
10. Four-beam Interference Optical System for Laser Micro- structuring Using Picosecond Laser / J. Noh, J. Lee, D. Shin, H. Sohn, J. Suh, and J. Oh // Journal of the Optical Society of Korea. – 2009. – Vol. 13, No. 1. – P. 75–79. DOI: 10.3807/JOSK.2009.13.1.075
11. Fast fabrication of super-hydrophobic surfaces on polypropylene by replication of short-pulse laser structured molds / J. Bekesi, J.J.J. Kaakkunen, W. Michaeli, F. Klaiber, M. Schoengart, J. Ihleemann, P. Simon // Appl Phys A. – 2010. – 99: 691–695. DOI: 10.1007/s00339-010-5719-8
12. Ablation of microstructures applying diffractive elements and UV femtosecond laser pulses / J.J.J. Kaakkunen, J. Bekesi, J. Ihleemann, P. Simon // Appl Phys A. – 2010. – 101: 225–229. DOI: 10.1007/s00339-010-5824-8
13. Parallel fabrication of high-aspect-ratio all-silicon grooves using femtosecond laser irradiation and wet etching / Yanna Li1, Tao Chen, An Pan, Cunxia Li and Litie Tang // J. Micromech. Microeng. – 2015. – 25, 115001 (7 pp). DOI:10.1088/0960-1317/25/11/115001
14. Machining of sub-micron holes using a femtosecond laser at 800 nm / P. Pronko, S. Dutta, J. Squier, J. Rudd // Opt Commun. – 1995. – 114:106–10.
15. Достовалов А.В., Терентьев В.С., Бессмельцев В.П. Изготовление наноотверстий в тонкой алюминиевой пленке методом фемтосекундной лазерной абляции для одномолекулярной спектроскопии // Прикладная фотоника. – 2017. – Т. 4, № 1. – С. 22–37. DOI: 10.15593/2411-4367/2017.01.03
16. Дифракционный фокусирующий мультиплексор для параллельного секвенатора / В.П. Бессмельцев, П.С. Завьялов, В.П. Корольков, Р.К. Насыров, В.С. Терентьев // Автометрия. – 2017. – Т. 53, № 5. – С. 48–56.
17. Role of heat accumulation on the incubation effect in multi-shot laser ablation of stainless steel at high repetition rates / F.D. Niso, C. Gaudiuso, T. Sibillano, F.P. Mezzapesa, A.A. and P.M. Lugarà // Opt. Express. – 2014. – 22. – 12200–12210.

18. Accumulation effects in laser ablation of metals with high-repetition rate lasers / G. Raciukaitis, M. Brikas, P. Gecys, M. Gedvilas // Proc. SPIE 7005, High-Power Laser Ablation VII, 70052L (14 May 2008). DOI: 10.1117/12.782937

19. Femtosecond laser ablation of Al-Mg alloy in vacuum and air / Hong-qiang Dou, Cai-zhen Yao, Hao Liu, Yi Wan, Ren-jie Ding, Xiao-dong Yuan, Shi-zhen Xu // Applied Surface Science. – 2018. – 447. – 388–392.

20. О создании платформы для исследования нуклеиновых кислот (ДНК-секвенатора) / В.П. Бессмельцев, В.С. Терентьев, В.В. Вилько, С.А. Бабин, А.М. Шалагин, А.В. Латышев, Д.А. Насимов, Л.И. Федина, Д.В. Пышный, П.Е. Воробьев, В.В. Анненков, Е.Н. Даниловцева, С.Н. Зелинский, О.Н. Верхозина, М.А. Грачев, Ю.П. Галачьянц // Прикладная фотоника. – 2016. – Т. 3, № 4. – С. 388–411. DOI: 10.15593/2411-4367/2016.04.03

References

1. Punj D., Ghenuche P., Moparthi S.B., de Torres J., Grigoriev V., Rigneault H., Wenger J. Plasmonic antennas and zero-mode waveguides to enhance single molecule fluorescence detection and fluorescence correlation spectroscopy toward physiological concentrations. *WIREs Nanomed Nanobiotechnol*, 2014, 6, pp. 268-282. DOI: 10.1002/wnan.1261
2. Taylor A.B., Zijlstra P. Single-molecule plasmon sensing: current status and future prospects. *ACS Sens.*, 2017, 2, pp. 1103-1122. DOI: 10.1021/acssensors.7b00382
3. Levene M.J. Zero-mode waveguides for single-molecule analysis at high concentrations. *Science*, 2003, 299, pp. 682-686.
4. Eid J., Fehr A., Gray J., Luong K., Lyle J., Otto G. et al. Real-time DNA sequencing from single polymerase molecules. *Science*, 2009, 323, pp. 133-138.
5. Lundquist P.M. et al. Parallel confocal detection of single molecules in real time. *Opt. Lett.*, 2008, 33, 1026.
6. Wenger J., Lenne P.-F., Popov E. and Rigneault H. Single molecule fluorescence in rectangular nano-apertures. *Opt. Express*, 2005, vol. 13, no. 18, pp. 7035-7044.
7. Bouchiat V., Esteve D. Lift-off lithography using an atomic force microscope. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, no. 69, pp. 3098. DOI: 10.1063/1.117317

8. Venkatakrishnan K., Tan B., Sivakumar N.R. Sub-micron ablation of metallic thin film by femtosecond pulse laser. *Optics & Laser Technology*, 2002, vol. 34, pp. 575-578.
9. Ionin A.A., Kudryashov S.I., Samokhin A.A. Ablyatsiya poverkhnosti materialov pod deystviem ultrakorotkikh lazernykh impulsov [Surface ablation by ultrashort laser pulses]. *UFN*, 2017, 187, pp. 159-172.
10. Noh J., Lee J., Shin D., Sohn H., Suh J., Oh J. Four-beam Interference optical system for laser micro-structuring using picosecond laser. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2009, vol. 13, no. 1, pp. 75-79. DOI: 10.3807/JOSK.2009.13.1.075
11. Bekesi J., Kaakkunen J.J.J., Michaeli W., Klaiber F., Schoengart M., Ihlemann J., Simon P. Fast fabrication of super-hydrophobic surfaces on polypropylene by replication of short-pulse laser structured molds. *Appl Phys A*, 2010, 99, pp. 691-695. DOI 10.1007/s00339-010-5719-8
12. Kaakkunen J.J.J., Bekesi J., Ihlemann J., Simon P. Ablation of microstructures applying diffractive elements and UV femtosecond laser pulses. *Appl Phys A*, 2010, 101, pp. 225-229. DOI 10.1007/s00339-010-5824-8
13. Yanna Li1, Tao Chen, An Pan, Cunxia Li, Litie Tang. Parallel fabrication of high-aspect-ratio all-silicon grooves using femtosecond laser irradiation and wet etching. *J. Micromech. Microeng.*, 2015, 25, 115001 (7pp). DOI: 10.1088/0960-1317/25/11/115001
14. Pronko P., Dutta S., Squier J., Rudd J. Machining of sub-micron holes using a femtosecond laser at 800 nm. *Opt Commun*, 1995, 114, pp. 106-110.
15. Dostovalov A.V., Terentev V.S., Bessmeltsev V.P. Fabrication of nano-holes in thin aluminum film by femtosecond laser ablation for single-molecular fluorescence spectroscopy. *Applied photonics*, 2017, vol. 4, no. 1, pp. 22-37. DOI: 10.15593/2411-4367/2017.01.03
16. Bessmeltsev V.P., Zavyalov P.S., Korolkov V.P., Nasirov R.K., Terentev V.S. Difraktsionnyy fokusiruyushchiy multiplikator dlya parallel'nogo sekvenatora [Diffractive focusing multiplier for parallel sequencer]. *Avtometriya*, 2017, vol. 53, no. 5, pp. 48-56.
17. Niso F.D., Gaudiuso C., Sibillano T., Mezzapessa F.P., Lugarà P.M. Role of heat accumulation on the incubation effect in multi-shot laser ablation of stainless steel at high repetition rates. *Opt. Express*, 2014, 22, pp. 12200-12210.

18. Raciukaitis G., Brikas M., Gecys P., Gedvilas M. Accumulation effects in laser ablation of metals with high-repetition rate lasers. *Proc. SPIE 7005, High-Power Laser Ablation VII, 70052L* (14 May 2008). DOI: 10.1117/12.782937
19. Hong-qiang Dou, Cai-zhen Yao, Hao Liu, Yi Wan, Ren-jie Ding, Xiao-dong Yuan, Shi-zhen Xu. Femtosecond laser ablation of Al-Mg alloy in vacuum and air. *Applied Surface Science*, 2018, 447, pp. 388-392.
20. Bessmeltsev V.P., Terentev V.S., Vileyko V.V., Babin S.A., Shalagin A.M., Latyshev A.V., Nasimov D.A., Fedina L.I., Pyshnyy D.V., Vorobev P.E., Annenkov V.V., Danilovtseva E.N., Zelinskiy S.N., Verkhozina O.N., Grachev M.A., Galachyants Yu.P. Development of the platform for nucleic acid analysis (DNA sequencer). *Applied photonics*, 2016, T. 3, № 4, c. 388-411. DOI: 10.15593/2411-4367/2016.04.03

Получено 29.01.2018