

*С. Г. Баев<sup>1</sup>, В. П. Бессмельцев<sup>1\*</sup>, Н. В. Голошевский<sup>1</sup>, Д. Н. Катасонов<sup>1</sup>*

## **Особенности высококачественного формообразования при скоростной микрообработке ультракороткими лазерными импульсами**

<sup>1</sup> Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск,  
Российская Федерация  
\*e-mail: bessmelt@iae.nsk.su

**Аннотация.** Показаны преимущества и основные особенности лазерной фемто-пикосекундной технологии микрообработки различных материалов при использовании прецизионного оборудования с комплементарной системой сканирования лазерного пучка. Кратко рассмотрены программно-аппаратные средства, обеспечивающие высокую производительность и высокую точность и разрешение формирования 3D структур в системах формообразования, содержащих двухкоординатную сканирующую головку на основе угловых гальванометров с короткофокусной оптикой с малым полем сканирования и прецизионного двухкоординатного стола, на котором установлен объект обработки. Приведены конкретные примеры применения фемто- и пикосекундной обработки с микронной точностью и субмикронным разрешением различных материалов – стали, кремния, стекла.

**Ключевые слова:** лазерная фемтосекундная микрообработка

*S. G. Baev<sup>1</sup>, V. P. Bessmeltsev<sup>1\*</sup>, N. V. Goloshevsky<sup>1</sup>, D. N. Katasonov<sup>1</sup>*

## **Features of High-Quality Shaping During High-Speed Micromachining by Ultrashort Laser Pulses**

<sup>1</sup> Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation  
\*e-mail: bessmelt@iae.nsk.su

**Abstract.** The advantages and main features of femto-picosecond laser technology for micromachining various materials using precision equipment with a complementary laser beam scanning system are considered. The software and hardware tools providing high performance and high accuracy and resolution of the formation of 3D structures using a complementary scanning system containing a two-coordinate scanning head based on angular galvanometers with short-focus optics with a small scanning field and a precision two-coordinate table on which the processing object is installed are briefly considered. Specific examples of the use of femto- and picosecond processing with micron precision and submicron resolution of various materials – steel, silicon, and glass are given.

**Keywords:** laser femtosecond micromachining

### ***Введение***

Известно, что применение фемто- и пикосекундных лазерных источников излучения позволяет существенно повысить качество микрообработки различных материалов за счет длительности импульса, меньшего чем время тепловой диффузии в материале. В результате уменьшения зоны термического воздействия существенно уменьшается шероховатость обработанной поверхности, вы-

бросы расплавленного вещества, уменьшаются или исчезают микротрещины и микросколы при обработке хрупких материалов. Кроме того, нелинейные эффекты, возникающие при взаимодействии ультракоротких импульсов с высокой плотностью мощности с прозрачными для лазерного излучения диэлектрическими материалами (стекла, кристаллы), позволяют обрабатывать ряд материалов в новых технологических режимах и получать недостижимые другими методами результаты обработки. Современные фемто- и пикосекундные лазеры имеют хорошие характеристики, как по мощностным параметрам (средняя мощность более 20 Вт при длительности менее 300 фс), так и по качеству лазерного пучка ( $M_{00}$ ,  $M^2 < 1,2$ ) и максимальной частоте модуляции – более одного МГц, что дает возможность минимизировать размер пятна при большой импульсной мощности и даже при минимальном размере пятна около микрона обрабатывать изделия со скоростью движения луча более 1 м/с.

### *Методы и материалы*

В этой статье приведен ряд примеров технологий фемтосекундной обработки с высокими скоростями за счет использования лазерных систем микрообработки с комплементарной системой сканирования [1,2]. В таких системах, особенно при больших площадях микрообработки, достигается наилучшее соотношение между скоростью записи и разрешением за счет совместного использования сканерной системы с относительно большой апертурой 10–20 мм с короткофокусным  $F\theta$  объективом с дифракционным размером пятна 3–5 мкм в поле сканирования 4–6 мм и точного двухкоординатного стола с перемещением необходимого размера.

В разработанной в ИАиЭ СО РАН системе ФПЛ используется сканерная головка (двухкоординатный модуль на основе зеркальных угловых дефлекторов) с апертурой 14 мм и телецентрическим объективом с рабочим отрезком 28 мм с полем записи 5 мм и размером пятна по всему полю менее 6 мкм. Сканерная головка установлена на автоматическом приводе по  $Z$  координате с микронным разрешением и обеспечивает лазерную обработку в  $XU$  плоскости со скоростью более 1 м/с и координатным разрешением не хуже 50 нм. Прецизионный стол (дискретность 1 мкм, разрешение 50 нм), на который устанавливается обрабатываемый образец, обеспечивает его перемещение по  $XU$  до 300 мм по каждой координате (рис. 1). Для обеспечения точного совмещения полей обработки сканерной головки с перемещением стола разработан специальный контроллер и методы калибровки и динамической коррекции координаты лазерного записываемого пятна по данным координат от сканеров и стола [3]. В Системе ФПЛ сшивка соседних полей записи происходит с ошибкой менее 0,1 мкм. Для получения трехмерной формы обработанной зоны обработка производится послойно из формата STL путем перемещения сканирующей головки по  $Z$  координате после записи очередного слоя.

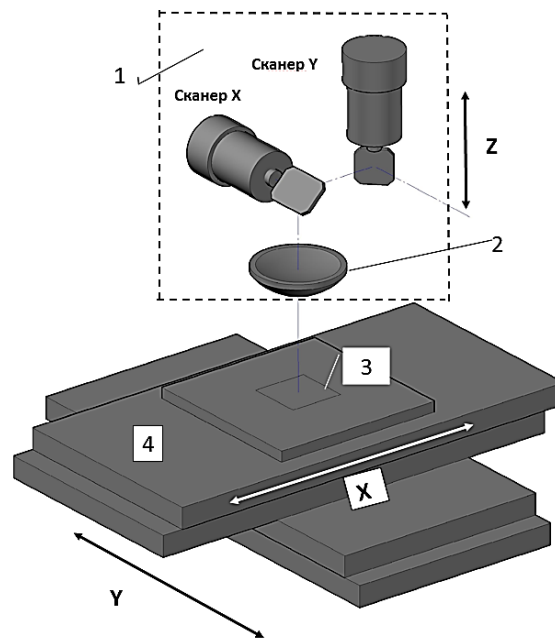


Рис. 1. Схема работы сканерной головки: 1 – сканерная головка, 2 – фокусирующий телецентрический объектив, 3 – поле записи ( кадр) сканерной головки, 4 – прецизионный стол с  $XY$  перемещением

Трехмерный объект, представленный в формате STL, разделяется на слои по вертикальной координате (высоте), толщина которых указывается оператором. Каждый полученный слой разделяется на кадры установленного размера, после чего производится последовательное перемещение лазерного пучка по заготовке в соответствии с задаваемой оператором стратегией сканирования. Далее производится перемещение объектива в сторону заготовки на высоту слоя, определенную оператором. Данная последовательность действий осуществляется для всех полученных слоев. При записи по неровной поверхности обрабатываемая поверхность поточечно промеряется с помощью встроенного датчика расстояния, и строится карта высот объекта. Тогда вывод слоя STL объекта с возможностью коррекции положения объектива (автоматическая фокусировка) осуществляется при разделении слоя на кадры с последующим определением их координат относительно координат обрабатываемой заготовки. После этого осуществляется последовательный перебор полученных кадров. Такой способ формирования объекта применен как первый этап для компенсации наличия стыков между соседними кадрами при выводе слоя STL объекта. Послойная 3D обработка с субмикронным разрешением при подготовке и выводе данных для обработки слоя в реальном времени обеспечивает как высокое качество обработки, так и высокую производительность.

Специальное программное обеспечение (СПО) реализовано в виде приложения со стандартным графическим интерфейсом (GUI приложения для систем Windows). Приложение позволяет пользователю проектировать данные для вывода путем размещения в поле рисования некоторого набора импортированных

графических объектов, редактирования этих объектов и установки для каждого объекта набора характеристик, определяющих режим вывода данного объекта. Приложение предоставляет возможность импортирования объектов векторной графики в формате STL (созданных, например, в ПО Solid Works). Кроме этого, приложение имеет функции редактирования импортированных объектов, позволяет перемещать и масштабировать выбранный объект. Программно задаются параметры лазерного источника и движения лазерного луча, такие как мощность, длительность импульса, скорость, длина микровектора, тактовая частота подачи микровекторов, задержки включения и выключения лазерного излучения и другие. Кроме того, определяются шаг слоя обработки по глубине и стратегия обработки (векторное заполнение слоя, растровое заполнение).

Для вывода специальных объектов, таких как массив микроуглублений, например микролинз, разработаны специальные программные средства, которые позволяют формировать объекты и в растровом режиме, и в режиме вращающегося луча также с изменением диаметра вращения послойно. Такое программное обеспечение позволяет в растровом и в векторном режиме формировать микролинзовые растры больших размеров ( $200 \times 200 \text{ мм}^2$ ) на различных материалах (сталь, кремний, стекло), при этом размер (диаметр) микролинз может варьироваться от 5 до 200 мкм при глубине до половины диаметра при заданной форме поверхности (рис. 2, 3). Методы постобработки на основе электролитно-плазменного полирования позволяют уменьшить шероховатость поверхности при обработке металлических заготовок до долей микрона.

Разработанные технологии эффективно могут применяться для создания трехмерных периодических структур в полимерных и полупроводниковых материалах (рис. 4), работающих как оптические элементы в терагерцовой оптике. С использованием разработанных нами лазерных технологий изготовлен образец фильтра high-pass с частотой отсечки 0,275 ТГц, который имеет толщину 1 мм и сформирован гексагонально упакованными сквозными отверстиями шестиугольной формы, разделенными перемычками шириной 70 мкм [4].

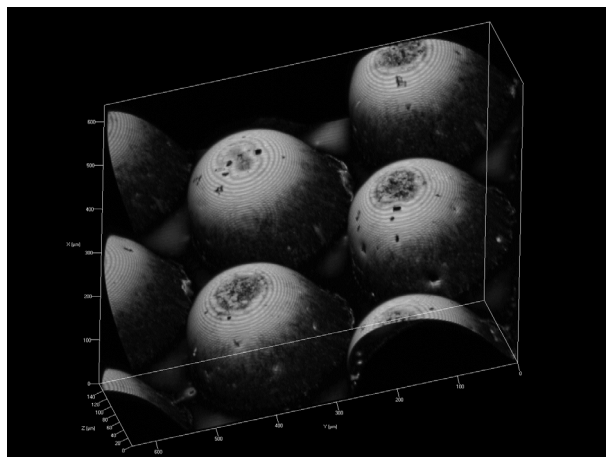


Рис. 2. Изображение фрагмента трехмерной микрообработки стекла BK7 (микролинзовый растр). Диаметр 250 мкм, глубина 125 мкм, полное поле записи 150x150мм)

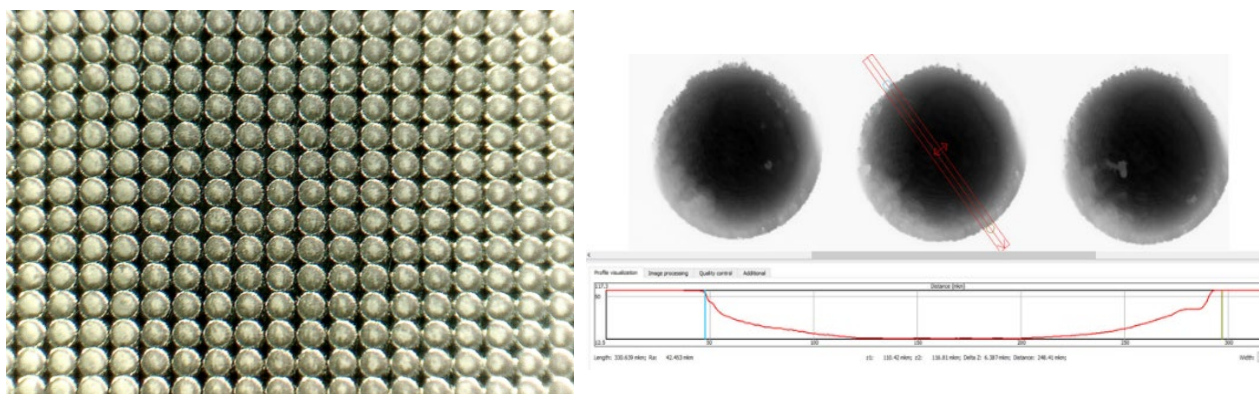


Рис. 3. Фото фрагмента раstra микролинз сферических и профилограмма микролинз. Шаг раstra 250 мкм, глубина 50 мкм. Материал – сталь, полное поле 200x200 мм

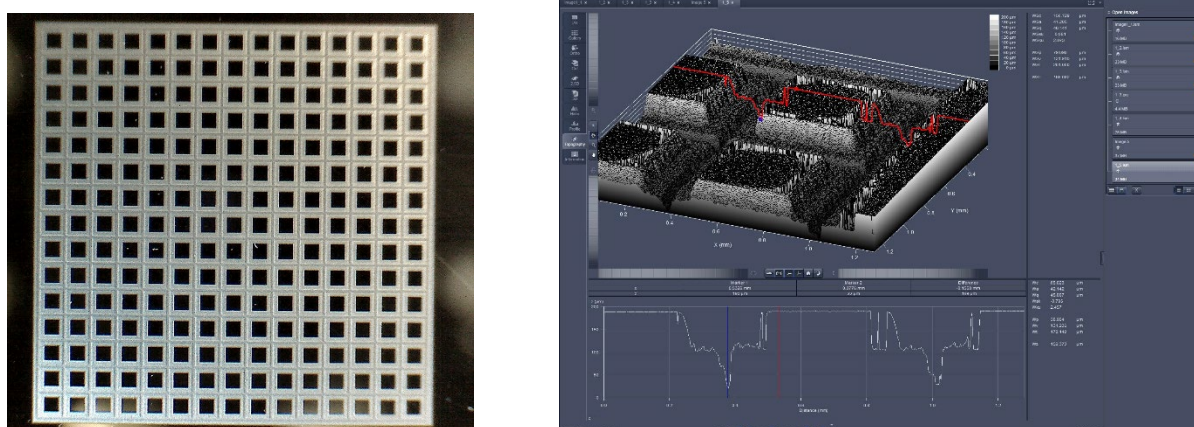


Рис. 4. 3D обработка кремния. Шаг между ячейками 500 мкм, максимальная глубина 250 мкм

Продемонстрирован новый качественный уровень изготовления самонесущих перфорированных (со сквозными отверстиями) металлических рентгеношаблонов способом послойной лазерной фемтосекундной резки, что позволяет получать образцы планарных элементов терагерцовой оптики в виде металлических микроструктур, формируемых посредством LIGA-технологии, варьируя размеры ячеек, ширину перемычек структур, их толщину в существенно более широком диапазоне, чем это делалось ранее. На рис. 5, представлены СЭМ-фото результатов изготовления рентгеноконтрастных фотошаблонов из танталовой фольги толщиной 0,03 мм [5].

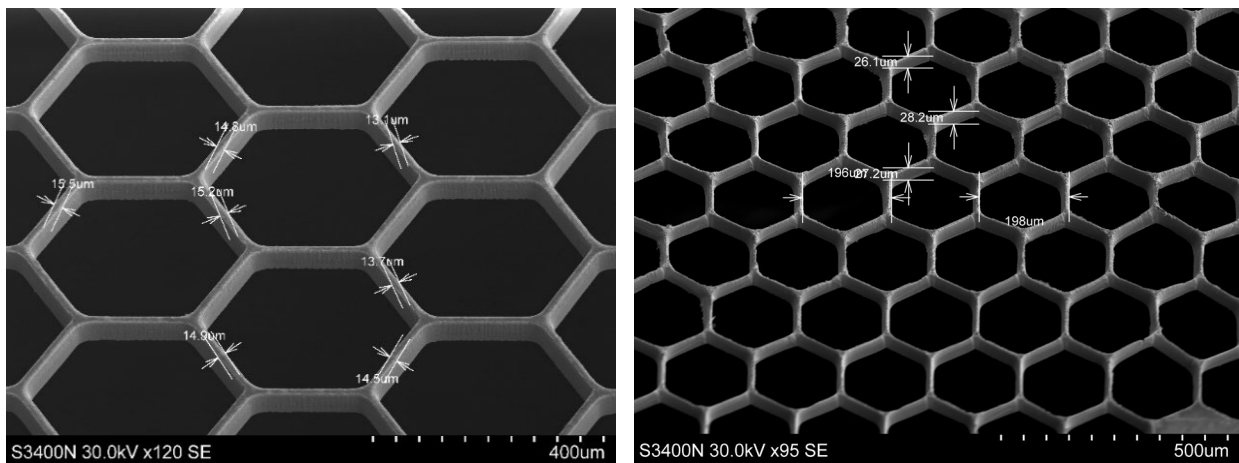


Рис. 5. Сетчатые структуры, полученные методом послойной лазерной микрообработки металлической фольги мощным фемтосекундным излучением. Размер перемычек 15мкм, размер ячейки  $196\pm 2$ мкм. Размер сетки 70x70 мм

### *Заключение*

Показано, что применение в разработанных в ИАиЭ СО РАН лазерных комплексах ФПЛ комплементарных систем сканирования со специальными программно аппаратными средствами контроля и управления, содержащих прецизионную лазерную сканирующую головку на базе гальванометрических зеркальных дефлекторов с короткофокусным объективом с малым полем сканирования, сопряженную с двухкоординатным столом с большим полем сканирования, на котором установлен обрабатываемый материал, позволяет максимально эффективно использовать возможности фемто- и пикосекундных технологий для микрообработки различных материалов. Приведены примеры высокоскоростных бездефектных 3D технологий обработки металлов и хрупких диэлектриков с субмикронным координатным разрешением и микронной точностью.

### *Благодарности*

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект Развитие методов и технологий прецизионного гибридного послойного формообразования № 121051700156-9).

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бессмельцев В.П., Полешук А.Г., Корольков В.П., Никаноров Ю.Н., Карван, А.Л., Верхогляд А.Г. Прецизионный лазерный технологический комплекс для производства шкал, сеток, фотошаблонов и синтезированных голограмм на основе лазерной трехмерной микро и нанообработки // Голография. Наука и практика: сборник трудов 12-й Международной конференции «ГолоЭкспо-2015». – С. 38–43.
2. Бессмельцев В.П., Баев С.Г., Голошевский Н.В., Максимов М.В., Горяев Е.П., Касторов В.В., Никаноров Ю.Н. Лазерная технологическая рабочая станция для производства шкал, сеток, фотошаблонов // Научно-практическая конференция «Оптико-электронные приборы и комплексы» (г. Красногорск, Россия, 19–20 октября 2017 г.) АО «Швабе», ПАО «Красногорский Завод им С.А. Зверева». Сборник тезисов докладов. – 2017. – С. 155–157.

3. Бессмельцев В.П., Голошевский Н.В., Кастеров В.В., Киприянов Я.А., Смирнов К.К. Метод калибровки лазерной гальванометрической сканирующей системы субмикронного разрешения // Автометрия. – 2018. – Т. 54, №4. – С. 84–92. DOI:10.15372/AUT20180411.

4. Кузнецов С.А., Генцелев А.Н., Баев С.Г. Реализация фильтров высоких частот субтерагерцового диапазона с использованием высокоаспектных полимерных структур // Автометрия. – 2017. – Т. 53, № 1. – С.107–116.

5. А. Н. Генцелев, С. Г. Баев. Изготовление планарных элементов терагерцовой оптики посредством глубокой трафаретной рентгенолитографии // Автометрия. – 2022. – Т.58, №2. – С. 104. DOI: 10.15372/AUT20220212. DOI: 10.3103/S8756699022020030.

© С. Г. Баев, В. П. Бессмельцев, Н. В. Голошевский, Д. Н. Катасонов, 2023