

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА,
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
И СВЯЗЬ

ELECTRONICS, PHOTONICS,
INSTRUMENT MAKING
AND COMMUNICATIONS

УДК 539.1.043

DOI: 10.17212/2782-2001-2025-4-147-158

Применение алгоритмов автоматической фокусировки в процессе лазерной субмикронной микрообработки^{*}

С.Г. БАЕВ^{1,a}, Д.Н. КАТАСОНОВ^{1,2,b}

¹ РФ, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, Институт автоматизации
и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук

² РФ, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный
технический университет

^a baev@iae.nsk.su ^b katasonov@iae.nsk.su

Рассмотрено формирование методом лазерной резки самонесущих высококонтрастных перфорированных плоских конструкций с субмикронной топологией, выполненных из тонких металлических фольг, толщина которых находится в пределах 30...50 мкм, а типичный размер ячейки составляет 50...150 мкм при толщине перемычки в пределах толщины фольги. Совместное применение мощного лазера с фемтосекундной длительностью импульса и комплементарной системы сканирования лазерного луча по сравнению с классической технологией, основанной на плазмохимическом травлении, позволяет существенно упростить технологическую подготовку и сократить количество операций, необходимых для формирования готового изделия. За счет уменьшения длительности импульса изменяется характер взаимодействия лазерного излучения с веществом: происходит переход от теплового воздействия к взрывному разрушению и абляции материала. Такой способ взаимодействия приводит к уменьшению зоны термического влияния. В результате разрешающая способность практически полностью определяется диаметром лазерного пучка. Однако высокая «плотность» формируемых ячеек неизбежно приводит к разогреву обрабатываемой подложки и, как следствие, к ее термическим деформациям, нарушениям фокусировки лазерного пучка и появлению дефектов. Фокусировка лазерного пучка на поверхности обрабатываемой подложки осуществляется путем взаимного позиционирования обрабатываемой подложки и фокусирующего объектива при помощи электромеханического привода. Первоначальное положение привода задается исходя из толщины подложки и параметров объектива, а дальнейшая коррекция положения осуществляется при помощи показаний датчика расстояния до обрабатываемой подложки.

Предложена модификация алгоритма автоматической фокусировки лазерного пучка на поверхности подложки, использующая особенности комплементарной системы сканирования лазерного пучка.

Ключевые слова: лазерная резка, лазерная микрообработка, комплементарная система, рентген-шаблон, автофокус, самонесущая конструкция, субмикронная топология, CAD-модель

^{*} Статья получена 10 октября 2025 г.

ВВЕДЕНИЕ

Микромеханические устройства и системы находят всё большее применение в различных научных и технических областях. Такие устройства в сравнении с традиционными обладают существенно меньшими массогабаритными характеристиками и энергопотреблением [1]. Одной из технологий создания таких систем является применение рентгенлитографических технологий, позволяющих получать топологию с латеральными размерами около 10 мкм [2–5]. Однако эти технологии требуют изготовления высококонтрастных шаблонов, допускающих их длительное использование в условиях действия излучения. Такие шаблоны являются самонесущими плоскими изделиями, выполненными из металлических фольг, которые характеризуются субмикронной топологией и линейными размерами до $100 \times 100 \text{ мм}^2$, при этом толщина применяемых фольг находится в диапазоне 0,01...0,05 мм. В связи с развитием методов лазерной микрообработки одним из наиболее актуальных методов изготовления таких изделий является лазерная резка. Такая технология позволяет использовать промышленно выпускаемую фольгу, а изготовление шаблона происходит в два этапа: фиксация фольги и лазерная обработка по заранее подготовленной модели.

Проведенные ранее совместные исследования Института автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН) и Института физики полупроводников Сибирского отделения Российской (ИФП СО РАН) академии наук показали возможность изготовления рентген-шаблонов с требуемыми параметрами. Результаты исследований показаны при помощи изображений, полученных сканирующим электронным микроскопом [5–8]. Однако дальнейшие исследования показали, что при формировании протяженных топологий с линейными размерами 50...100 мм² выдвигаются повышенные требования к точности фокусировки лазерного пучка на поверхности обрабатываемой подложки. Такие требования вызваны термическими деформациями подложки в процессе лазерной микрообработки.

Кроме этого, требуемые латеральные размеры элементов топологии накладывают существенные ограничения на компоненты, осуществляющие позиционирование лазерного пучка. Современные системы позиционирования и фокусировки позволяют обеспечить формирование в плоскости обработки лазерного пучка диаметром $\approx 5 \text{ мкм}$ на поле $6 \times 6 \text{ мм}$. Однако фокусирующие объективы, позволяющие обеспечить такой диаметр пучка, имеют глубину фокусировки не более 20 мкм. Рассмотренные особенности требуют разработки системы автоматической фокусировки лазерного пучка на поверхности обрабатываемого изделия.

1. СИСТЕМА ЛАЗЕРНОЙ ЗАПИСИ

Формирование объектов, которые характеризуются рассмотренной микроструктурой, требует обеспечения диаметра лазерного пучка $\approx 5 \text{ мкм}$. Диаметр пучка достигается за счет соответствия типа источника лазерного излучения и короткофокусного объектива, а позиционирование пучка осуществляет составная (комплементарная) система. Комплементарная система

состоит из объектива плоского поля и двух взаимодополняющих систем позиционирования луча – гальванометрических дефлекторов и шаговых приводов [9, 10]. Схематичное изображение такой системы показано на рис. 1.

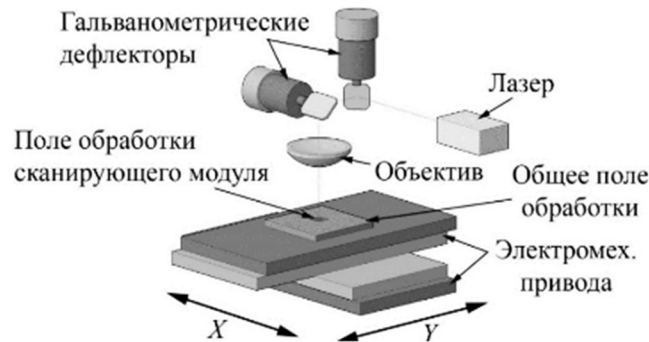


Рис. 1. Схема комплементарной системы лазерной записи

Fig. 1. A schematic diagram of a complementary laser recording system

Лазерный пучок попадает в расположенный над зоной обработки «низкоинерционный» сканер – модуль, состоящий из пары гальванометрических зеркальных дефлекторов и фокусирующего объектива плоского поля, осуществляющих развертку пучка в зоне, составляющей часть общего поля обработки [11]. Обрабатываемый объект располагается на предметном столе, который перемещается относительно центра фокусирующего объектива электро-механическими приводами «высокоинерционного» сканера. По этой причине требуется разработка алгоритмов деления формируемого объекта на зоны, размер которых не превышает размер зоны обработки для данного фокусирующего объектива. В ИАиЭ СО РАН разработана и выпускается комплементарная лазерная рабочая станция (ЛРС, complementary laser workstation, CLW) [12], которая обладает модульной конструкцией и позволяет использовать два типа лазерных источников: волоконный лазер с длиной волны 1064 нм и импульсами наносекундной длительности, а также импульсно-периодический лазер с фемтосекундной длительностью импульсов.

2. ФОРМАТ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ

В качестве исходных данных используется модель формируемого объекта, подготовленная в системе автоматического проектирования (Computer-Aided Design, CAD-модель) и представленная в формате STL или DXF. Позиционирование CAD-модели относительно обрабатываемого объекта осуществляется на основе данных встроенной в ЛРС системы технического зрения. Программное обеспечение ЛРС хранит объект в виде его внешнего контура, в пределах которого формируются траектории перемещения лазерного луча согласно выбранной стратегии обработки [13]. При загрузке трехмерной модели объекта (формат STL) осуществляется послойное разделение модели с последующим формированием контура каждого слоя. Пример внутреннего представления формируемых объектов показан на рис. 2.

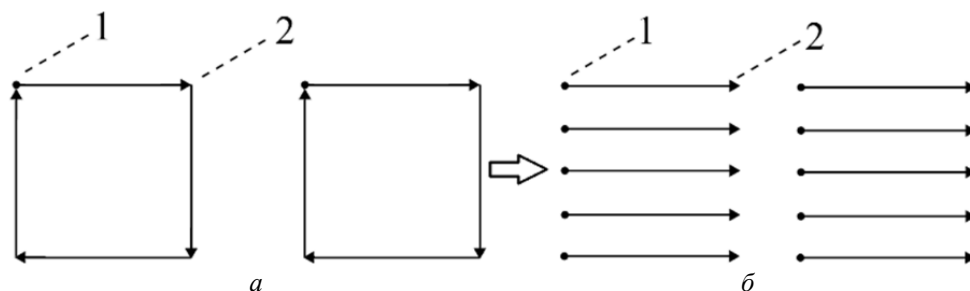


Рис. 2. Пример контуров и их заполнения во внутреннем формате представления:
a – исходные контуры, *б* – заполнение, 1 – «нерисуемый» переход, 2 – «рисуемый» переход

Fig. 2. An example of contours and their filling in the internal representation format:
a is original contours, *b* is filling, 1 is a "non-drawn" transition, 2 is a "drawn" transition

Такой формат представления подразумевает хранение контура в виде последовательности точек, соединение которых формирует контур. При этом каждая точка представлена в виде координат (x, y) и так называемого признака перехода в эту точку. На рис. 2 «нерисуемый» переход показан точкой 1, а «рисуемый» – стрелкой 2. Такой формат позволяет в одной связной структуре хранить несколько контуров с возможностью их разделения. Также такой формат представления используется для хранения координат траекторий перемещения лазерного луча. На рис. 2, б показано штриховое заполнение рассмотренных ранее контуров. Единицей представления данных во внутреннем формате данных специального программного обеспечения ЛРС (СПО) является экземпляр класса, который объединяет связную структуру, хранящую последовательность точек переходов, параметры лазерного вывода (скорость движения пучка, мощность и иные технологические параметры), а также методы, обеспечивающие подготовку к выводу.

3. ПОДГОТОВКА ДАННЫХ

Как было сказано ранее, применение составной системы позиционирования лазерного пучка требует осуществления деления траекторий перемещения лазерного пучка на зоны, размер которых соответствует размерам рабочего поля фокусирующего объектива, в пределах которого осуществлена коррекция дисторсии [14, 15]. Рассмотрим алгоритм подготовки данных, схематично показанный на рис. 3.

На первом шаге осуществляется загрузка и позиционирование одной или нескольких CAD-моделей и их преобразование во внутренний формат представления в виде координат точек-переходов. На втором шаге в соответствии с указанной оператором стратегии формируются траектории перемещения лазерного пучка (на рис. 3 заполнение контуров показано горизонтальными линиями). Также на втором шаге формируется прямоугольник, в который вписаны все подготовленные траектории (штриховые линии на рис. 3). На третьем шаге формируются горизонтальные и вертикальные линии деления сформированного прямоугольника (пунктирные линии на рис. 3). Линии деления образуют зоны записи, ширина и высота которых соответствует рабочему полю фокусирующего объектива. На четвертом шаге в соответствии с границами

определенных ячеек происходит разделение траекторий перемещения лазерного пучка. В результате для рассмотренных на рис. 3 траекторий формируется семь объектов во внутреннем формате представления, которые для наглядности разнесены между собой. Для каждого из таких объектов формируется описывающий прямоугольник.

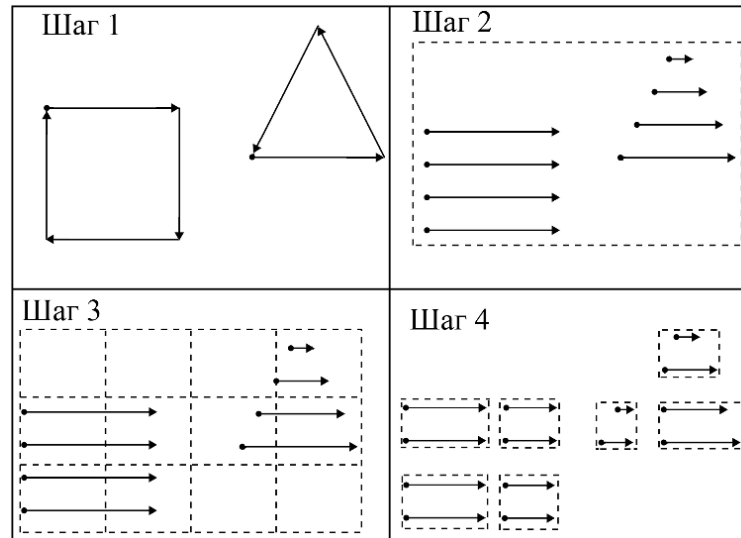


Рис. 3. Схематичное представление процесса подготовки данных

Fig. 3. Schematic representation of the data preparation process

Рассмотренное разделение траекторий осуществляется на основе подобию треугольников, которые образуются фрагментом траектории и линиями деления, сформированными на третьем шаге. Процедура вертикального деления фрагмента траектории показана на рис. 4.

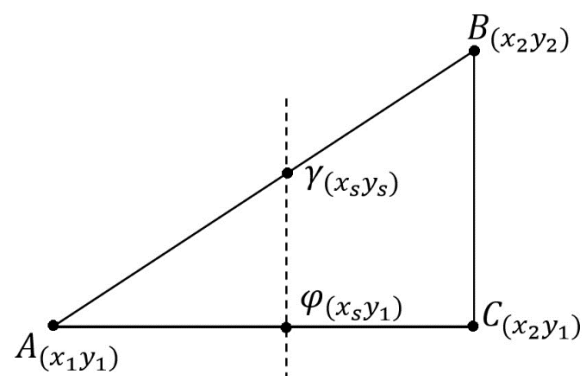


Рис. 4. Деление фрагмента траектории:

AB – делимый фрагмент траектории; пунктирная линия – линия деления; $\gamma\varphi$, BC , AC – вспомогательные линии

Fig. 4. Division of a trajectory fragment:

AB is the trajectory fragment being divided; the dotted line is a division line; $\gamma\varphi$, BC , AC are auxiliary lines

Элемент траектории, заданный точками A и B с координатами $(x_1 y_1)$ и $(x_2 y_2)$ соответственно, пересекается линией деления, которая на рис. 4 показана пунктиром через точку γ , с координатами $(x_s y_s)$, при этом координата x_s определена исходя из положения линии деления, а координату y_s необходимо определить. Для этого вводят дополнительную горизонтальную линию AC и вертикальную линию BC . Фрагмент траектории, линия деления и вспомогательные линии образуют два треугольника, из подобия которых определяется координата y_s :

$$y_s = y_1 + \frac{(x_s - x_1)(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)}.$$

На рис. 4 показан пример «вертикального» деления траектории AB , аналогичным образом происходит «горизонтальное» деление. Перед выполнением деления осуществляется проверка граничных условий – случай вертикальной или горизонтальной ориентации делимого фрагмента траектории.

4. АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ФОКУСИРОВКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Предполагается, что размер зон записи определен таким образом, что перепад высот обрабатываемой подложки в пределах каждой зоны записи не превышает глубины фокусировки лазерного пучка. Таким образом, задача фокусировки пучка сводится к определению положения объектива относительно обрабатываемого объекта в пределах каждой зоны записи. Перемещение объектива обеспечивается при помощи вертикального привода с обратной связью. Начальное положение привода устанавливается исходя из толщины обрабатываемой подложки и положения привода, обеспечивающего фокусировку лазерного пучка на поверхности предметного стола. Коррекция положения привода для каждой зоны записи обеспечивается за счет показаний оптического датчика расстояния, который имеет жесткую привязку к положению фокусирующего объектива. При этом нулевые показания датчика расстояния соответствуют фокусировке лазерного пучка на измеряемой поверхности.

Как было отмечено ранее, подготовленные траектории перемещения лазерного пучка разделены на зоны записи. Перед сканированием лазерного пучка в пределах траекторий очередной зоны записи происходит перемещение подложки таким образом, что центр очередной зоны записи попадает под измерительный пучок датчика расстояния. В результате для очередной зоны формируется величина коррекции положения вертикального привода.

В качестве эксперимента рассмотрим изготовление рентген-шаблона, в основе которого лежит гексагональная топология. Фрагмент САД-модели шаблона, загруженной в СПО, показан на рис. 5.

Модель рентген-шаблона, показанная на рис. 5, составлена из отдельных гексагональных элементов размером 70 мкм, контур которых используется в качестве стратегии движения лазерного пучка. Шаблон имеет диаметр 50 мм, при этом размер рабочего поля фокусирующего объектива 6×6 мм.

Таким образом, будет осуществлено деление CAD-модели на зоны записи, как было описано выше. Фрагмент результата деления показанной на рис. 5 модели представлен на рис. 6.

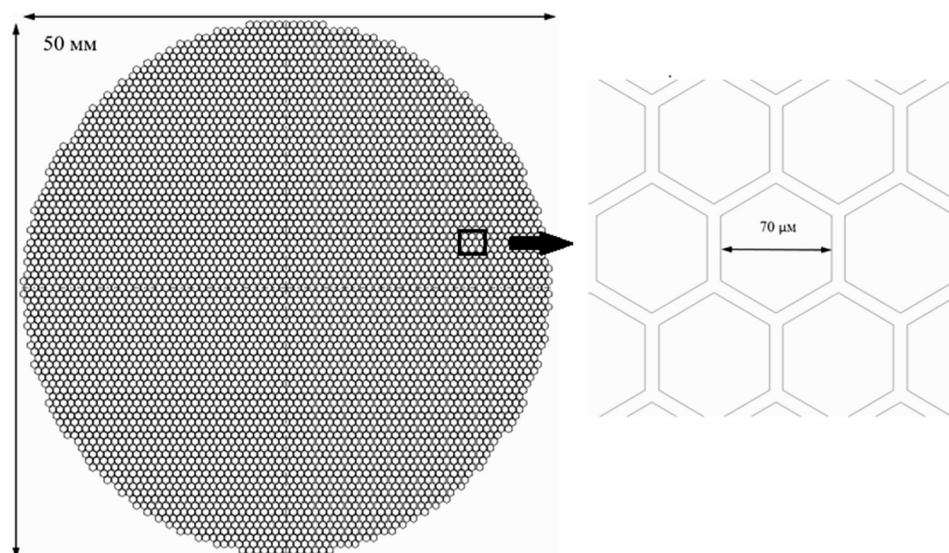


Рис. 5. CAD-модель и ее увеличенный фрагмент

Fig. 5. A CAD model and its enlarged fragment

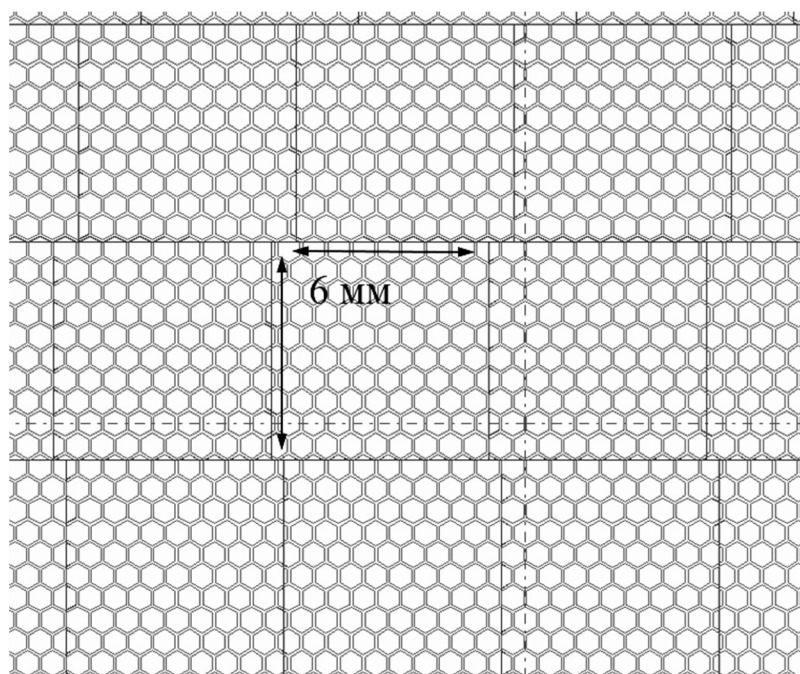


Рис. 6. CAD-модель и деление на зоны записи

Fig. 6. A CAD model and division into recording zones

Для каждой из зон записи, часть которых изображена на рис. 6, была получена величина коррекции положения вертикального привода от его расчетного положения. Значение коррекции для каждой из зон записи определяется предварительно, затем осуществляется формирование каждой зоны. Такой подход позволяет несколько ускорить процесс формирования объекта за счет уменьшения числа перемещений обрабатываемого изделия. Однако формирование протяженных структур на тонких фольгах с топологией, показанной на рис. 5, сопровождается существенным увеличением температуры материала в зоне обработки. В результате нагрева, после обработки очередной зоны записи могут произойти изменения геометрии соседних зон. Таким образом, определенная ранее величина коррекции может оказаться неверной, что, в свою очередь, приводит к возникновению дефектов. На рис. 7 показаны такие дефекты на примере изображения рентген-шаблона, который был сформирован на основе рассмотренной ранее CAD-модели.

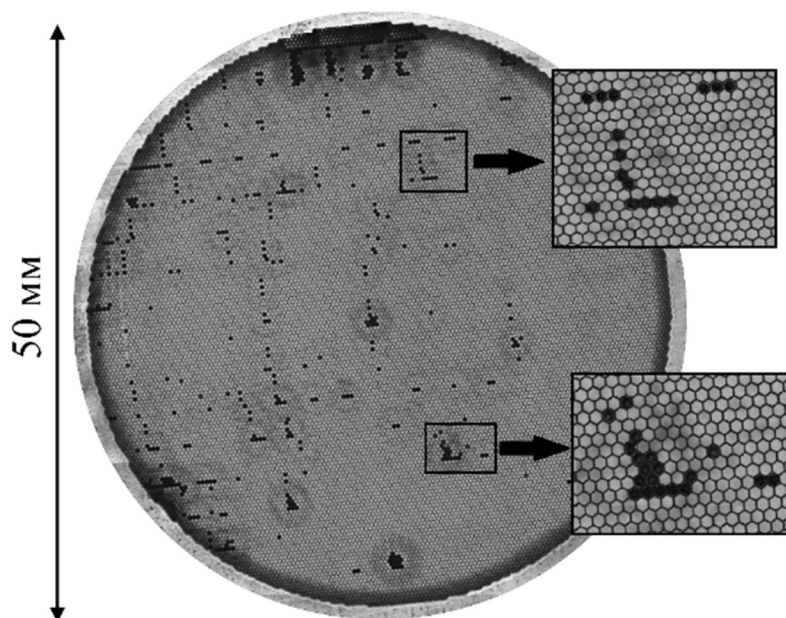


Рис. 7. Рентген-шаблон с дефектами

Fig. 7. An X-ray template with defects

Рентген-шаблон, изображенный на рис. 7, сформирован на подложке из медной фольги толщиной 0,05 мм. На выносках показаны увеличенные изображения его фрагментов с типичными дефектами. Показанные на рисунке дефекты вызваны неполным отделением фольги в пределах ячеек. Недостаточная глубина реза обусловлена нарушениями фокусировки, которые возникают в результате термических деформаций подложки. Компенсировать дефекты, показанные на рис. 7, возможно за счет определения величины коррекции положения вертикального привода непосредственно перед осуществлением обработки очередной зоны записи. На рис. 8 показан аналогичный рентген-шаблон, при формировании которого был использован иной подход определения величины коррекции.

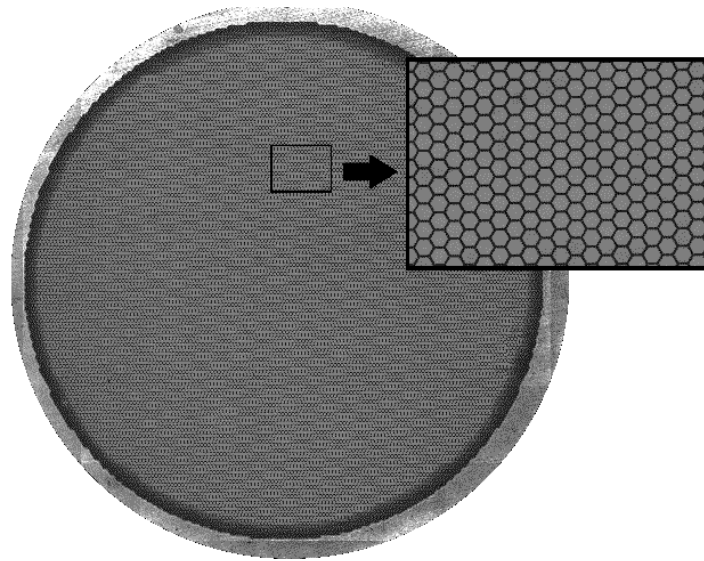


Рис. 8. Рентген-шаблон без дефектов

Fig. 8. An X-ray template without defects

На рентген-шаблоне, изображение которого приведено на рис. 8, нет рассмотренных ранее дефектов. Это достигается за счет внесения изменений в алгоритм расчета величины коррекции. Величина коррекции определяется для очередной зоны записи непосредственно перед ее обработкой. Таким образом, термические деформации каждой зоны записи будут учтены перед обработкой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрено формирование самонесущей протяженной сетчатой топологии, типичные размеры ячейки которой находятся в пределах 50...70 мкм, на подложках из промышленно выпускаемой металлической фольги при помощи системы лазерной записи с комплементарным способом позиционирования лазерного луча. Комплементарный способ позиционирования луча подразумевает деление формируемого объекта на несколько последовательно обрабатываемых зон. При формировании протяженных объектов возникают термические деформации, приводящие к расфокусировке лазерного пучка и, как следствие, к возникновению дефектов. Показано, что компенсировать искажения возможно за счет измерения расстояния между фокусирующим объективом и фрагментом подложки, соответствующим очередной обрабатываемой зоне.

Рассмотренный способ автоматической фокусировки, в основе которого лежит деление формируемого объекта на отдельные зоны обработки, может быть обобщен для системы сканирования пучка, основанной только на шаговых моторах. Кроме этого, такой способ фокусировки может найти применение при формировании объектов на криволинейной поверхности, при достаточном уменьшении размера поля записи. Рассмотренный алгоритм фокусировки будет в дальнейшем использован в существующих и разрабатываемых в ИАиЭ СОРАН системах лазерной микрообработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев А.А., Лучинин В.В., Мальцев П.П. Микросистемная техника. Материалы, технологии, элементная база // Электронные компоненты. – 2000. – № 4. – С. 3–11.
2. Reznikova E.F., Mohr J., Hein H. Deepphoto-lithography characterization of SU-8 resist layers // *Microsystem Technologies*. – 2005. – Vol. 11 (4). – P. 282–291.
3. Формирование толстых высокоаспектных резистивных масок методом контактной фотолитографии / А.Н. Генцелев, Ф.Н. Дульцев, В.И. Кондратьев, А.Г. Лемзяков // *Автометрия*. – 2018. – Т. 54, № 2. – С. 20–29.
4. Neureuther A.R. Microlithography with soft X rays // *Synchrotron Radiation Research* / ed. by H. Winick, S. Doniach. – New York; London: Plenum Press, 1980. – P. 223–275.
5. Разработка медных сеточных структур для частотной и пространственной селекции ТГц-излучения новосибирского лазера на свободных электронах / С.А. Кузнецов, Б.Г. Гольденберг, П.В. Калинин, В.С. Елисеев, Е.В. Петрова // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. – 2009. – № 9. – С. 38–49.
6. Создание квазиоптических селективных элементов терагерцового диапазона в виде псевдометаллических структур посредством глубокой рентгеновской литографии / А.Н. Генцелев, С.А. Кузнецов, С.Г. Баев, Б.Г. Гольденберг, Е.А. Лоншаков // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. – 2017. – № 7. – С. 32–42.
7. Генцелев А.Н., Баев С.Г. Изготовление планарных элементов терагерцовой оптики посредством глубокой трафаретной рентгенолитографии // *Автометрия*. – 2022. – № 2. – С. 104.
8. Кузнецов С.А., Генцелев А.Н., Баев С.Г. Реализация фильтров высоких частот субтерагерцового диапазона с использованием высокоаспектных полимерных структур // *Автометрия*. – 2017. – № 1. – С. 107–116.
9. Голошевский Н.В. Методы и программно-аппаратные средства управления устройствами лазерной микрообработки с комплементарной системой позиционирования: дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2021. – 138 с.
10. Precision laser system based on complementary scanning principle for dielectric materials microprocessing / N. Goloshevsky, A. Aleshin, S. Baev, V. Bessmeltsev, K. Smirnov, M. Maksimov, M. Mikhailov // *Proceedings of SPIE*. – 2008. – Vol. 6985: Fundamentals of laser assisted micro- and nanotechnologies. – P. 170–178.
11. Бессмельцев В.П., Голошевский Н.В. Система управления составными двухкоординатными сканаторами // *Автометрия*. – 2007. – № 1. – С. 116–126.
12. Особенности технологии прецизионной фемтосекундной микрообработки оптических материалов / В.П. Бессмельцев, С.Г. Баев, Е.Д. Булушев, Н.В. Голошевский, Е.П. Горяев, В.В. Кастеров, М.В. Максимов, К.К. Смирнов // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. – 2016. – № 2. – С. 3–8.
13. Method of crack-free laser writing of microchannels on glass substrates / S. Baev, V. Bessmeltsev, N. Goloshevsky, D. Katasonov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 537 (2). – P. 022059.
14. Метод калибровки лазерной гальванометрической сканирующей системы субмикронного разрешения / В.П. Бессмельцев, Н.В. Голошевский, В.В. Кастеров, Я.А. Киприянов // *Автометрия*. – 2018. – № 4. – С. 84–92.
15. Weisz J.R. Software calibration of scan system distortions // *Proceedings of SPIE*. – 1991. – Vol. 1454. – P. 265–271.

Баев Сергей Геннадьевич, главный специалист-технолог лаборатории лазерной графики Института автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук. Основное направление научных исследований – взаимодействие лазерного излучения с веществом. E-mail: baev@iae.nsk.su

Катасонов Денис Николаевич, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории лазерной графики Института автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, доцент кафедры автоматизации Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – разработка программного обеспечения, параллельные вычисления. E-mail: katasonov@iae.nsk.su

Baev Sergey G., chief specialist and technologist in the Laser Graphics Laboratory, Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

His primary research focus is the interaction of laser radiation with matter. E-mail: baev@iae.nsk.su

Katasonov Denis N., PhD (Eng.), research associate in the Laser Graphics Laboratory, Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, and associate professor, Department of Automation, Novosibirsk State Technical University. His primary research focus is software development and parallel computing. E-mail: katasonov@iae.nsk.su

DOI: 10.17212/2782-2001-2025-4-147-158

Application of autofocus algorithms in laser submicron micromachining^{*}

S.G. BAEV^{1,a}, *D.N. KATASONOV*^{1,2,b}

¹ *Institute of Automation and Electrometry Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1 Academician Koptuyug Avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

² *Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation*

^a *baev@iae.nsk.su* ^b *katasonov@iae.nsk.su*

Abstract

This paper examines the laser cutting of self-supporting, high-contrast, perforated flat structures with a submicron topology. These structures are made from thin metal foils with a thickness of 30...50 μm and a typical cell size of 50...150 μm, with a bridge thickness within the foil thickness. The combined use of a powerful femtosecond laser and a complementary laser beam scanning system, compared to conventional plasma-chemical etching technology, significantly simplifies process design and reduces the number of operations required to form the finished product. By reducing the pulse duration, the nature of the laser-material interaction changes, shifting from the thermal action to explosive destruction and ablation of the material. This interaction leads to a reduction in the heat-affected zone, and as a result, the resolution is almost entirely determined by the laser beam diameter. However, the high density of the formed cells inevitably leads to heating of the substrate, which is inevitably accompanied by thermal deformation of the substrate. This deformation of the substrate, in turn, disrupts the laser beam focusing and creates defects. Focusing of the laser beam on the surface of the substrate is achieved by mutually adjusting the substrate and the focusing lens using an electromechanical drive. The initial position of the drive is determined based on the substrate thickness and the lens parameters, and subsequent adjustments are made using the distance sensor readings from the substrate. A modification of the algorithm for automatic focusing of the laser beam on the substrate surface is proposed, utilizing the features of a complementary laser beam scanning system.

Keywords: laser cutting, laser micromachining, complementary system, X-ray template, autofocus, self-supporting structure, submicron topology, CAD model

REFERENCES

1. Vasil'ev A.A., Luchinin V.V., Mal'tsev P.P. Mikrosistemnaya tekhnika. Materialy, tekhnologii, elementnaya baza [Microsystems Engineering. Materials, Technologies, and Elements]. *Elektronnye komponenty = Electronic Components*, 2000, no. 4, pp. 3–11.
2. Reznikova E.F., Mohr J., Hein H. Deep photo-lithography characterization of SU-8 resist layers. *Microsystem Technologies*, 2005, vol. 11 (4), pp. 282–291.
3. Gentshev A.N., Kondrat'ev V.I., Lemzyakov A.G., Dul'tsev F.N. Formirovanie tolstykh vysokoaspektnykh rezistivnykh masok metodom kontaktnoi fotolitografii [Formation of thick high-aspect-ratio resistive masks by the contact photolithography method]. *Avtometriya = Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2018, vol. 54, no. 2, pp. 20–29. (In Russian).
4. Neureuther A.R. Microlithography with soft X rays. *Synchrotron Radiation Research*. Ed. by H. Winick, S. Doniach. New York, London, Plenum Press, 1980, pp. 223–275.

^{*} *Received 10 October 2025.*

5. Kuznetsov S.A., Goldenberg B.G., Kalinin P.V., Eliseev V.S., Petrova E.V. Razrabotka mednykh setochnykh struktur dlya chastotnoi i prostanstvennoi seleksii TGts-izlucheniya novosibirskogo lazera na svobodnykh elektronakh [Development of copper grid structures for frequency and spatial selection of THz radiation from the Novosibirsk free-electron laser]. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neutronnye issledovaniya = Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2009, no. 9, pp. 38–49. (In Russian).
6. Gentshev A.N., Kuznetsov S.A., Baev S.G., Goldenberg B.G., Lonshakov E.A. Sozdanie kvaзиоптических селективных элементов терагерцового диапазона в виде псевдометаллических структур посредством глубокой рентгеновской литографии [Fabrication of quasi-optical selective elements for terahertz range in the form of pseudometallic structures by deep X-ray lithography]. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neutronnye issledovaniya = Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2017, no. 7, pp. 32–42. (In Russian).
7. Gentshev A.N., Baev S.G. Izgotovlenie planarnykh elementov teragertsovoi optiki posredstvom glubokoi trafaretnoi rentgenolitografii [Fabrication of planar terahertz optical elements using deep stencil X-ray lithography]. *Avtometriya = Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2022, no. 2, pp. 104–112. (In Russian).
8. Kuznetsov S.A., Gentshev A.N., Baev S.G. Realizatsiya fil'trov vysokikh chastot subteragertsovogo diapazona s ispol'zovaniem vysokoaspektnykh polimernykh struktur [Implementation of sub-terahertz high-pass filters using high-aspect polymer structures]. *Avtometriya = Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2017, no. 1, pp. 107–116. (In Russian).
9. Goloshevsky N.V. *Metody i programmno-apparatnye sredstva upravleniya ustroystvami lazernoї mikroobrabotki c komplementarnoi sistemoi pozitsionirovaniya*. Diss. kand. tekhn. nauk [Methods and hardware and software for controlling laser microprocessing devices with a complementary positioning system. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2021. 138 p.
10. Goloshevsky N., Aleshin A., Baev S., Bessmeltsev V., Smirnov K., Maksimov M., Mikhailov M. Precision laser system based on complementary scanning principle for dielectric materials microprocessing. *Proceedings of SPIE*, 2008, vol. 6985. *Fundamentals of laser assisted micro- and nanotechnologies*, pp. 170–178.
11. Bessmeltsev V.P., Goloshevsky N.V. Sistema upravleniya sostavnyimi dvukhkoordinatnymi skanatorami [Control system for complementary two-coordinate scanning devices]. *Avtometriya = Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2007, no. 1, pp. 116–126. (In Russian).
12. Baev S.G., Bessmeltsev V.P., Bulushev E.D., Goloshevsky N.V., Goryaev E.P., Kasterov V.V., Maximov M.V., Smirnov K.K. Osobennosti tekhnologii pretsizionnoi femtosekundnoi mikroobrabotki opticheskikh materialov [Technology features of femtosecond laser micro-machining optical materials]. *Interespo Geo-Sibir' = Interexpo Geo-Siberia*, 2016, no. 2, pp. 3–8.
13. Baev S., Bessmeltsev V., Goloshevsky N., Katasonov D. Method of crack-free laser writing of microchannels on glass substrates. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 537 (2), p. 022059.
14. Bessmeltsev V.P., Goloshevsky N.V., Kasterov V.V., Kipriyanov Ya.A., Smirnov K.K. Metod kalibrovki lazernoї gal'vanometricheskoi skaniruyushchei sistemy submikronnogo razresheniya [Calibration method of laser galvanometric scanning system with submicron resolution]. *Avtometriya = Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2018, no. 4, pp. 84–92. (In Russian).
15. Weisz J.R. Software calibration of scan system distortions. *Proceedings of SPIE*, 1991, vol. 1454, pp. 265–271.

Для цитирования:

Баев С.Г., Катасонов Д.Н. Применение алгоритмов автоматической фокусировки в процессе лазерной субмикронной микрообработки // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 4 (100). – С. 147–158. – DOI: 10.17212/2782-2001-2025-4-147-158.

For citation:

Baev S.G., Katasonov D.N. Primenenie algoritmov avtomaticheskoi fokusirovki v protsesse lazernoї submikronnoi mikroobrabotki [Application of autofocus algorithms in laser submicron micromachining]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and data processing systems*, 2025, no. 4 (100), pp. 147–158. DOI: 10.17212/2782-2001-2025-4-147-158.

ISSN 2782-2001, <http://journals.nstu.ru/vestnik>
Analysis and data processing systems
 Vol. 100, No 4, 2025, pp. 147–158