

ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАЕКТОРИЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ФОКУСИРОВКЕ В КОМПЛЕМЕНТАРНЫХ СИСТЕМАХ ЛАЗЕРНОЙ МИКРООБРАБОТКИ

OPTIMIZATION OF MOVEMENT PATHS DURING AUTOMATIC FOCUSING IN COMPLEMENTARY LASER MICROMACHINING SYSTEMS

**D. Katasonov
V. Moskaleva**

Summary. The paper considers the formation of extended structures (tens of millimeters) using laser micromachining methods. These structures are characterized by microtopology (tens of microns), which imposes stringent requirements on the focused laser beam positioning system. The use of complementary laser beam scanning systems allows achieving the required positioning accuracy. The use of short-focus flat-field objectives allows for the required diameter of the focused laser beam. However, such objectives are characterized by small working field sizes (about 5x5 mm) and a small beam waist (about 10–15 μm). This, in turn, requires dividing the object into separate recording zones, for each of which it is necessary to ensure the positioning of the lens relative to the substrate. This requirement can be met by measuring the distance to the center of each recording zone, which in turn leads to many substrate movements before the formation of the object. This paper discusses an approach to the implementation of an automatic focusing system that allows for reducing the number of such movements.

Keywords: laser micromachining, CAD model, automatic focusing, transportation problem, traveling salesman problem, complementary system.

Катасонов Денис Николаевич

кандидат технических наук, научный сотрудник,
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт автоматики и электрометрии
Сибирского отделения Российской Академии Наук;
доцент, Новосибирский государственный
технический университет
katasonov@iae.nsk.su

Москалева Виолетта Михайловна

Новосибирский государственный технический
университет (НГТУ) г. Новосибирск

Аннотация. Рассматривается формирование при помощи методов лазерной микрообработки протяженных структур (десятки миллиметров), которые характеризуются микропологией (десятки микрон), что накладывает ужесточает требования к системе позиционирования сфокусированного лазерного пучка. Применение комплементарных систем сканирования лазерного пучка позволяют достичь требуемой точности позиционирования. Использование короткофокусных объективов плоского поля позволяет обеспечить необходимый диаметр сфокусированного лазерного пучка. Однако, такие объективы характеризуются небольшими размерами рабочего поля (порядка 5x5 мм) и небольшой величиной перетяжки пучка (порядка 10–15 мкм). Это в свою очередь требует дробления объекта на отдельные зоны записи, для каждой из которых необходимо обеспечить позиционирования объектива относительно подложки. Такое требование можно соблюсти за счет измерения расстояния до центра каждой зоны записи, что в свою очередь приводит к большому числу перемещений подложки перед осуществлением формирования объекта. В настоящей работе рассматривается подход к реализации системы автоматической фокусировки позволяющий уменьшить число таких перемещений.

Ключевые слова: лазерная микрообработка, CAD-модель, автоматическая фокусировка, транспортная задача, задача коммивояжера, комплементарная система.

Введение

Существует ряд задач лазерной микрообработки, которые требуют формирования самонесущих плоских изделий из тонкой металлической фольги. При этом, такие объекты состоят из большого количества отдельных элементов, размер перемычек между которыми сопоставим с толщиной фольги. Примером таких объектов являются литографические маски, рентген шаблоны, элементы террагерцовой оптики [1, 2]. Данные

объекты характеризуются общими размерами в пределах 70x70 мм, при этом типичные размеры отдельного элемента находится в пределах 50–500 мкм, а толщина фольги находится в диапазоне 50–70 мкм.

Развитие лазерных методов микрообработки, которые позволяют осуществлять субмикронное позиционирование лазерного пучка, дает возможность использовать лазерную резку для формирования таких объектов. Данная технология позволяет применить промышленно

выпускаемую фольгу, при этом формирование объекта сводится к фиксации фольги и последующему перемещению лазерного пучка согласно подготовленной модели.

Выполненные ранее совместные исследования ИАиЭ СОРАН и ИФП СО РАН показали принципиальную возможность изготовления рассмотренных объектов с требуемыми параметрами. Результаты исследования продемонстрированы при помощи изображений, сформированных сканирующим электронным микроскопом [3, 4]

Существующие методы позиционирования и фокусировки лазерного пучка дают возможность формирования лазерного пучка диаметром порядка 5 мкм на поле до 5x5 мм. Фокусирующие объективы, позволяющие достичь таких параметров, обладают глубиной фокусировки в пределах 20 мкм, что в свою очередь накладывает жесткие требования на систему фокусировки пучка. Одним из способов поддержания необходимого расстояния между фокусирующим объективом и обрабатываемой подложкой является применение бесконтактного датчика расстояния, который закреплен в едином блоке с фокусирующим объективом. По данным датчика расстояния возможно осуществить автоматическую коррекцию взаимного положения объектива и подложки. При этом латеральные размеры формируемых объектов могут существенно превышать размеры поля обработки объектива, что приводит к необходимости деления объекта на отдельные зоны, и его формирование будет производиться поэтапно. При этом топология заготовки может характеризоваться разностью высот между зонами записи, что без дополнительной коррекции положения объектива относительно подложки приведет к появлению дефектов. Таким образом, для каждой зоны записи необходимо определить величину коррекции положения объектива. Это в свою очередь, требует перемещения обрабатываемой подложки для обеспечения лазерной обработки и измерения расстояния. Координаты положения зон записи в общем случае неизвестны, и зависят от количества формируемых объектов и их положения на столе.

В настоящей работе рассматривается модификация алгоритма автоматической фокусировки, который позволяет сократить число перемещений между зонами записи, что в свою очередь ускорит процесс обработки.

Описание системы лазерной микрообработки

Требуемый диаметр лазерного пучка достигается за счет применения короткофокусного объектива, параметры которого согласованы с типом лазерного источника. При выполнении проведенных ранее исследований, о которых было сказано ранее, была использована комплементарная система сканирования (позициониро-

вания) лазерного луча. Схематичное изображение комплементарной системы приведено на рисунке 1.

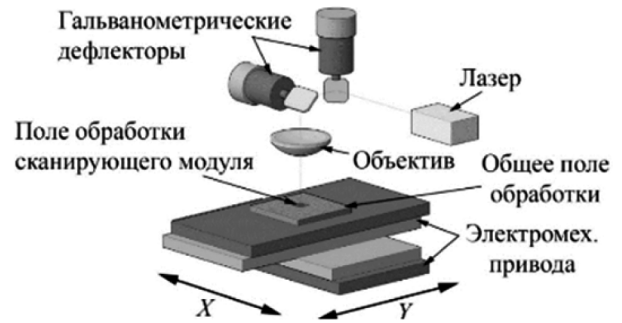


Рис. 1. Комплементарная система сканирования

Показанная на рисунке 1 система состоит из двух дополняющих друг друга систем позиционирования — гальванометрических дефлекторов (сканеров) и электромеханических приводов [5]. Лазерный пучок попадает в так называемый «низкоинерционный» сканер, который состоит из гальванометрических дефлекторов и фокусирующего объектива, и расположен непосредственно над зоной обработки. Сканер осуществляет позиционирование лазерного пучка в зоне, которая является фрагментом общего поля обработки. При этом, обрабатываемая подложка располагается на электромеханическом столе («высокоинерционном» сканере), который перемещает обрабатываемую подложку относительно центра фокусирующего объектива. Таким образом, формирование объекта, размеры которого превышают размеры рабочего поля фокусирующего объектива, осуществляется по фрагментам. Поддержание расстояния между фокусирующим объективом и обрабатываемой подложкой обеспечивается за счет перемещения сборки из объектива и гальванометрических дефлекторов при помощи дополнительного вертикального привода.

Формируемый объект задается в виде CAD модели, которая представлена в форматах STL и DXF.

Особенности системы фокусировки лазерного пучка

Как было сказано ранее, комплементарный способ сканирования пучка требует дробления формируемого объекта на зоны обработки. Размер зон обработки ограничен параметрами фокусирующего объектива и дополнительно ограничен таким образом, что перепад высоты подложки в пределах зоны обработки не превышает глубину фокусировки лазерного пучка. Таким образом, автоматическую фокусировку можно обеспечить, осуществляя измерение расстояния до обрабатываемой подложки в пределах очередной зоны обработки. Это позволит учесть, как топологию подложки, так и неточность в определении общей толщины подложки и системы ее крепления. Как было отмечено ранее, это выполняется при помощи бесконтактного датчика расстояния

(датчика фокуса), который расположен в одном блоке с объективом и гальванометрическими сканерами. Схематичное изображение взаимного расположения фокусирующего объектива и датчика фокуса приведено на рисунке 2.

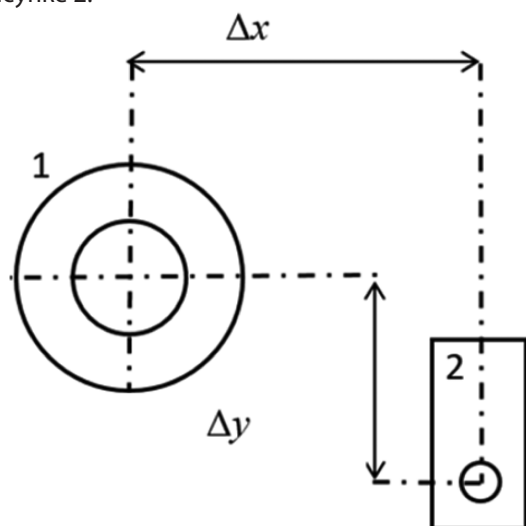


Рис. 2. Взаимное расположение объектива и датчика фокуса. 1 — фокусирующий объектив, 2 — датчик фокусировки, Δx , Δy — соответствующие смещения

Как видно из рисунка 2 датчик фокуса и объектив латерально разнесены между собой, таким образом, чтобы обеспечить измерение расстояния до центра очеред-

ной зоны обработки, необходимо сформировать траекторию перемещения подложки таким образом, чтобы учесть величины Δx и Δy . На рисунке 3 показана типичная CAD модель самонесущего объекта, на примере модели рентгеншаблона.

Типичный объект, модель которого показана на рисунке 3 состоит из набора гексагональных элементов, типичный размер которых находится в пределах 50–800 мкм, а ширина перемычек между объектами в пределах 50–100 мкм, при этом сам объект имеет размеры в пределах 50 мм. Таким образом, при размере зоны обработки в пределах 5–6 мм, формируемый объект потребует выполнения порядка ста измерений (по количеству зон обработки), и как следствие потребуются такое же количество перемещений электромеханического стола для согласования положения зоны обработки и датчика фокуса. На рисунке 4 показан фрагмент рассмотренной ранее модели, разделенной на зоны обработки.

Деление модели на зоны обработки осуществляется по вертикали и горизонтали, начиная от левого нижнего угла модели. Также следует отметить, что одновременно на предметном столе, размеры которого составляют 200x200 мм, может быть расположено несколько формируемых объектов. Это в свою очередь увеличивает требуемое количество перемещений электромеханического стола, и время затрачиваемое на его работу может быть сравнимо со временем формирования изделия.

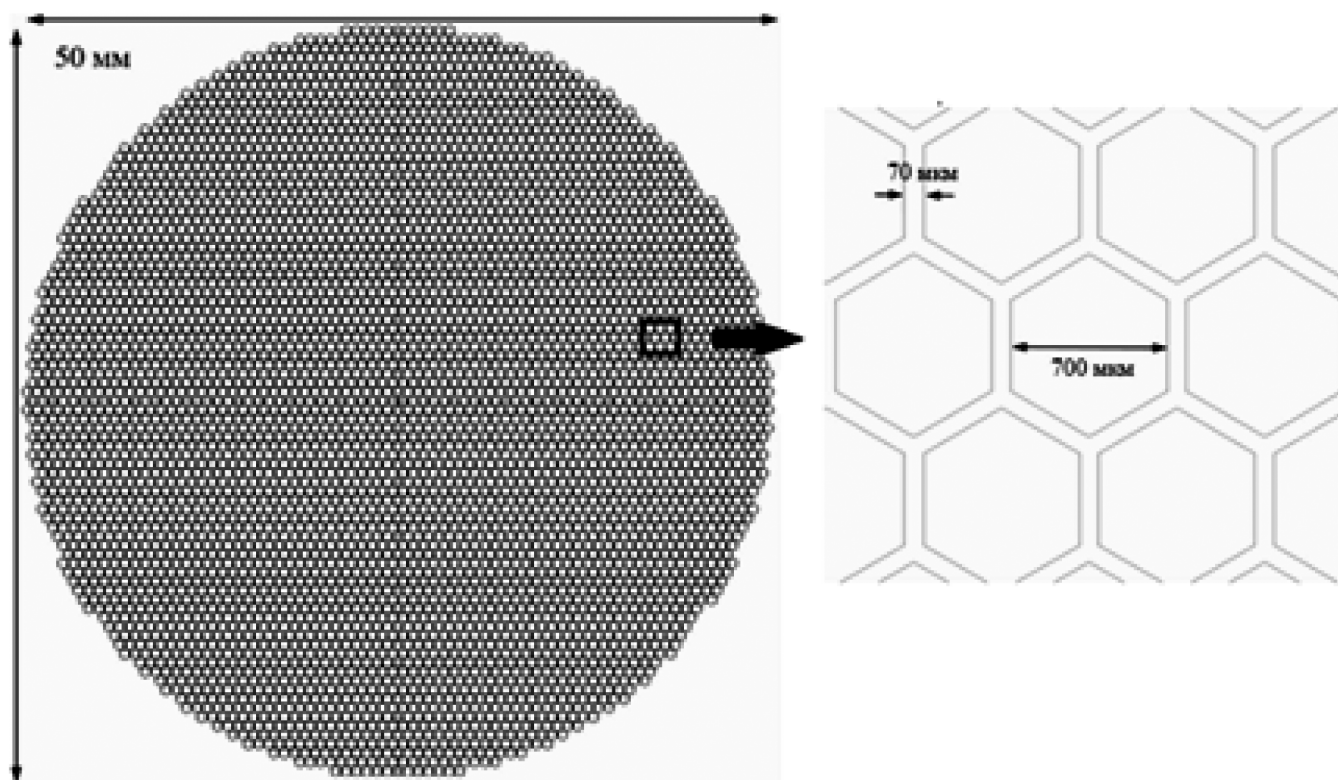


Рис. 3. Типичный вид самонесущего объекта

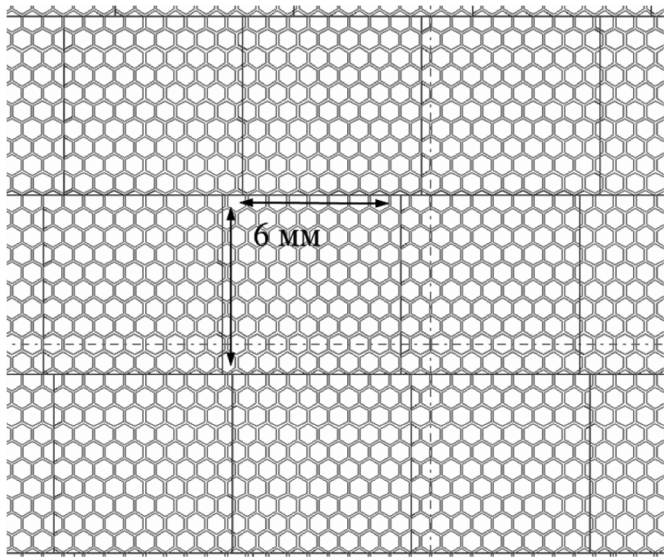


Рис. 4. Деление на зоны обработки

При этом калибровки сканирующих систем таковы, что порядок обработки объектов и зон в пределах каждого объекта не имеет значения, и не влияет на качество изделия. Ранее были проведены исследования, которые показали возможность использования такого подхода при формировании протяженных объектов [6].

Таким образом, для ускорения процесса обработки требуется оптимизация траекторий перемещения стола.

**Траектории перемещения
электромеханического стола**

Рассмотрим формирование двух рентгеношаблонов, заданных рассмотренной ранее моделью. На рисунке 5



A

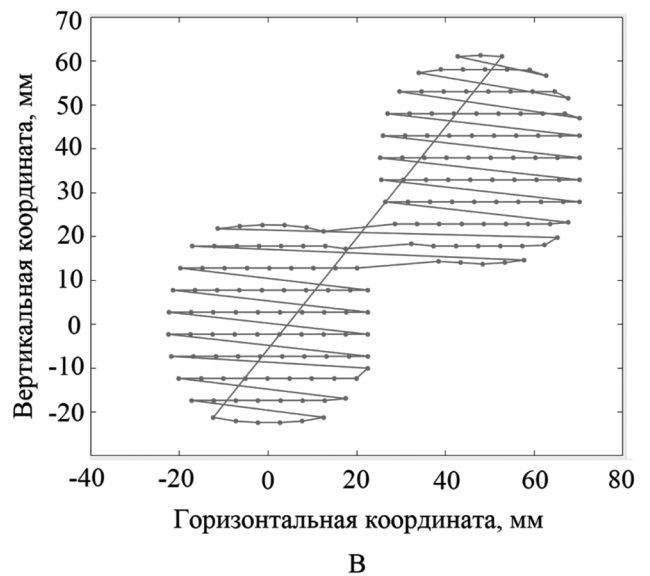
приведен скриншот рабочей области программного обеспечения системы лазерной записи, на котором показаны модели объектов разделенные на зоны записи.

На рисунке 5 А показан фрагмент рабочего поля программного обеспечения системы лазерной записи, на рабочем поле показаны загруженные CAD-модели формируемых объектов, а квадратами показаны рассчитанные зоны записи. В центрах зон будет осуществлено измерение. На рисунке 5 В показана визуализация траектории перемещения стола в соответствии с приведенными зонами. Общий путь перемещения электромеханических приводов, обеспечивающий измерение всех зон для рассмотренных объектов составит 1680 мм. Также аналогичный путь перемещения будет повторен при лазерном формировании объектов (с учетом поправки на взаимное положение объектива и датчика расстояния).

Задачу обхода центров зон можно рассмотреть, как задачу коммивояжера. Для решения такой транспортной задачи был использован метод имитации отжига [7]. В результате был сформирован путь перемещения, показанный на рисунке 6.

Общее расстояние при обходе зон записи по пути, показанному на рисунке 6 равен 874 мм, что практически в два раза меньше исходного пути. На рисунке 7 показан результат формирования рассмотренного ранее объекта, при наличии и отсутствии автоматической фокусировки.

Объекты, изображенные на рисунке 7 изготовлены из медной фольги толщиной 50 мкм, на выносках показаны укрупненные изображения их фрагментов. На ри-



B

Рис. 5. Разделенные на зоны записи модели объектов

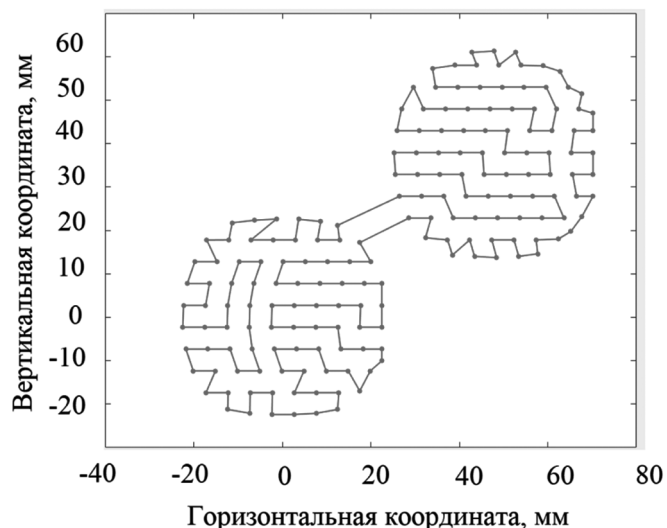


Рис. 6. Оптимизированный путь перемещения

сунке 7 В показан объект, который был сформирован без автоматической коррекции положения объектива относительно подложки в каждой зоне записи. Как видно из укрупненного изображения фрагмента, показанного на рисунке 7 В, объект содержит дефекты вызванные неполным отделением фольги в пределах элементов топологии. На рисунке 7 А показан объект, сформированный со включенной автоматической коррекцией и указанных дефектов не содержит.

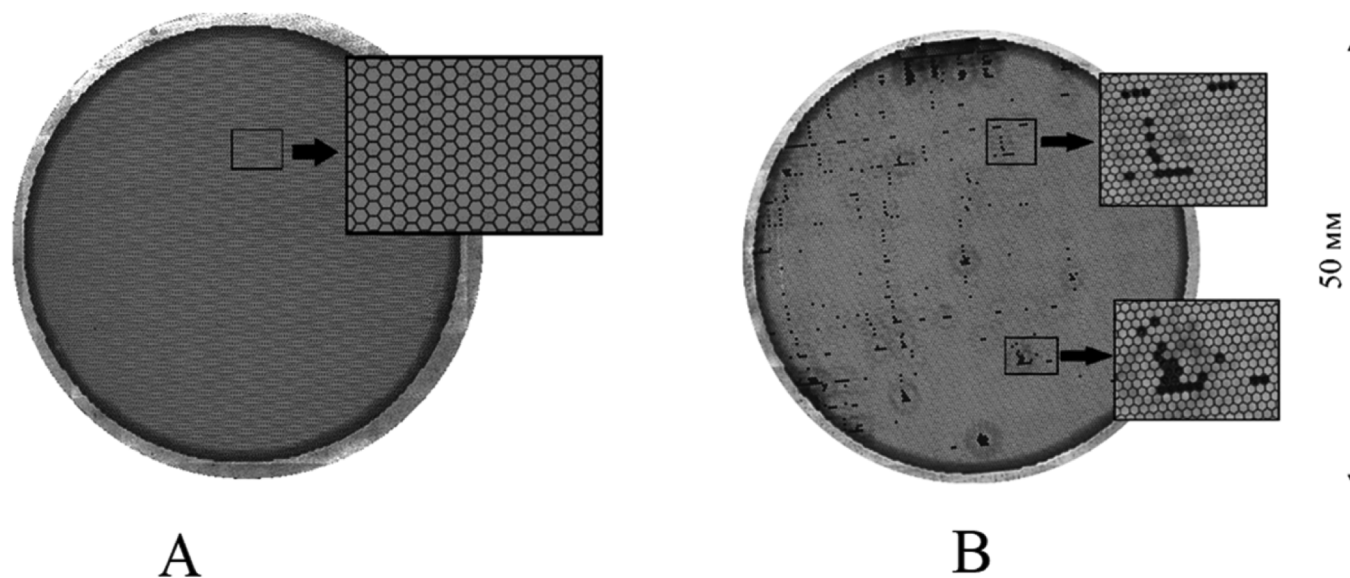


Рис. 7. Пример сформированных объектов. А — с использованием автоматической фокусировки, В — без использования автоматической фокусировки

Заключение

Применение методов лазерной микрообработки позволяет формировать микротопологий различного применения. При этом общие размеры формируемых изделий, при микронных размерах отдельных элементов топологии могут достигать десятков миллиметров. Примерами таких топологий могут являться оптические шкалы и сетки, например, штриховая мера длины ИБ, длина которой равна 200 мм, при цене 10 мкм. Другим примером являются рассмотренные в данной работе самонесущие плоские элементы. При этом форма обрабатываемых подложек зачастую характеризуется разностью толщины, как в микро, так и в макромасштабе, что накладывает ограничения на качество фокусировки лазерного луча. Комплементарные системы сканирования лазерного луча позволяют формировать такие объекты с приемлемым быстродействием (за счет минимизации веса подвижных элементов), однако применяемые фокусирующие объективы плоского поля накладывают существенные ограничения на размеры зоны обработки и качество фокусировки.

Рассмотренный в настоящей работе подход к автоматической фокусировке подразумевает предварительное измерение расстояния до каждой зоны записи, что требует большого числа перемещений электромеханических приводов. Однако, используя алгоритмы оптимизации можно сократить общую длину перемещений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Генцелев А.Н. и др. Создание квазиоптических селективных элементов терагерцового диапазона в виде псевдометаллических структур посредством глубокой рентгеновской литографии // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2017. — №. 7. — С. 32–42.
2. Кузнецов С.А. и др. Разработка медных сеточных структур для частотной и пространственной селекции ТГц-излучения новосибирского лазера на свободных электронах // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2009. № 9. С. 38–49.
3. Генцелев А.Н., Баев С.Г. Изготовление планарных элементов терагерцовой оптики посредством глубокой трафаретной рентгенолитографии // Автометрия. — 2022. — №. 2. — С. 104.
4. Генцелев А.Н., Баев С.Г. и др. Реализация фильтров высоких частот субтерагерцового диапазона с использованием высокоаспектных полимерных структур // Автометрия. — 2017. — №. 1. — С. 107–116.
5. Голошевский Н.В. Методы и программно-аппаратные средства управления устройствами лазерной микрообработки с комплементарной системой позиционирования: дис. канд. тех. наук. Новосибирск: Институт Автоматики и Электротриии СО РАН, 2021. 138 с.
6. Баев С.Г., Катасонов Д.Н. Применение алгоритмов автоматической фокусировки в процессе лазерной субмикронной микрообработки // Системы анализа и обработки данных. — 2025. — № 4(100). С. 147–158.
7. Товстик Т.М., Жукова Е.В. Алгоритм приближенного решения задачи коммивояжера // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. — 2013. — №. 1. — С. 101–109.

© Катасонов Денис Николаевич (katasonov@iae.nsk.su); Москалева Виолетта Михайловна
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»