



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-38-44>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.3.049.77:621.373.8

## ВЫБОР ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ОТВЕРСТИЙ В КРЕМНИЕВОЙ ПОДЛОЖКЕ

А. И. ЛАППО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 11.06.2024*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

**Аннотация.** Среди перспективных технологических направлений реализации многокристалльных модулей является сборка 3D-модулей. Особенность данной технологии – расположение компонентов сборки не только в горизонтальной плоскости, но и по вертикали. Формирование контактных соединений между компонентами 3D-модуля может осуществляться с помощью проволочного монтажа, а также по технологии поверхностного монтажа. Для реализации последнего необходимо формирование переходных отверстий в кремниевой пластине. При создании переходных отверстий между слоями многокристалльного модуля используется фокусированная энергия лазерного луча. Поскольку диаметр отверстий может быть больше диаметра лазерного луча, необходимо перемещать луч по заданной траектории. Для выбора траектории перемещения сфокусированного лазерного луча осуществлено моделирование визуализаций движения лазера при формировании отверстия для скоростей 0,5 и 5,0 мм/с. Моделирование выполнялось в COMSOL Multiphysics 5.6, что позволило получить распределение тепловых полей при лазерной прошивке отверстий в кремниевой подложке.

**Ключевые слова:** моделирование, траектория, нагрев, лазерный луч, тепловые поля, переходное отверстие, кремниевая пластина, 3D-модуль.

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Лаппо, А. И. Выбор траектории движения лазерного луча для формирования переходных отверстий в кремниевой подложке / А. И. Лаппо // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 6. С. 38–44. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-38-44>.

## SELECTING THE TRAJECTORY OF THE LASER BEAM TO FORM VIAS IN THE SILICON SUBSTRATE

ALIAKSANDR I. LAPO

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 11.06.2024*

**Abstract.** One of the promising technological directions for the implementation of multi-crystal modules is the assembly of 3D modules. The peculiarity of this technology is the arrangement of the assembly components not only in the horizontal plane, but also vertically. The formation of contact connections between the components of the 3D module can be carried out using wire mounting, as well as using surface mounting technology. To implement the latter, it is necessary to form vias in the silicon wafer. When creating vias between the layers

of the multi-crystal module, the focused energy of the laser beam is used. Since the diameter of the holes can be larger than the diameter of the laser beam, it is necessary to move the beam along a given trajectory. To select the trajectory of the focused laser beam, a simulation of the visualization of the laser movement during the formation of a hole for the speeds of 0.5 mm/s and 5 mm/s was carried out. Modeling was performed in COMSOL Multiphysics 5.6, which made it possible to obtain the distribution of thermal fields during laser flashing of holes in the silicon substrate.

**Keywords:** modeling, trajectory, heating, laser beam, thermal fields, via, silicon wafer, 3D module.

**Conflict of interests.** The author declares no conflict of interests.

**For citation.** Lapo A. I. (2024) Selecting the Trajectory of the Laser Beam to Form Vias in the Silicon Substrate. *Doklady BGUIR*. 22 (6), 38–44. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-38-44> (in Russian).

## Введение

Применение лазерного излучения для технологических операций без контактного воздействия на материал имеет несколько преимуществ, таких как точное следование технологическим режимам и контроль над объемом подводимой энергии. Высокая энергетическая плотность лазерного излучения позволяет быстро нагревать материалы до высокой температуры, включая температуру испарения, что дает возможность использовать одно технологическое оборудование для различных операций по обработке изделий [1].

При создании переходных отверстий между структурами многокристального модуля использовалась фокусированная энергия лазерного луча. Поскольку диаметр отверстий может быть больше диаметра лазерного луча, луч следует перемещать по заданной траектории. Перемещение луча можно осуществлять путем точного перемещения изделия, закрепленного на столе, относительно неподвижного лазерного луча, или путем отклонения луча с помощью системы зеркал.

В случае создания отверстий в кремниевой подложке можно выделить две проблемы: выбор технологических режимов работы лазера (мощность, частота импульсов, скорость перемещения лазерного пучка) и выбор оптимальной траектории перемещения луча. Технология формирования точечных отверстий несовершенна, поэтому получаемые отверстия имеют коническую форму, которая определяется отношением разницы диаметров отверстий к толщине подложки. Для получения качественного отверстия конусообразность не должна превышать 0,1. Учитывая это, использование траектории движения лазерного луча в форме окружности является неэффективным, и возникает задача разработки траектории движения, заполняющей ограниченную окружность.

## Выбор технологических режимов

Для операции создания переходных отверстий в кремниевой подложке применяется лазерное оборудование – оптоволоконный лазер ULPN-355-10-1-10-M [2]. Лазер работает в импульсном режиме со следующими характеристиками:

- мощность лазера – 10 Вт;
- длительность импульса – 1,2 нс;
- частота – 150 Гц;
- диаметр луча – 0,005 мм;
- скорость движения луча – 0,5 или 5,0 мм/с;
- длина волны – 355 нм.

## Моделирование лазерного нагрева при сверлении отверстий

Поскольку лазерное излучение является импульсным, следовательно, по ходу движения луча будут образовываться области, на которых не будет происходить воздействие на материал. Для моделирования траектории движения лазера предложено несколько вариантов движения:

- вариант 1 – гипотрохоида (рис. 1):

$$\begin{cases} x = (r - mr) \cos(mt) + h \cos(t - mt), \\ y = (r - mr) \sin(mt) - h \sin(t - mt) \end{cases} \quad (1)$$

– вариант 2 – спираль (рис. 2):

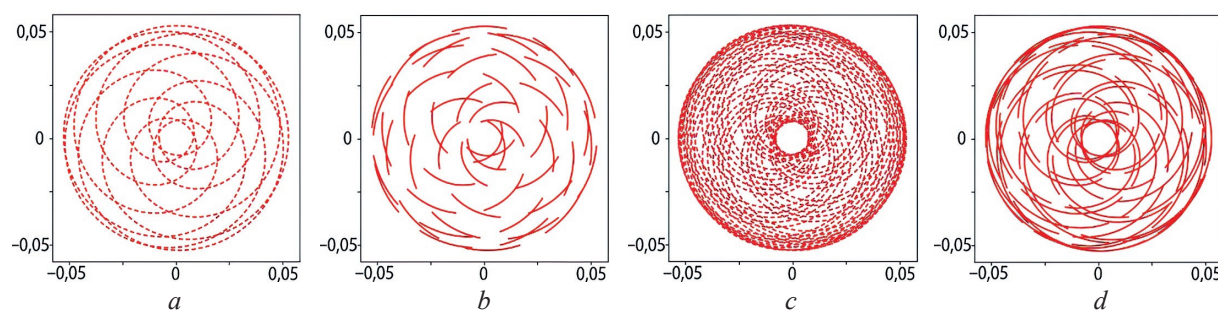
$$\begin{cases} x = 4\pi \cos(\theta) + at \cos(t + q), \\ y = 4\pi \sin(\theta) + at \sin(t + q), \end{cases} \quad (2)$$

– вариант 3 – внешняя гипотрооида (рис. 3):

$$\begin{cases} x = (r - mr) \cos(mt) + h \cos(t - mt), \\ y = (r - mr) \sin(mt) + h \sin(t - mt), \end{cases} \quad (3)$$

где  $t$  – время;  $x, y$  – координаты;  $r, m, a, q, h$  – коэффициенты, определяющие форму траектории.

Для моделирования траектории движения лазера был выбран диаметр 0,1 мм. Для каждого контура получено четыре варианта зависимости от скорости движения луча (0,5 или 5,0 мм/с) с перекрытием слоев (рис. 1–3).

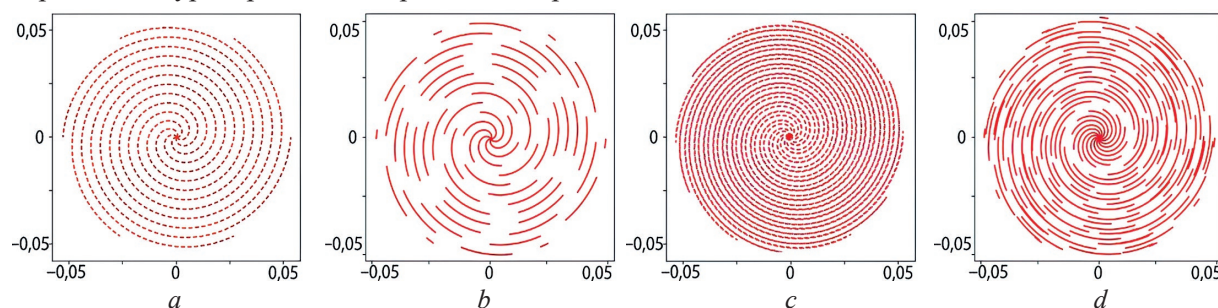


**Рис. 1.** Визуализация траектории движения лазера по гипотрооиде для формирования отверстия при скорости движения луча:  $a, c$  – 0,5 мм/с;  $b, d$  – 5,0 мм/с

**Fig. 1.** Visualization of the laser trajectory along the hypotrochoid to form a hole at the beam speed:  $a, c$  – 0.5 mm/s;  $b, d$  – 5.0 mm/s

Движение луча по гипотрооиде (вариант 1) за один проход не имеет перекрытия (рис. 1). Чтобы получить перекрытие участков, которые должны быть обработаны, добавлено несколько проходов (рис. 1,  $c, d$ ). Для движения луча со скоростью 0,5 мм/с потребовалось совершить четыре прохода, для скорости 5,0 мм/с – достаточно два прохода по траектории.

Визуализация движения луча по спирали (вариант 2) за один проход представлена на рис. 2,  $a, b$ . Чтобы получить перекрытие участков (рис. 2,  $c, d$ ), потребовалось минимальное количество повторения контуров, равное четырем, для скоростей 0,5 и 5,0 мм/с.

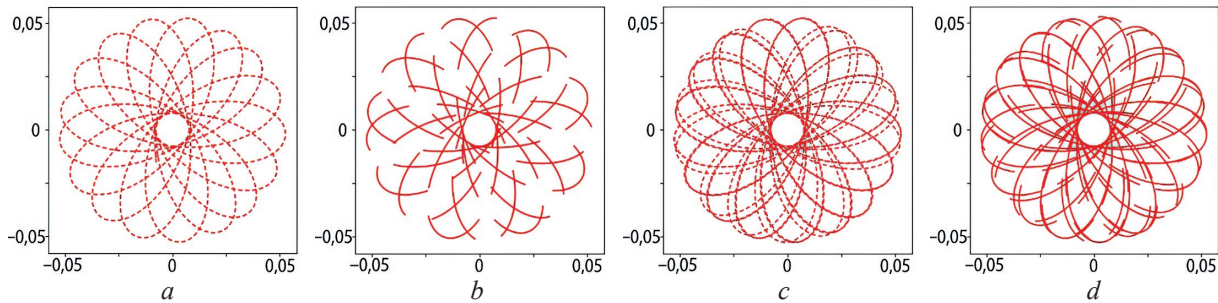


**Рис. 2.** Визуализация траектории движения лазера по спирали для формирования отверстия при скорости движения луча:  $a, c$  – 0,5 мм/с;  $b, d$  – 5,0 мм/с

**Fig. 2.** Visualization of the laser's spiral path to form a hole at the beam speed:  $a, c$  – 0.5 mm/s;  $b, d$  – 5.0 mm/s

Для внешней гипотрооиды (вариант 3) результат за один проход представлен на рис. 3. Чтобы получить перекрытие участков (рис. 3,  $c, d$ ) для скоростей 0,5 и 5,0 мм/с, потребовалось три раза повторить движение по контуру. Все приведенные траектории не позволяют получить замкнутый контур за один проход, для этого требуется несколько повторений движения по контуру. При моделировании движения лазера по траектории, которая проходит более двух контуров, можно заметить, что каждый последующий слой не перекрывает в точности нижележащий слой,

а располагается с некоторым смещением. Данную особенность нельзя назвать недостатком модели, поскольку при физическом процессе формирования отверстия сложно получить высочайшую точность позиционирования луча, чтобы в точности повторить несколько контуров.



**Рис. 3.** Визуализация траектории движения лазера по внешней гипотрохоиде для формирования отверстия при скорости движения луча:  $a, c - 0,5$  мм/с;  $b, d - 5,0$  мм/с  
**Fig. 3.** Visualization of the laser trajectory along the outer hypotrochoid to form a hole at the beam speed:  $a, c - 0.5$  mm/s;  $b, d - 5.0$  mm/s

Для движения луча по гипотрохоиде (вариант 1) со скоростью 0,5 мм/с потребовалось совершить четыре прохода, при этом получились четкий широкий внешний контур и равномерное заполнение площади обрабатываемой области. Для скорости 5,0 мм/с достаточно двух проходов по траектории, также характерна широкая замкнутая область внешнего контура, но внутренняя область разделена на небольшие замкнутые сегменты, что позволит быстро получить отверстие и минимизировать количество проходов луча.

При спиральном движении луча (вариант 2) не получилось создать замкнутый контур, но отмечено равномерное распределение лучей по всему полю обработки материала для скорости 0,5 мм/с. Внешняя гипотрохоида (вариант 3) показала схожие результаты с гипотрохоидой (вариант 1), но для достижения потребовалось больше времени на слой и больше слоев контуров.

### Моделирование тепловых полей при формировании отверстий

Целью моделирования являлось получение зависимостей распределения тепла на поверхности кремниевой пластины, подверженной лазерному нагреву. Для выбранной длины волны лазера предполагалось, что поглощающая способность равна излучающей способности. Следовательно, все лазерное излучение будет уходить на нагрев пластины [3]. Диаметр формируемого отверстия составлял 0,1 мм. Температура поверхности зависела от мощности, поглощенной единицей площади.

Особенностью задач, связанных с нагревом материалов лазерным излучением, является то, что распределение излучения и, следовательно, тепловой источник обладают резко изменяющимися пространственно-временными характеристиками [4]. Поэтому идеализация свойств тепловых источников, часто используемая в расчетных схемах для математического аппарата, может приводить к отклонениям расчетных данных от экспериментальных. Таким образом, функция гауссовского импульса позволяет описать профиль излучения лазерного источника и задать нормальное распределение плотности мощности падающего лазерного излучения. Решив уравнение теплопроводности, получаем распределение температуры по поверхности при использовании источника с гауссовским профилем [5]:

$$T(x, y, z, t) = \frac{2P}{\rho c (4\pi a)^{3/2}} \int_0^t \frac{1}{(\tau + t)\sqrt{t}} e^{-\left(\frac{z^2}{4a\tau} + \frac{x^2 + y^2}{4a\left(t + \frac{a}{4r}\right)}\right)} d\tau, \quad (4)$$

где  $P$  – мощность излучения, введенная в материал через площадку;  $\rho$  – плотность материала;  $c$  – удельная теплоемкость;  $a$  – коэффициент теплопроводности;  $r$  – радиус пятна излучения;  $t$  – текущее время;  $\tau$  – начальное время.



## Результаты исследований и их обсуждение

Для моделирования процесса лазерного нагрева применялся программный комплекс COMSOL Multiphysics 5.6. Настройки выбирались в соответствии с заранее заданными технологическими режимами. По результатам моделирования для создания отверстия в ходе прохождения лазером по заданной траектории со скоростью движения луча 0,5 мм/с были получены тепловые поля (рис. 4). Для достижения температуры плавления кремния потребовалось перекрытие базовых траекторий одна на одну с некоторым смещением.

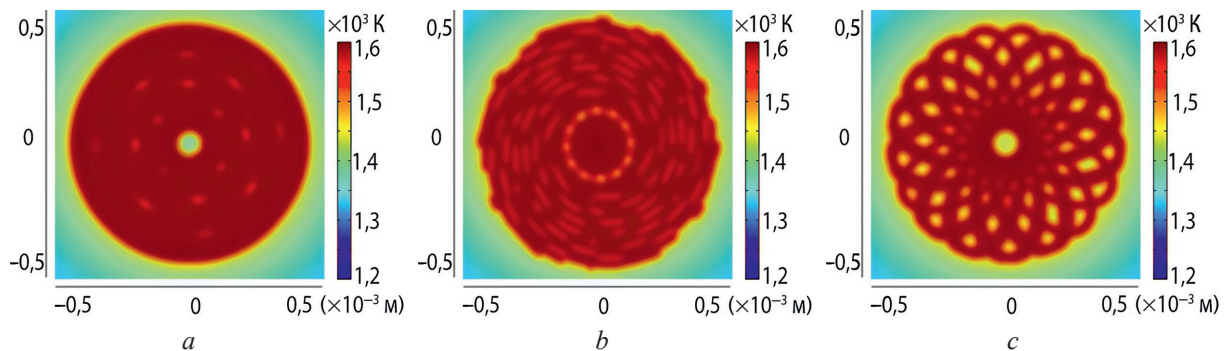


Рис. 4. Тепловые поля в зоне нагрева для скорости движения луча 0,5 мм/с по траектории:  
*a* – гипотрохоида; *b* – спираль; *c* – внешняя гипотрохоида

Fig. 4. Thermal fields in the heating zone for a beam speed of 0.5 mm/s along the trajectory:  
*a* – hypotrochoid; *b* – spiral; *c* – external hypotrochoid

Для варианта прохождения лазерного луча по гипотрохоиде (рис. 4, *a*) время, при котором получается относительно равномерное поле нагрева, составило 3,68 с. Поле нагрева имеет ровный круглый контур с незначительной областью в центре с температурой ниже температуры плавления – около 1400 °С. Есть области с температурой ~1550 °С, которые распределены по поверхности менее плотно, но равномерно. Эти недостатки обусловлены меньшим перекрытием лазерного луча в данных точках из-за особенности траектории движения лазера.

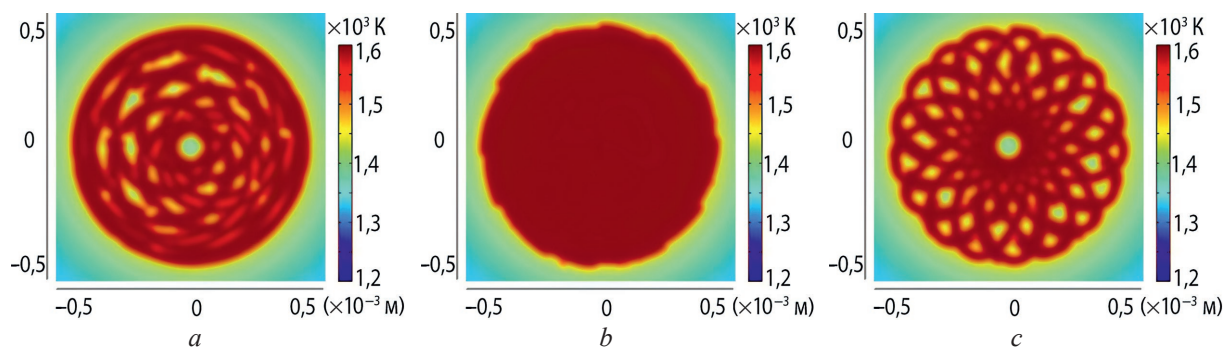
В случае теплового поля, полученного при движении лазерного луча по спирали (рис. 4, *b*), характерны неровные края и наличие областей с температурой ~1550 °С, которые плотно и равномерно распределены от края к центру нагреваемой области. Время операции нагрева составило 3,79 с.

Для теплового поля, полученного при движении лазерного луча по внешней гипотрохоиде (рис. 4, *c*), характерны неровные края и наличие областей, имеющих температуру ~1450 °С, которые плотно и равномерно распределены от края к центру нагреваемой области. Время операции нагрева – 4,77 с.

Если сравнивать три полученных тепловых поля по скорости операции и равномерности распределения теплового воздействия, оптимальный результат получен для движения лазерного луча по траектории гипотрохоиды (рис. 4, *a*). Вариант движения лазерного луча по траектории внешней гипотрохоиды (рис. 4, *c*) оказался самым худшим из-за увеличенного на 30 % времени операции и наличия значительного числа областей, где температура ниже температуры плавления кремния. Это потенциально может ухудшить качество формируемого отверстия.

По результатам моделирования для создания отверстия при прохождении лазером по заданным траекториям со скоростью движения луча 5 мм/с были получены тепловые поля (рис. 5). Все траектории имеют перекрытие с некоторым смещением, что необходимо для достижения температуры плавления.

Для теплового поля, полученного при движении лазерного луча по гипотрохоиде (рис. 5, *a*), характерны ровные края и наличие областей, имеющих температуру около 1450 °С и распределенных плотно, но не равномерно от края к центру нагреваемой области. Время операции нагрева составило 2,21 с. В случае теплового поля, полученного при движении лазерного луча по спирали (рис. 5, *b*), характерны неровные края и отсутствие областей, имеющих температуру ниже температуры плавления. Время операции нагрева – 2,27 с. Для теплового поля, полученного при движении лазерного луча по внешней гипотрохоиде (рис. 5, *c*), характерны неровные края и наличие областей, имеющих температуру ~1450 °С и распределенных плотно и равномерно от края к центру нагреваемой области. Время операции нагрева составило 3,18 с.



**Рис. 5.** Тепловые поля в зоне нагрева для скорости движения луча 5,0 мм/с по траектории:  
*a* – гипотрохоида; *b* – спираль; *c* – внешняя гипотрохоида

**Fig. 5.** Thermal fields in the heating zone for a beam speed of 5.0 mm/s along the trajectory:  
*a* – hypotrochoid; *b* – spiral; *c* – external hypotrochoid

Если сравнивать три полученных тепловых поля по скорости операции и равномерности распределения теплового воздействия, то оптимальный результат достигается при движении лазерного луча по траектории спирали. Вариант движения лазерного луча по траектории внешней гипотрохоиды оказался самым худшим из-за увеличенного на 40 % времени операции и наличия значительного числа областей, где температура ниже температуры плавления кремния, что потенциально может ухудшить качество формируемого отверстия.

При сравнении полученных тепловых полей, имеющих одинаковую траекторию, но разную скорость движения лазера, отмечено, что при скорости 5,0 мм/с время операции сокращается в среднем на 40 %. В случае движения по гипотрохоиде более равномерный нагрев получается при меньшей скорости. При движении по спирали лучшее распределение тела по зоне воздействия достигается на большей скорости. Для внешней гипотрохоиды скорость движения не оказывает существенного влияния на распределение тепловых полей.

По результатам моделирования наиболее оптимальный вариант контура для операции сверления микроотверстий в кремниевой подложке – движение по гипотрохоиде (рис. 1).

### Заключение

1. Лазерный нагрев является перспективным методом формирования отверстий в кремнии при сборке 3D-электронных модулей с высокой плотностью соединений благодаря его высокой удельной энергии и возможности локального нагрева.

2. Путем моделирования тепловых полей в программном пакете COMSOL Multiphysics 5.6 при лазерной обработке кремниевых подложек получены параметры лазерного излучения и траектории движения лазерного луча. Исходя из результатов моделирования, наиболее вероятно создание качественного отверстия при движении по гипотрохоиде со скоростью движения луча 0,5 мм/с и при движении по спирали со скоростью движения луча 5,0 мм/с, поскольку здесь наблюдается равномерное распределение лазерных лучей по всему контуру. Получение отверстий при движении по внешней гипотрохоиде на практике нерационально для любой скорости движения луча, поскольку наблюдается значительная площадь просветов с температурой ниже температуры точки плавления.

### Список литературы

1. Мухина, Е. 3D-сборка: технология сквозных отверстий в кремнии / Е. Мухина, П. Башта // Электроника: наука, технология, бизнес. 2009. № 2. С. 92–93.
2. ULPN-355-10-1-10-M – IPG Photonics Corporation [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://pdf.directindustry.com/pdf/ipg-photonics-corporation/ulpn-355-10-1-10-m/29249-947816.html>. Дата доступа: 29.05.2024.
3. Вейко, В. П. Взаимодействие лазерного излучения с веществом / В. П. Вейко, М. Н. Либензон, Г. Г. Червяков. М.: Физматлит, 2008.
4. Ланин, В. Л. Формирование отверстий в кремниевой подложке 3D-электронного модуля лазерным излучением / В. Л. Ланин, В. Т. Фам, А. И. Лаппо // Доклады БГУИР. 2021. Т. 19, № 3. С. 58–65. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-3-58-65>.

5. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. И. Жиганов, А. И. Мискоров. М.: Изд-во Моск. гос. технич. ун-та им. И. Э. Баумана, 2006.

### References

1. Mukhina E., Bashta P. (2009) 3D Assembly: Through-Hole Technology in Silicon. *Electronics, Science, Technology, Business*. (2), 92–93 (in Russian)
2. ULPN-355-10-1-10-M – IPG Photonics Corporation. Available: <https://pdf.directindustry.com/pdf/ipg-photonics-corporation/ulpn-355-10-1-10-m/29249-947816.html> (Accessed 29 May 2024).
3. Veiko V. P., Libenzon M. N., Chervyakov G. G. (2008) *Interaction of Laser Radiation with Matter*. Moscow, Fizmatlit Publ. (in Russian).
4. Lanin V. L., Pham V. T., Lappo A. I. (2021) Through-Silicon-Via Formation of 3D Electronic Modules by Laser Radiation. *Doklady BGUIR*. 19 (3), 58–65. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-3-58-65> (in Russian).
5. Grigoryants A. G., Zhiganov I. I., Miskorov A. I. (2006) *Technological Processes of Laser Processing*. Moscow, Publishing House of Bauman Moscow State Technical University (in Russian).

### Сведения об авторе

**Лаппо А. И.**, ст. преп. каф. информационных технологий автоматизированных систем, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
Тел.: +375 17 293-88-23  
E-mail: [lappo@bsuir.by](mailto:lappo@bsuir.by)  
Лаппо Александр Игоревич

### Information about the author

**Lappo A. I.**, Senior Lecturer at the Information Technologies in Automated Systems Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki St., 6  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
Tel.: +375 17 293-88-23  
E-mail: [lappo@bsuir.by](mailto:lappo@bsuir.by)  
Lappo Aliaksandr Igaravich