



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-3-58-65>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.365 (075.6)

ФОРМИРОВАНИЕ ОТВЕРСТИЙ В КРЕМНИЕВОЙ ПОДЛОЖКЕ 3D-ЭЛЕКТРОННОГО МОДУЛЯ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

В.Л. ЛАНИН, В.Т. ФАМ, А.И. ЛАППО

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

Поступила в редакцию 1 февраля 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Лазерный нагрев является перспективным методом формирования отверстий в кремниевых подложках при сборке 3D-электронных модулей с высокой плотностью выводов из-за его высокой удельной энергии и способности локального нагрева. Применение лазерного излучения для формирования отверстий в кремнии дает возможность уменьшения их диаметра, косвенно повышает плотность элементов в 3D-электронных модулях. Выбор лазерной системы зависит от физико-механических свойств обрабатываемых материалов и от технических требований, предъявляемых к лазерной обработке. Отражательная способность большинства материалов возрастает с увеличением длины волны лазерного излучения. Установлено, что с повышением начальной температуры кремниевой подложки конусообразность отверстий в ней становится больше. Выполнено моделирование в COMSOL Multiphysics 5.6 для проведения теплового распределения при лазерной прошивке отверстий в кремниевой подложке. Моделированием тепловых полей в программном пакете COMSOL Multiphysics 5.6 при лазерной обработке кремниевых подложек и экспериментальными исследованиями оптимизированы параметры лазерного излучения для получения минимальной конусообразности отверстий в подложках 3D-электронных модулей. Оптимальная длительность воздействия лазерного излучения с длиной волны 10,64 мкм составляет не более 2 с при конусообразности отверстий 0,1–0,2.

Ключевые слова: лазерное излучение, кремниевая подложка, конусообразность отверстий, моделирование тепловых полей, начальная температура.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Ланин В.Л., Фам В.Т., Лаппо А.И. Формирование отверстий в кремниевой подложке 3D-электронного модуля лазерным излучением. Доклады БГУИР. 2021; 19(3): 58-65.

THROUGH-SILICON-VIA FORMATION OF 3D ELECTRONIC MODULES BY LASER RADIATION

VLADIMIR L. LANIN, VAN T. PHAM, ALEXANDR I. LAPPO

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

Submitted 1 February 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. Laser heating is a promising method for through-silicon-via (TSV) formation in assembling high-density 3D electronic modules due to its high specific energy and local heating ability. Using laser radiation for the formation of TSV makes it possible to reduce its diameter, indirectly increases the density of elements in 3D electrical modules. Laser system selection depends on the physical and mechanical properties of the processed materials and on the technical requirements for laser processing. The reflectivity of most materials increases with the laser wavelength. It was found that with an increase in the initial temperature of the substrate, the TSV taper becomes larger. Simulation was performed in COMSOL Multiphysics 5.6 to conduct thermal distribution during TSV laser formation. By modeling thermal fields in the COMSOL Multiphysics 5.6 software for laser processing of silicon substrates and experimental studies, the parameters of laser radiation have been optimized to obtain a minimum hole taper coefficient in the substrates of 3D electronic modules. The optimal duration of exposure to laser radiation with a wavelength of 10.64 microns is less than 2 s with holes taper 0.1–0.2.

Keywords: laser radiation, silicon substrate, hole taper coefficient, thermal field simulation, initial temperature.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Lanin V.L., Pham V.T., Lappo A.I. Through-silicon-via formation of 3D electronic modules by laser radiation. Doklady BGUIR. 2021; 19(3): 58-65.

Введение

Движущей тенденцией в микроэлектронике является стремление создавать все более сложные и функциональные изделия в меньшем пространстве подложки, платы или корпуса. Достигается это за счет максимальной миниатюризации компонентов и укорачивания межсоединений, повышения предельных рабочих частот и распараллеливания систем обработки информации в одном приборе, переходе от плоских к «трехмерным» структурам и т. д. Интеграция происходит в виде многокристальных модулей, систем 3D-интеграции или вертикальной системной интеграции (VSI), которая характеризуется высокой плотностью выводов, которые проходят через отверстия в кремниевых кристаллах [1].

Технология формирования отверстий в кремниевой подложке является сравнительно новой, но быстроразвивающейся и эффективной. Применение лазерного излучения для формирования таких отверстий дает возможность уменьшения диаметра до десятков микрометров, что повышает плотность элементов в 3D-электронных модулях. Выбор лазерной системы зависит от физико-механических свойств обрабатываемых материалов, таких как шероховатость и покрытие, а также от технических требований, предъявляемых к лазерной обработке. Результат взаимодействия лазерного излучения с материалами сильно зависит от поглощения материала на длине волны лазерного излучения, пиковой мощности лазера и длительности воздействия излучения [2]. С другой стороны, рост температуры в зоне воздействия приводит к разрушению материала, поэтому эффективность обработки зависит от плотности мощности лазера и длительности воздействия излучения. Кроме этого, увеличение длительности излучения приводит к значительному тепловому и деформационному влиянию на материал вне зоны облучения. Таким образом, выбор источника лазерного излучения для микрообработки является сложной задачей, для решения которой зачастую приходится принимать комплексное решение. Процесс лазерной прошивки требует не только достаточно

большой мощности излучения, но также обеспечение реза с ровными гладкими кромками. Для этого необходимо сфокусировать лазерный луч в малоразмерное пятно.

Важным параметром лазера при рассмотрении импульсного режима воздействия является длина волны излучения λ , которая определяет степень поглощения лазерной энергии обрабатываемой поверхностью. С увеличением длины волны отражательная способность большинства материалов возрастает. Это означает, что лазеры с большой длиной волны по сравнению с лазерами с малой длиной волны отличаются повышенным расходом энергии, т. е. должны быть более мощными. Данная статья посвящена моделированию тепловых полей при лазерной обработке кремниевых подложек и оптимизации параметров лазерного излучения для получения минимальной конусообразности отверстий в подложках.

Моделирование параметров лазерного излучения

Поглощение лазерного излучения твердым телом происходит на глубине его проникновения $\delta = 1/\alpha$ по закону Бугера – Ламберта [2]:

$$Q(x, y, z) = Q_0(1 - R_c) \cdot \frac{A_c}{\pi r^2} e^{-\left[\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2r^2}\right]} \cdot e^{-A_c z}, \quad (1)$$

где Q_0 – входная энергия лазера, R_c – коэффициент отражения, $A_c = 1 - R_c$ – коэффициент поглощения, r – радиус пятна лазера на поверхности подложки, x_0, y_0 – центр падающего луча лазера.

Для упрощения моделирования R_c и A_c для кремния считаются постоянными ($A_c = 0,15$ при длине волны лазерного излучения $\lambda = 10,64$ мкм [3]), температура плавления $T_{\text{пл-Si}} = 1415$ °С. Для моделирования импульсного лазера использованы следующие параметры: мощность лазера $P = 40$ Вт, длительность обработки $\tau_i = 1-5$ с, диаметр луча – 200 мкм, длина волны – 10,64 мкм. Параметры кремниевой пластины и источника лазерного излучения приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры кремниевой подложки и источника лазерного излучения
Table 1. Silicon wafer and laser source's parameters

Параметр Parameter	Значение Value
Радиус пластины Wafer radius	50 мм
Толщина пластины Wafer thickness	250 мкм
Удельная теплота испарения Specific heat of vaporization	13,68 кДж/г
Коэффициент отражения Reflection coefficient	0,3
Температура плавления Melting temperature	1415 °С
Плотность Density	2,33 г/см ³
Длина волны излучения Laser wavelength	10,64 мкм
Диаметр луча Beam diameter	0,2 мм
Длительность обработки Pulse duration	1–5 с
Мощность лазерного излучения Laser power	40 Вт

Моделированием температуры на поверхности кремния при лазерной обработке с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics получены зависимости температуры в зоне нагрева от времени воздействия излучения при различных начальных температурах подложки и мощности лазерного излучения (рис. 1) и ее распределение на поверхности

подложки и внутри отверстий. С повышением температуры подложки, средняя температура в зоне воздействия излучения достигала температуры плавления кремния быстрее на 10 %, чем при нормальном состоянии.

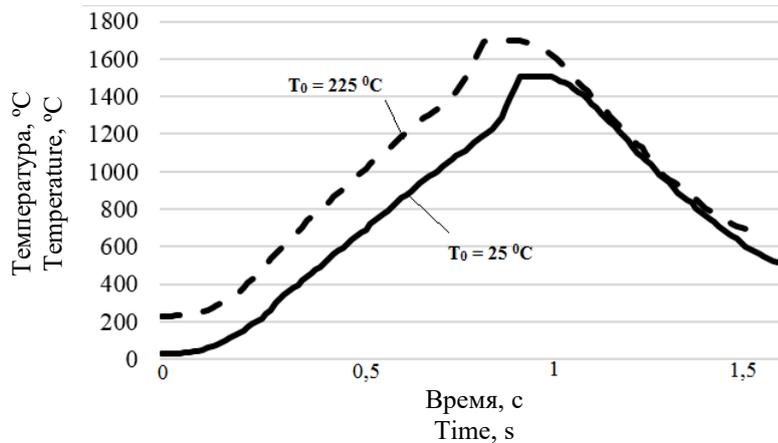


Рис. 1. Средняя температура в зоне воздействия излучения при комнатной температуре и повышенной температуре

Fig. 1. Average temperature in the area of exposure to radiation at room temperature and increased initial temperature

Для заключения об эффективности обработки необходимо учитывать, как влияет начальная температура на конусообразность отверстий. Конусообразность C – это отношение разности диаметров отверстий к толщине подложки, вычисляется по следующей формуле [4]:

$$C = \frac{D_{\text{вх}} - D_{\text{вых}}}{h}, \quad (2)$$

где $D_{\text{вх}}$ – входный диаметр отверстия, $D_{\text{вых}}$ – выходный диаметр отверстия, h – толщина подложки.

Конусообразность является универсальным параметром для оценки качества полученного отверстия в кремнии. Для качественного отверстия конусообразность C не должна превышать 0,1. Создание отверстия с таким значением C является серьезной технической задачей. Кроме того, снижение конусообразности отверстий увеличивает сложность процесса и время изготовления [5].

Выбор и применение процесса изготовления, а также определение достаточных по качеству отверстий TSV достигается моделированием. Компьютерное моделирование позволяет сократить время и ресурсы для получения оптимального режима обработки отверстий. Диаметр отверстия можно определить по тепловому контуру $T = 1415\text{ °C}$ с помощью 3D-модели в COMSOL Multiphysics (рис. 2) и вычислить конусообразность отверстий, полученную при различных температурах подложки (табл. 2).

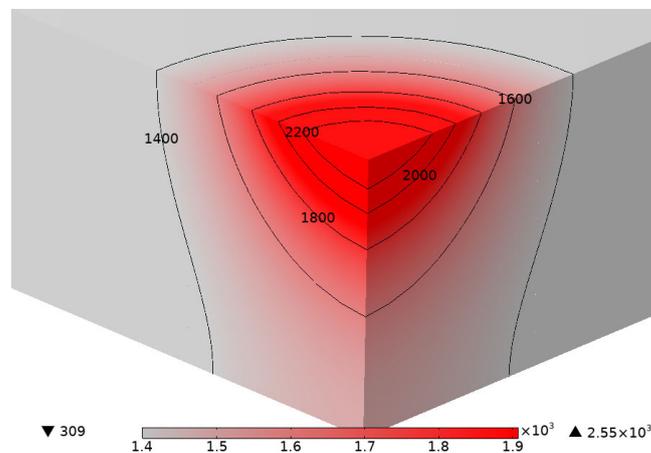


Рис. 2. Тепловое распределение внутри подложки
Fig. 2. Thermal distribution inside the substrate

Таблица 2. Параметры формирования отверстий в подложке
Table 2. Parameters of through-silicon-via formation

Время воздействия лазера, с Laser exposure time, s	Начальная температура, °C Initial temperature, °C	Входной диаметр, мкм Inlet diameter, μm	Выходной диаметр, мкм Outlet diameter, μm	Конусообразность Hole taper
1	25	225	140	0,34
	225	210	90	0,5
2	25	230	275	0,18
	225	190	250	0,24

В обоих случаях температура в области воздействия лазерного излучения достигала температуры плавления кремния в течение длительности излучения 1–2 с. В результате моделирования получены графики распределения температуры по расстоянию от центра излучения при воздействии излучения за 1 с (рис. 3) с различными начальными температурами T_0 .

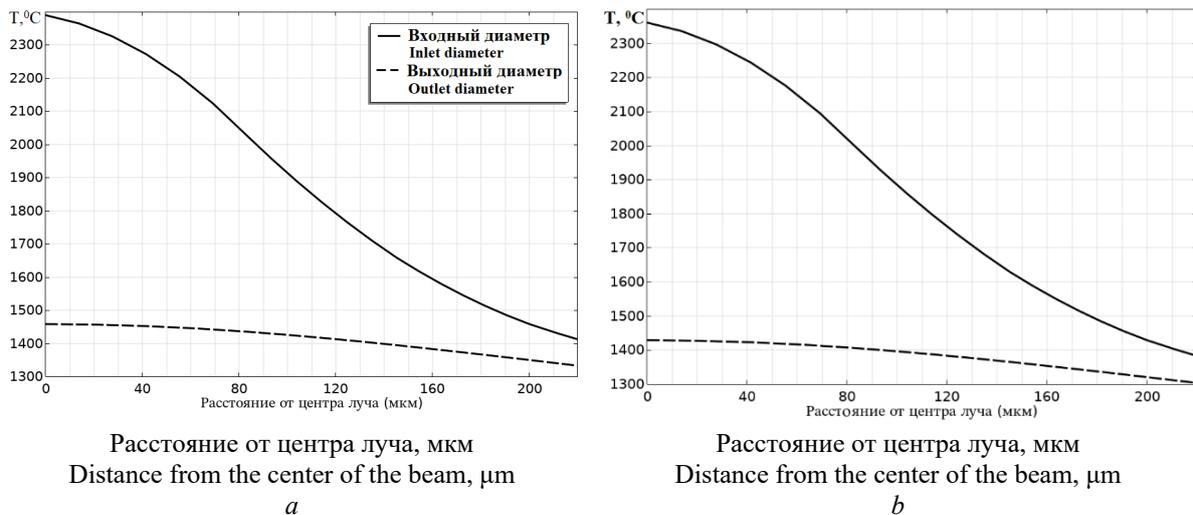


Рис. 3. Распределение температуры по расстоянию от центра излучения при воздействии излучения за 1 с: $a - T_0 = 25 \text{ °C}$; $b - T_0 = 225 \text{ °C}$

Fig. 3. Temperature distribution over distance from the center of radiation when radiating for 1 s: $a - T_0 = 25 \text{ °C}$; $b - T_0 = 225 \text{ °C}$

Поскольку при моделировании не учитывается удаление расплавленных материалов из отверстия в подложке, то процесс теплопередачи сильно зависит от тепла, переданного излучением в объект, не принимая во внимание прямое воздействие излучения на внутреннюю часть подложки. Если время воздействия достаточно мало (менее 2 с), то это не слишком влияет на результаты моделирования. При большем времени воздействия излучения (от 2,5 с и более) диаметры входного отверстия примерно на 35 % больше диаметра луча. В результате моделирования установлено, что если время воздействия излучения достаточно мало, то температура вне зоны нагрева практически не увеличивается, следовательно, тепло не передается по поверхности подложки.

Методика исследования

Устройство лазерной обработки состоит из лазерного источника с коллиматором выходного пучка, блока управления лазерным источником, оптической системы фокусировки и отклонения лазерного луча и координатной системы по осям X, Y, Z с установленным на ней образцом для обработки [5]. В качестве лазерного оборудования использован станок Yueming CMA0604-B-A (Китай), который оснащен поворотным устройством, механизмом автоматического подъема рабочего стола, газовым лазером (CO_2). Диаметр луча составлял 0,1 мм, мощность излучения – 40 Вт. Внешний вид лазерной головки и схема лазерной прошивки отверстий приведены на рис. 4.

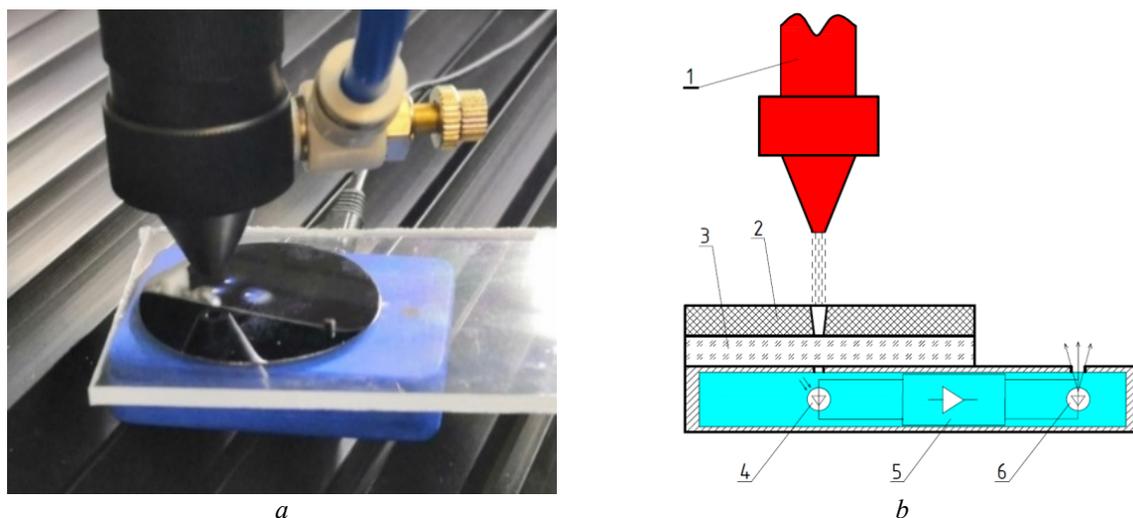


Рис. 4. Внешний вид (а) и схема (b) лазерной прошивки отверстий: 1 – лазер; 2 – кремниевая подложка; 3 – плексиглас; 4 – фотодиод; 5 – модуль усилителя; 6 – светодиод

Fig. 4. Appearance (a) and diagram (b) of laser hole piercing: 1 – laser; 2 – silicon substrate; 3 – plexiglass; 4 – photodiode; 5 – amplifier module; 6 – LED

Для контроля момента прохода излучения через подложку применен фотодиод, который через модуль усилителя подает сигнал на светодиод. Для определения размеров отверстий на кремневых пластинах использован USB-цифровой микроскоп Supereyes B008, который подключается к компьютеру. Для снижения разности температур между двумя сторонами подложки и исключения ее растрескивания в процессе прошивки, подложка в ряде опытов подогревалась до 200 °С.

Результаты исследований и их обсуждение

Получены экспериментальные данные диаметров отверстий в кремниевой подложке в зависимости от энергии лазерного излучения и начальной температуры подложки (табл. 3). На рис. 5 показаны зависимости конусообразности отверстий от времени воздействия излучения. В первом случае кремниевая подложка помещалась на резистивный нагреватель с подогревом до 200 °С, а во втором случае прошивка отверстий происходила при нормальных условиях.

Таблица 3. Результаты измерения диаметра отверстия
Table 3. Results of measuring the hole diameter

Время обработки, с Processing time, s	1		2	
Температура, °С Temperature, °C	25	200	25	200
Входный диаметр, мкм Inlet diameter, μm	218	297	207	340
Выходный диаметр, мкм Outlet diameter, μm	156	110	179	225
Конусообразность (экспериментальный результат) Hole taper (experimental result)	0,25	0,75	0,11	0,46
Конусообразность (моделирование) Hole taper (simulation)	0,34	0,5	0,18	0,24

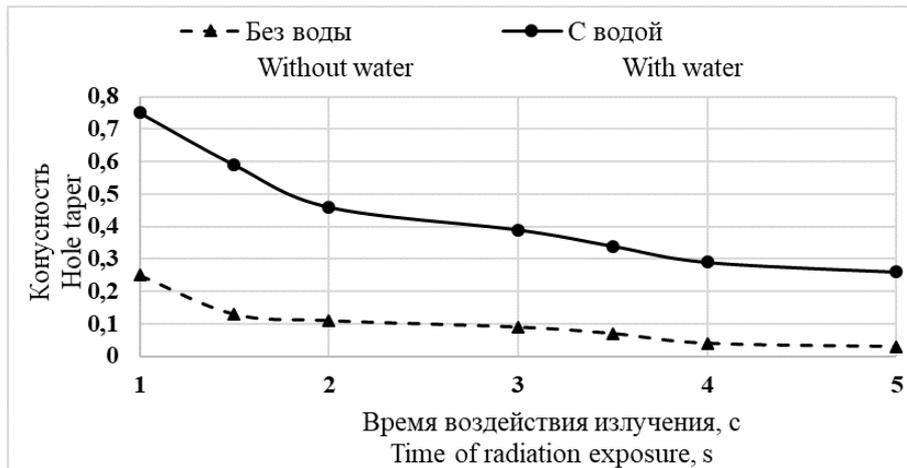


Рис. 5. Зависимости конусообразности отверстий от времени воздействия излучения
Fig. 5. Dependences of the taper of the holes on the time of exposure to radiation

Из экспериментальных результатов и моделирования можно сделать вывод, что с увеличением времени воздействия лазерного излучения коэффициент C уменьшается. Также можно сделать вывод, что при обработке кремниевой подложки с подогревом до 200 °С конусообразность отверстий в ней становится больше: при времени 1 с коэффициент C увеличивается в 3 раза и в 4,2 раза при обработке за 2 с. Однако при этом исключается растрескивание подложки из-за высокого градиента температур на ее лицевой и обратной сторонах.

При моделировании не учитываются все факторы, которые могут влиять на результат теплопередачи, например, удаление оплавленной части кремния, изменение коэффициента поглощения излучения материалом и динамический эффект лазерного излучения. Поэтому в данном случае появилось отклонение от экспериментального результата до 20 %. Однако компьютерное моделирование является достаточно эффективным средством для анализа и оптимизации параметров лазерного излучения для экспериментального применения.

С другой стороны, увеличение времени взаимодействия излучения приводит к увеличению диаметра входного отверстия за счет большей энергии излучения, что ухудшает соотношение размеров сквозных отверстий. Таким образом, оптимальным режимом формирования отверстий в кремнии является воздействие лазерного излучения длительностью 2 с при нормальной температуре.

Заключение

Лазерный нагрев является перспективным методом формирования отверстий в кремнии при сборке 3D-электронных модулей с высокой плотностью соединений из-за его высокой удельной энергии и способности локального нагрева. Моделированием тепловых полей в программном пакете COMSOL Multiphysics 5.6 при лазерной обработке кремниевых подложек определены параметры лазерного излучения для получения минимальной конусообразности отверстий в подложках 3D-электронных модулей. Оптимальная длительность воздействия лазерного излучения с длиной волны 10,64 мкм составляет не более 2 с при конусообразности отверстий 0,1–0,2. Результаты исследований показывают, что с увеличением длительности воздействия лазерного излучения соотношение диаметров входного к выходному отверстию растет. Для повышения качества отверстий необходимо учитывать такие параметры лазерного излучения, как его мощность, длину волны и режим работы.

Список литературы

1. Мухина Е., Башта П. 3D-сборка: технология сквозных отверстий в кремнии. *Электроника, Наука, Технология, Бизнес*. 2009;2:92-93.
2. Вакс Е.Д., Миленький М.Н., Сапрыкин Л.Г. *Практика прецизионной лазерной обработки*. Москва: Техносфера; 2013.
3. Вейко В.П., Либензон М.Н., Червяков Г.Г. *Взаимодействие лазерного излучения с веществом*. Москва: Физматлит; 2008.
4. Ланин В.Л., Фам В.Т., Чан Н.Д. Лазерное формирование отверстий в неметаллических подложках. *Электронная обработка материалов*. 2020;56(1);76-83.
5. Григорьянц А.Г., Жиганов И.И., Мискоров А.И. *Технологические процессы лазерной обработки*. Москва: Изд-во МГТУ им. И. Э. Баумана; 2006.

References

1. Mukhina E., Bashta P. [3D assembly: through-hole technology in silicon]. *Electronics, Science, Technology, Business*. 2009;2:92-93. (In Russ.)
2. Vaks E.D., Milenky M.N., Saprykin L.G. [*Practice of precision laser processing*]. Moscow: Technosphaera; 2013. (In Russ.)
3. Veiko V.P., Libenzon M.N., Chervyakov G.G. [*Interaction of laser radiation with matter*]. Moscow: Fizmatlit; 2008. (In Russ.)
4. Lanin V.L., Pham V.T., Tran N.D. [Laser formation of holes in non-metallic substrates]. *Electronic material processing*. 2020;56(1);76-83. (In Russ.)
5. Grigoryants A.G., Zhiganov I.I., Miskorov A.I. [*Technological processes of laser processing*]. Moscow: Publishing house of MSTU im. I. E. Bauman; 2006. (In Russ.)

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

Authors' contribution

All authors equally contributed to the writing of the article.

Сведения об авторах

Ланин В.Л., д.т.н., профессор, профессор кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Фам В.Т., магистрант кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Лаппо А.И., аспирант кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Lanin V.L. D.Sc., Professor, Professor at the Electronic Engineering and Technology Department of the Belarus State University of Informatics and Radioelectronics.

Fam V.T., Undergraduate student at the Electronic Engineering and Technology Department of the Belarusian State University of of Informatics and Radioelectronics.

Lappo A.I., Postgraduate student at the Electronic Engineering and Technology Department of the Belarusian State University of of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-29-757-28-23;
e-mail: vlanin@bsuir.by
Ланин Владимир Леонидович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-29-757-28-23;
e-mail: vlanin@bsuir.by
Lanin Vladimir Leonidovich