



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-7-79-86>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.78.014.5

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН ПРИ БЫСТРОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ НА УСТАНОВКЕ «УБТО 1801»

СОЛОВЬЁВ Я.А.<sup>1</sup>, ПИЛИПЕНКО В.А.<sup>1</sup>, ЯКОВЛЕВ В.П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Республика Беларусь)

<sup>2</sup>ООО «Перспективные инновационные технологии» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 14 октября 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

**Аннотация.** Настоящая работа посвящена установлению зависимости температуры нагрева кремниевой пластины при быстрой термической обработке на установке «УБТО 1801» облучением обратной стороны некогерентным потоком света постоянной плотности от мощности ламп и времени нагрева. В результате разработана математическая модель изменения температуры пластины на базе уравнения нестационарной теплопроводности и известных температурных зависимостей теплофизических свойств кремния и степени черноты алюминия и серебра, нанесенных на рабочую поверхность кремниевой пластины. Для экспериментального определения значений численных параметров математической модели кремниевые пластины нагревали единичным импульсом света постоянной мощности до температуры одного из трех фазовых переходов формирования эвтектики алюминий-кремний, плавления алюминия и плавления серебра. Время формирования фазового перехода на поверхности пластин в процессе быстрой термообработки фиксировали пирометрическим методом. В соответствии с разработанной математической моделью определен коэффициент преобразования электрической мощности ламп в плотность мощности светового потока, численное значение которого составило  $5,16 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ . Изменение мощности ламп от 690 до 2740 Вт приводит к изменению температуры кремниевой пластины в процессе быстрой термической обработки от 550 до 930°К соответственно. При этом погрешность прогнозирования температуры пластины в соответствии с разработанной математической моделью составляет менее 2,3 %. Результаты работы могут быть использованы при разработке новых процессов быстрой термообработки кремниевых пластин.

**Ключевые слова:** быстрая термическая обработка, температура нагрева, математическое моделирование, фазовый переход.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарности.** Авторы признательны Хлопкову Н.С., Гринцевичу Е.В., Сарычеву О.Э. за помощь в проведении экспериментальных исследований.

**Для цитирования.** Соловьёв Я.А., Пилипенко В.А., Яковлев В.П. Моделирование нагрева кремниевых пластин при быстрой термической обработке на установке «УБТО 1801». Доклады БГУИР. 2020; 18(7): 79-86.

## SIMULATION OF SILICON WAFERS HEATING DURING RAPID THERMAL PROCESSING USING “UBTO 1801” UNIT

JAROSLAV A. SOLOVJOV<sup>1</sup>, VLADIMIR A. PILIPENKO<sup>1</sup>, VALERY P. YAKOVLEV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC “INTEGRAL” – “NTEGRAL” holding managing company (Minsk, Republic of Belarus)

<sup>2</sup>LLC “Prospective innovation technologies” (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 14 October 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

**Abstract.** The present work is devoted to determination of the dependence of the heating temperature of the silicon wafer on the lamps power and the heating time during rapid thermal processing using “UBTO 1801” unit by irradiating the wafer backside with an incoherent flow of constant density light. As a result, a mathematical model of silicon wafer temperature variation was developed on the basis of the equation of non-stationary thermal conductivity and known temperature dependencies of the thermophysical properties of silicon and the emissivity of aluminum and silver applied to the planar surface of the silicon wafer. For experimental determination of the numerical parameters of the mathematical model, silicon wafers were heated with light single pulse of constant power to the temperature of one of three phase transitions such as aluminum-silicon eutectic formation, aluminum melting and silver melting. The time of phase transition formation on the wafer surface during rapid thermal processing was fixed by pyrometric method. In accordance with the developed mathematical model, we determined the conversion coefficient of the lamps electric power to the light flux power density with the numerical value of  $5.16 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-2}$ . Increasing the lamps power from 690 to 2740 W leads to an increase in the silicon wafer temperature during rapid thermal processing from 550° to 930°K, respectively. With that, the wafer temperature prediction error in compliance with developed mathematical model makes less than 2.3 %. The work results can be used when developing new procedures of rapid thermal processing for silicon wafers.

**Keywords:** : rapid thermal processing, heating temperature, mathematical simulation, phase transition.

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

**Gratitude.** The authors are grateful to Khlopkov N.S., Grintsevich E.V., Sarychev O.E. for the assistance in performing the experiment.

**For citation.** Solovjov J.A., Pilipenko V.A., Yakovlev V.P. Simulation of silicon wafers heating during rapid thermal processing using “UBTO 1801” unit. Doklady BGUIR. 2020; 18(7): 79-86.

### Введение

Быстрая термическая обработка (БТО) кремниевых пластин является одной из ключевых операций в полупроводниковой технологии, значение которой возрастает одновременно с уменьшением размеров элементов интегральных схем [1]. Преимущества БТО перед стационарными тепловыми обработками реализуются благодаря исключительно чистым условиям выполнения процесса в реакторе ограниченного объема, а также минимальному термальному бюджету технологических процессов. Самым распространенным способом БТО является нагрев пластин до заданной температуры некогерентным световым излучением кварцевых галогенных ламп импульсами секундной длительности, который реализует режим теплового баланса, т. е. обеспечивается однородное распределение температуры по объему пластины [2]. Однако в процессе обработки кремниевых пластин с приборными структурами на рабочей стороне формируются слои с различными коэффициентами поглощения и отражения светового потока. Кроме того, механизм поглощения светового излучения кремнием определяется его типом проводимости и уровнем легирования, что создает дополнительные неоднородности поглощения светового потока [3]. Наличие различного рода оптических неоднородностей в процессе БТО облучением с рабочей стороны кремниевой пластины

приводит к возникновению градиентов температуры между ними, а значит, к образованию различных структурных дефектов в кремнии, растрескиванию и отслаиванию пленок диэлектриков и металлов, вызывая полную деградацию формируемых полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.

Для исключения данных явлений БТО целесообразно проводить с нерабочей стороны пластины, поскольку в этом случае имеет место облучение оптически однородной поверхности и разброс по площади пластины будет определяться только геометрическими размерами камеры [4]. Схема БТО путем облучения кремниевых пластин с обратной стороны некогерентным световым потоком кварцевых галогенных ламп реализована в установке «УБТО 1801», в которой нагрев пластин осуществляется световым импульсом прямоугольной формы с задаваемой мощностью и длительностью. При этом за счет конструктивных параметров камеры неравномерность нагрева пластины не превышает 0,4 %. В процессе БТО контроль температуры рабочей стороны пластины осуществляется с помощью пирометра «Термоскоп-600-1С» и платино-родиевой термопары ТП-0188/2-1-ПП(S) [5].

Однако как термопарный, так и пирометрический контроль температуры поверхности кремниевых пластин при БТО в данных условиях нагрева имеют соответствующие ограничения. На показания термопары существенное влияние оказывает искажение температурного поля пластины в зоне их контакта [6], а также ее тепловая инерция [7]. Пирометрический контроль ограничен нижним порогом чувствительности пирометра, необходимостью учета степени черноты контролируемой поверхности пластины, определяемой материалом покрытия и температурной зависимостью степени его черноты, а также фазовыми изменениями в материале покрытия, также приводящими к скачкообразному изменению его степени черноты [1, 7].

Таким образом, с целью улучшения управляемости процесса нагрева БТО кремниевых пластин в части обеспечения заданных температурно-временных режимов, а также точности контроля температуры поверхности пластины необходимо установить зависимость температуры пластины от электрической мощности ламп и времени процесса.

Настоящая работа посвящена установлению зависимости температуры нагрева кремниевой пластины при БТО на установке «УБТО 1801» облучением обратной стороны некогерентным потоком света постоянной плотности от мощности ламп и времени нагрева.

### Постановка задачи

Для процесса нагрева высоколегированной кремниевой пластины световыми импульсами в режиме теплового баланса справедливы следующие допущения [2]:

- температура равномерно распределена по объему пластины;
- тепло выделяется в тонком приповерхностном слое;
- пластина теплоизолирована от подложкодержателя;
- имеют место тепловые потери от поверхности пластины;
- мощность светового импульса постоянна во времени,
- для расчета распространения тепла использовались закономерности нестационарной теплопроводности.

Для данных допущений зависимость температуры кремниевой пластины при БТО описывается уравнением теплопроводности [1, 2]:

$$\rho ch \frac{dT}{dt} = (1 - R) \eta_{el} P_{el} - 2\varepsilon_{Si} \sigma (T^4 - T_{amb}^4), \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность кремния,  $\text{г}\cdot\text{см}^{-3}$ ;  $c$  – удельная теплоемкость кремния,  $\text{Дж}\cdot\text{г}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ ;  $h$  – толщина кремниевой пластины,  $\text{см}$ ;  $T$  – температура пластины,  $\text{К}$ ;  $t$  – время нагрева,  $\text{с}$ ;  $R$  – коэффициент отражения инфракрасного (ИК) излучения ламп от поверхности нагреваемой пластины, являющийся постоянным и равный 0,3;  $P_{el}$  – электрическая мощность ИК ламп,  $\text{Вт}$ ;  $\eta_{el}$  – коэффициент преобразования электрической мощности ламп нагрева в плотность мощности светового потока,  $\text{см}^2$ ;  $\varepsilon_{Si}$  – степень черноты кремния, являющаяся постоянной и равная 0,7;  $\sigma$  – постоянная Стефана–Больцмана, равная  $5,67\cdot 10^{-12}$ ,  $\text{Вт}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{К}^{-4}$ ;  $T_{amb}$  – температура стенок камеры,  $\text{К}$ .

Таким образом, для математического моделирования температуры нагрева пластины должно быть установлено численное значение параметра  $\eta_{el}$ .

### Методика проведения эксперимента

С целью определения температуры пластины использовали известные температуры фазовых переходов: образование эвтектики алюминий-кремний – 850,2 К, плавление алюминия – 933,5 К и плавление серебра – 1235,1 К. Для этого на рабочую сторону высоколегированной пластины марки КЭМ 0,003 (111) толщиной  $460 \pm 10$  мкм с полированной и шлифовано-травленной обратной стороной наносили тонкие пленки алюминия и серебра. Во избежание формирования эвтектики алюминий-кремний при получении точки плавления алюминия перед его нанесением на рабочей поверхности кремниевой пластины формировали слой  $\text{SiO}_2$  толщиной порядка 0,1 мкм.

Далее пластины нагревали в камере установки «УБТО 1801» при заданной мощности ИК ламп. Величину мощности ламп подбирали таким образом, чтобы время нагрева до фазового перехода не превышало 40 с. Момент фазового перехода фиксировался по изменению показаний пирометра. Численные значения потребляемой мощности ИК ламп и показаний пирометра «Термоскоп-600-1С» фиксировали системой управления установкой с дискретностью времени  $\Delta t = 96$  мс.

Численное интегрирование уравнения (1) с учетом материала покрытия рабочей стороны пластины выполняли в соответствии с выражением

$$T = T_0 + \sum_{i=1}^n \frac{\left[ (1-R)\eta_{el}P_{el} - (\varepsilon_{Si} + \varepsilon_{Me}(T_{i-1}))\sigma(T_{i-1}^4 - T_{amb}^4) \right] \Delta t}{\rho(T_{i-1})c(T_{i-1})h}, \quad (2)$$

где  $T_0$  – начальная температура пластины;  $n$  – количество интервалов нагрева длительностью  $\Delta t$ ;  $\varepsilon_{Me}$  – степень черноты материала покрытия рабочей стороны пластины. Величину начальной температуры пластины  $T_0$  контролировали штатной термопарой ТП-0188/2-1-ПП(S), температуру стенок камеры  $T_{amb}$  принимали равной температуре охлаждающей воды на выходе и контролировали встроенным датчиком типа ДТС 054-Pt100.B2.60/0,2.

Численное значение плотности кремния при изменении температуры рассчитывали по общепринятой формуле

$$\rho(T) = \rho_0 \left[ 1 - 3\alpha(T)(T - T_0) \right], \quad (3)$$

где  $\rho_0 = 2,33$ , г·см<sup>-3</sup> – плотность кремния при температуре  $T_0$ ;  $\alpha(T)$  – зависимость термического коэффициента линейного расширения кремния от температуры пластины.

Величину  $\alpha(T)$ , в свою очередь, определяли на основании справочных данных [8] в диапазоне температур от 300 до 1400 К и аппроксимировали полиномом четвертой степени:

$$\alpha(T) = -4,29 \cdot 10^{-19} T^4 + 1,6 \cdot 10^{-14} T^3 - 2,21 \cdot 10^{-11} T^2 + 1,56 \cdot 10^{-8} T - 5,91 \cdot 10^{-7}. \quad (4)$$

Зависимость  $c(T)$  в диапазоне температур от 300 до 1400 К определяли на основании справочных данных [8] и аппроксимировали полиномом четвертой степени:

$$c(T) = -8,62 \cdot 10^{-13} T^4 + 3,41 \cdot 10^{-9} T^3 - 4,85 \cdot 10^{-6} T^2 + 3,10 \cdot 10^{-3} T + 1,32 \cdot 10^{-1}. \quad (5)$$

Для алюминиевого покрытия рабочей стороны пластины численное значение  $\varepsilon_{Me}(T)$  на основании справочных данных [9] определяли из выражения

$$\varepsilon_{Me}(T) = 5,14 \cdot 10^{-5} T + 1,31 \cdot 10^{-2}. \quad (6)$$

В случае покрытия рабочей стороны пластины из серебра величину  $\varepsilon_{Me}(T)$  на основании справочных данных [9] определяли по формуле

$$\varepsilon_{Me}(T) = 2,50 \cdot 10^{-5} T + 7,42 \cdot 10^{-2}. \quad (7)$$

Решение уравнения (2) относительно параметра  $\eta_{el}$  осуществляли итерационным методом путем подстановки вместо параметра  $T$  известной температуры соответствующего фазового перехода материала покрытия рабочей стороны кремниевой пластины, а вместо параметра  $n$  – номера интервала нагрева, после которого был зафиксирован фазовый переход.

### Результаты и их обсуждение

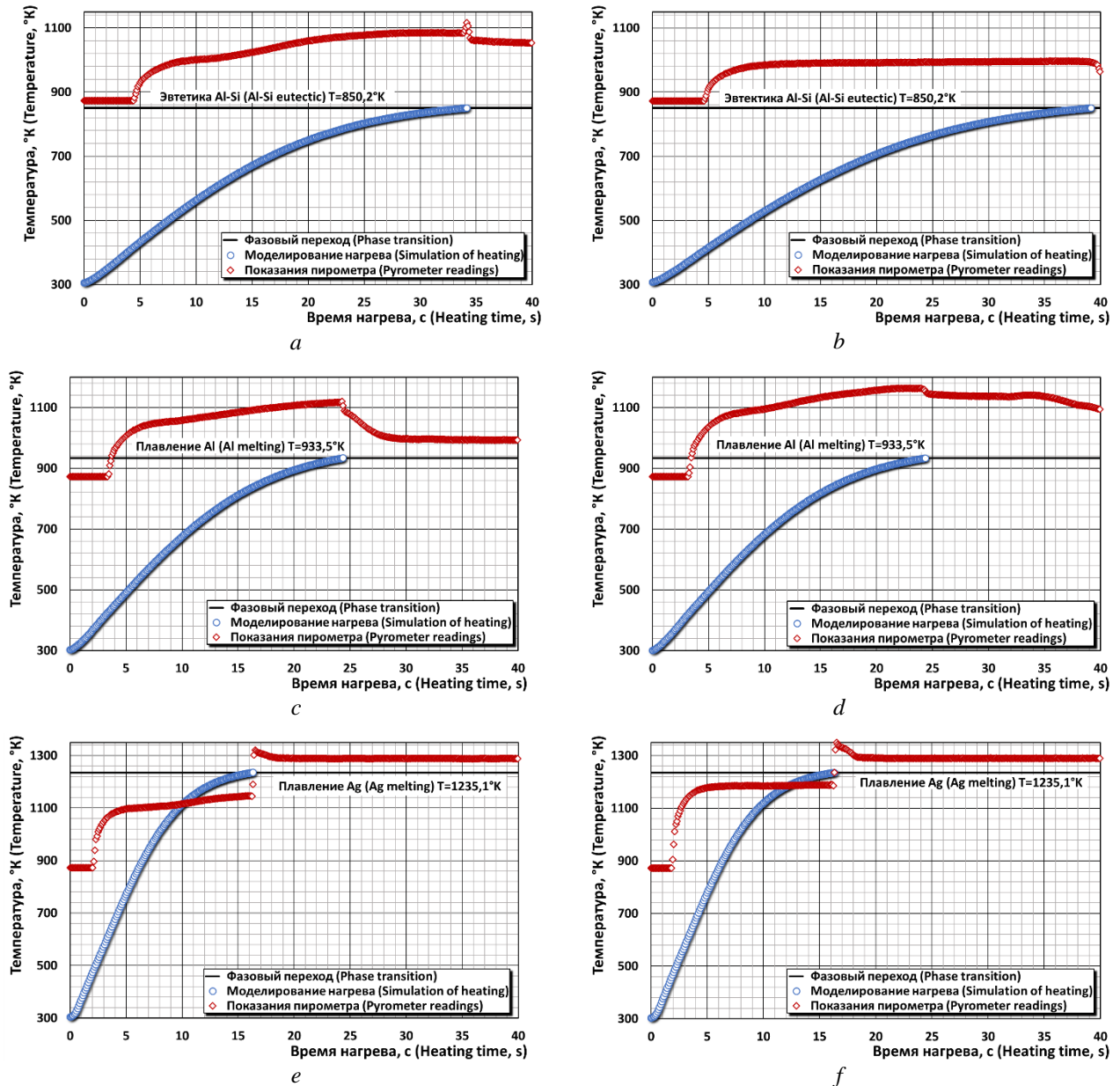
Анализ динамики нагрева пластин в зависимости от электрической мощности ИК ламп (табл. 1, рис. 1, *a – f*) показывает, что в диапазоне средней потребляемой мощности от 690 до 2740 Вт происходит нагрев пластин на величину от 550 до 930 К соответственно. При этом по показаниям пирометра «Термоскоп-600-1С» (рис. 1, *a – f*) четко фиксируется момент начала фазового перехода. Средняя величина параметра  $\eta_{el}$  составила  $5,16 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ . Следовательно, в исследуемом диапазоне условий проведения процесса БТО ее максимальный разброс не превышает  $\pm 4,0 \%$ , что может быть обусловлено дисперсией коэффициента отражения нерабочей поверхности пластины, колебаниями мощности нагрева, а также незначительными отклонениями от расчетных значений степени черноты кремния и покрытий, связанных с состоянием поверхности. Полученная величина разброса параметра  $\eta_{el}$ , в свою очередь, приводит к погрешности прогнозирования температуры пластины. Соответствующие расчеты согласно формуле (2) показывают, что при нагреве пластины на 550 К погрешность не превышает 2,3 %, а при нагреве пластины на 930 К – не превышает 2,0 %.

**Таблица 1.** Результаты расчета параметра  $\eta_{el}$   
**Table 1.** Results of  $\eta_{el}$  parameter calculation

Температура фазового перехода, К Phase transition temperature, K	Тип обратной стороны пластины Wafer backside type	Средняя электрическая мощность ИК ламп, Вт Average electric power of IR lamps, W	Время нагрева, с Heating time, s	Значение параметра $\eta_{el}$ , $10^{-3} \text{ см}^2$ Value of $\eta_{el}$ parameter, $10^{-3} \text{ cm}^2$
850,2	полированная (polished)	690,6	34,176	4,93
	шлифовано-травленная (rough)	694,7	39,168	5,04
933,5	полированная (polished)	1015,0	24,384	5,18
	шлифовано-травленная (rough)	1014,6	24,384	5,06
1235,1	полированная (polished)	2579,4	16,320	5,40
	шлифовано-травленная (rough)	2577,3	16,320	5,36

Таким образом, для численного расчета температуры нагрева БТО высоколегированной кремниевой пластины без покрытий на установке «УБТО 1801» целесообразно использовать следующую формулу:

$$T = T_0 + \sum_{i=1}^n \frac{[5,16 \cdot 10^{-3} (1 - R) P_{el} - 2\varepsilon_{Si} \sigma (T_{i-1}^4 - T_{amb}^4)] \Delta t}{\rho(T_{i-1}) c(T_{i-1}) h} \quad (8)$$



**Рис. 1.** Результаты моделирования нагрева пластин БТО до температуры фазового перехода:  
*a, b* – эвтектика Al-Si; *c, d* – плавление Al; *e, f* – плавление Ag; *a, c, e* – полированная обратная сторона;  
*b, d, f* – шлифовано-травленная обратная сторона  
**Fig. 1.** Simulation results for wafers RTP heating up to phase transition temperature: *a, b* – Al-Si eutectic;  
*c, d* – Al melting; *e, f* – Ag melting; *a, c, e* – polished backside; *b, d, f* – rough backside

Для численного расчета температуры нагрева БТО высоколегированной кремниевой пластины с покрытием рабочей стороны справедлива формула (2) с использованием установленного численного значения параметра  $\eta_{el}$ :

$$T = T_0 + \sum_{i=1}^n \frac{[5,16 \cdot 10^{-3} (1-R) P_{el} - (\varepsilon_{Si} + \varepsilon_{Me} (T_{i-1})) \sigma (T_{i-1}^4 - T_{amb}^4)] \Delta t}{\rho(T_{i-1}) c(T_{i-1}) h} \quad (9)$$

## Заключение

Установлены закономерности изменения температуры высоколегированной кремниевой пластины при БТО облучением обратной стороны некогерентным потоком света кварцевых галогенных ламп от мощности ИК ламп и времени нагрева в установке «УБТО 1801».

Путем фиксации пирометрическим методом времени нагрева пластины до температур фазовых переходов эвтектики Al-Si, плавления Al и плавления Ag при БТО импульсом постоянной мощности на базе уравнения нестационарной теплопроводности и известных температурных зависимостей степени черноты алюминия и серебра определен коэффициент преобразования электрической мощности ИК ламп в плотность мощности светового потока, численное значение которого составило  $5,16 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-2}$ . При изменении температуры кремниевой пластины в процессе БТО в диапазоне от 550 до 930 К погрешность ее прогнозирования в соответствии с разработанной математической моделью составляет менее 2,3 %.

Результаты работы могут быть использованы при разработке новых процессов БТО кремниевых пластин.

## Список литературы

1. Doering R., Nishi Y. *Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology. 2nd edition.* New York: CRC Press; 2008.
2. Пилипенко В.А. *Быстрые термообработки в технологии СБИС.* Минск: Изд. Центр БГУ; 2004.
3. Nesmelova I.M., Astaf'ev N.I., Kulakova N.A. The optical properties of single-crystal silicon in the 3–5- $\mu\text{m}$  region. *Journal of Optical technology.* 2012;79(3):191-193. DOI:10.1364/jot.79.00019.
4. Достанко А.П., Аваков С.М., Голосов Д.А., Емельянов В.В., Завадский С.М., Колос В.В., Ланин В.Л., Мадвейко С.И., Мельников С.Н., Никитюк Ю.В., Петлицкий А.Н., Петухов И.Б., Пилипенко В.А., Плебанович В.И., Солодуха В.А., Соколов С.И., Телеш Е.В., Шершнев Е.Б. *Инновационные технологии и оборудование микроэлектронного производства.* Минск: Беларуская навука; 2020.
5. Солодуха В.А., Пилипенко В.А., Яковлев В.П. Роботизированная установка быстрой термической обработки для создания изделий электронной техники. *Доклады БГУИР.* 2019;17(4):92-97.
6. Резников А.Н., Резников Л.А. *Тепловые процессы в технологических системах.* С.-Петербург: Лань, 2016.
7. Rozenboom F. *Advanced in Rapid Thermal and Integrated Processing.* Springer Netherlands; 1996.
8. Шелудяк Ю.Е., Кашпоров Л.Я., Малинин Л.А., Цалков В.Н. *Теплофизические свойства компонентов горючих систем.* Москва: НПО «Информ ТЭИ»; 1992.
9. Avallone E.A., Baumeister T., Sadegh A.M. *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers. 11th edition.* New York: McGraw-Hill; 2007.

## References

1. Doering R., Nishi Y. *Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology. 2nd edition.* New York: CRC Press; 2008.
2. Pilipenko V.A. [Bystrye termoobrabotki v tehnologii SBIS]. Minsk: Izd. centr BGU; 2004. (In Russ.)
3. Nesmelova I.M., Astaf'ev N.I., Kulakova N.A. The optical properties of single-crystal silicon in the 3–5- $\mu\text{m}$  region. *Journal of Optical technology.* 2012;79(3):191-193. DOI:10.1364/jot.79.00019.
4. Dostanko A.P., Avakov S.M., Golosov D.A., Emel'yanov V.V., Zavatsky S.M., Kolos V.V., Lanin V.L., Madveyko S.I., Mel'nikov S.N., Nikityuk Y.V., Petlitsky A.N., Petukhov I.B., Pilipenko V.A., Plebanovich V.I., Solodukha V.A., Sokolov S.I., Telesh E.V., Shershnev E.B. [Innovatsionnye tehnologii i oborudovanie mikroelektronnogo proizvodstva]. Minsk: Belarusskaya navuka; 2020. (In Russ.)
5. Solodukha V.A., Pilipenko V.A., Yakovlev V.P. [Rapid thermal treatment robotics unit for creation of electronic equipment devices]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR.* 2019;17(4):92-97. (In Russ.)
6. Reznikov A.N., Reznikov L.A. [Teplovye protsessy v tehnologicheskikh sistemah]. St.-Petersburg: Lan', 2016. (In Russ.)
7. Rozenboom F. *Advanced in Rapid Thermal and Integrated Processing.* Springer Netherlands; 1996.
8. Sheludjak Y.E., Kashporov L.Y., Malinin L.A., Tsalkov V.N. [Teplofizicheskie svoystva komponentov gorjuchih system]. Moscow: NPO "Iform TEI"; 1992. (In Russ.)
9. Avallone E.A., Baumeister T., Sadegh A.M. *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers. 11th edition.* New York: McGraw-Hill; 2007.

### Вклад авторов

Соловьёв Я.А. осуществил постановку задачи, выполнил анализ и интерпретацию результатов.

Пилипенко В.А. выполнил анализ и интерпретацию результатов.

Яковлев В.П. осуществил проведение эксперимента.

### Authors' contribution

Solovjov J.A. carried out the statement of the problem, fulfilled the analysis and interpreted the results.

Pilipenko V.A. fulfilled the analysis and interpreted the results.

Yakovlev V.P. carried out the experiment.

### Сведения об авторах

Соловьёв Я.А., к.т.н., доцент, заместитель директора Филиала «Транзистор» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Пилипенко В.А., д.т.н., профессор, чл.-кор. Национальной академии наук Беларуси, заместитель директора по научному развитию ГЦ «Белмикро-анализ» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Яковлев В.П., к.т.н., директор ООО «Перспективные инновационные технологии».

### Адрес для корреспонденции

220108, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. Корженевского, 16,  
Филиал «Транзистор» ОАО «ИНТЕГРАЛ» –  
управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»  
тел. +375-17-212-21-21;  
e-mail: jsolovjov@integral.by  
Соловьёв Ярослав Александрович

### Information about the authors

Solovjov J.A., PhD, Associate Professor, Deputy director of “Transistor” Branch JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” holding managing company.

Pilipenko V.A., D.Sci, Professor, Corr. mem. of the National Academy of Sciences of Belarus, Deputy director of Science Development of State Center “Belmicroanalysis”, JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” holding managing company.

Yakovlev V.P., PhD, Director of LLC “Prospective innovation technologies”.

### Address for correspondence

220108, Republic of Belarus,  
Minsk, Korzhenevskogo str., 16,  
“Transistor” Branch of JSC “INTEGRAL” –  
“INTEGRAL” holding managing company  
tel. +375-17-212-21-21;  
e-mail: jsolovjov@integral.by  
Solovjov Jaroslav Aleksandrovich