

*К. Н. Нищев, М. И. Новопольцев,
В. И. Беглов, М. А. Окин, Е. Н. Лютова*

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОЕВ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ВСПЫШКИ¹

Аннотация.

Актуальность и цели. Одной из ключевых задач силовой электроники является обеспечение эффективного теплоотвода в силовых полупроводниковых приборах (СПП). Эффективность теплоотвода в СПП существенно зависит от теплопроводности тонких металлических слоев, входящих в состав межэлементных соединений прибора. Целью исследования является разработка методики измерения коэффициента температуропроводности тонких металлических слоев, применяемых в технологиях производства СПП, методом лазерной вспышки с использованием стандартной аппаратуры.

Материалы и методы. Метод лазерной вспышки (метод Паркера) использовался для измерения коэффициента температуропроводности тонких слоев меди и алюминия, а также тонких спеченных слоев серебрясодержащей пасты.

Результаты. Предложена методика измерения коэффициента температуропроводности тонких металлических слоев методом лазерной вспышки, основанная на формировании в исследуемых слоях радиальных тепловых потоков, направленных от периферии к центру образца. Проведено математическое моделирование процессов теплопереноса в данной геометрии. С использованием установки LFA 427 (NETZSCH) определены коэффициенты температуропроводности исследуемых тонких металлических слоев.

Выводы. Из полученных результатов следует, что для корректного измерения коэффициента температуропроводности тонких металлических слоев методом лазерной вспышки, в отличие от стандартного метода Паркера, необходимо в исследуемых слоях формировать радиальные тепловые потоки, направленные к центру образца. Корректность предложенной методики подтверждена соответствием результатов измерений коэффициента температуропроводности тонких образцов меди и алюминия табличным данным. Определен коэффициент температуропроводности тонких спеченных слоев серебрясодержащей пасты, применяемых в межэлементных соединениях СПП.

Ключевые слова: силовые полупроводниковые приборы, тонкие металлические слои, теплопроводность, температуропроводность, метод лазерной вспышки.

*K. N. Nishchev, M. I. Novopol'tsev,
V. I. Beglov, M. A. Okin, E. N. Lyutova*

MEASUREMENT OF TEMPERATURE CONDUCTIVITY OF THIN METAL LAYERS BY LASER FLASH METHOD

¹ Работа выполнена в Мордовском государственном университете им. Н. П. Огарева в рамках договора № 02.G25.31.0051 между ОАО «Электровыпрямитель» и Министерством образования и науки Российской Федерации об условиях предоставления и использования субсидии на реализацию комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием российского высшего учебного заведения.

Abstract.

Background. One of the key targets of power electronics is to provide an efficient heat removal in power semiconductor devices (PSD). The heat removal efficiency in PSD is significantly dependent on thermal conductivity of thin metal layers that are part of inter-cell connections of a device. Concerning this, it is of great significance to find methods of accurate measuring of temperature conductivity in these layers. The aim of the study is to develop a method of measuring temperature conductivity of thin metal layers in PSD production technologies, based on the laser flash method with the use of regular equipment.

Materials and methods. The laser flash method (Parker method) was used to measure the temperature conductivity of copper and aluminum thin layers and, then, thin sintered layers of silver paste as well.

Results. The paper describes the procedure of measuring by the laser flash method; the procedure is based on radial heat flows formed in thin metal layers that extend from the periphery to the centre of the sample. Mathematical modeling of heat transfer processes is presented. Using the setup LFA 427 (NETZSCH) the authors have determined coefficients of temperature conductivity of thin metal layers.

Conclusions. The findings show that for accurate measurement of temperature conductivity in thin metal layers using a laser flash, unlike the standard Parker method, it is necessary to generate radial heat flows that extend to the centre of the sample in those layers. The reliability of the proposed methodology is proven by conformity of temperature conductivity results, obtained from measuring copper and aluminum samples, to look-up tables. The temperature conductivity of a thin sintered layer of silver paste, used in inter-cell connections of PSD, is calculated.

Key words: power semiconductor devices, thin metal layers, thermal conductivity, temperature conductivity, laser flash.

Введение

Одной из важнейших проблем силовой электроники является обеспечение эффективного теплоотвода в силовых полупроводниковых приборах (СПП) [1, 2]. Традиционный способ решения проблемы заключается в создании надежного, механически прочного и обладающего высокой теплопроводностью соединения электрически активной полупроводниковой структуры с теплоотводящей металлической подложкой. Эффективность теплоотвода в СПП зависит не только от теплопроводности подложки, но и от величины теплового сопротивления соединения полупроводниковой структуры с теплоотводящей подложкой.

При изготовлении мощных СПП наряду с традиционной технологией сплавания функциональных элементов с использованием высокотемпературных припоев [3] используется технология низкотемпературного спекания тонких слоев серебросодержащих паст (Low-Temperature Joint Technique – LTJT) [4–6]. Спеченные соединительные слои серебросодержащей пасты (СП) при их малой толщине (~ 20–100 мкм) обладают высокой теплопроводностью [7], сравнимой с теплопроводностью массивного серебра (418 Вт/м·К [8]). Теплопроводность таких слоев не может быть точно определена с использованием стандартных методик. Поэтому актуальной задачей является разработка специальной методики определения теплопроводности тонких слоев материалов, используемых в технологии LTJT.

1. Определение температуропроводности материалов методом Паркера

Одним из наиболее распространенных в практике методов измерения температуропроводности материалов является метод Паркера [9]. С использованием аналитического решения задачи теплопроводности для плоского цилиндрического образца, фронтальная сторона которого облучается коротким лазерным импульсом, в предположении полного поглощения его энергии в тонком поверхностном слое, в [9] получено соотношение для определения коэффициента температуропроводности образца:

$$\alpha = \frac{1,37l^2}{\pi^2 \tau_{1/2}}, \quad (1)$$

где l – толщина образца; $\tau_{1/2}$ – время достижения половинного значения максимальной температуры кривой нагрева (зависимости температуры тыльной стороны образца от времени с момента лазерной вспышки). При этом предполагается, что длительность облучающего импульса мала, а тепловые потери отсутствуют. Установлено [10, 11], что пренебрежение тепловыми потерями приводит к завышенным значениям коэффициента температуропроводности, особенно при высоких температурах. Наиболее точный учет тепловых потерь возможен путем решения нестационарного уравнения теплопроводности.

Использование метода Паркера для определения коэффициента температуропроводности тонких слоев материалов, обладающих высокой теплопроводностью, имеет ряд особенностей. С уменьшением толщины образца и увеличением его теплопроводности время достижения максимальной температуры тыльной стороны образца может быть сравнимым с длительностью лазерного импульса, существенно искажая экспериментальную кривую нагрева [12]. Поэтому для повышения точности измерений в экспериментах с тонкими слоями необходимо использовать сверхкороткие тепловые импульсы и быстродействующую аппаратуру для регистрации температуры тыльной поверхности образца. Анализ факторов, влияющих на форму кривых нагрева и методика учета этих факторов, приведен в [13].

Следует также отметить, что вследствие квадратичной зависимости в формуле (1) α от l неточность определения толщины исследуемого образца вносит значительный вклад в погрешность измерения коэффициента температуропроводности методом Паркера, достигая для тонких образцов десятка процентов.

Анализ литературных данных показывает, что использование стандартного метода Паркера для тонких образцов с высокой теплопроводностью приводит к значительным погрешностям в определении коэффициента температуропроводности, для минимизации которых необходима модификация не только методики измерения, но и процедуры обработки экспериментальной кривой нагрева.

2. Модификация метода Паркера

Для определения коэффициента температуропроводности тонких металлических слоев в стандартную методику Паркера нами были внесены из-

менения. Для увеличения «эффективной» толщины исследуемого тонкого образца в форме диска тепловые потоки от фронтальной поверхности, облучаемой лазерной вспышкой, к его тыльной поверхности направлялись в радиальном направлении в плоскости образца от периферии к его центру.

Для этого фронтальная и тыльная поверхности исследуемого образца закрывались непрозрачными экранами специальной формы (рис. 1). Экран 1 формировал кольцевую зону на периферии образца, облучаемую лазерным импульсом. Экран 2 позволял выделить область тыльной поверхности образца 3, температура которой регистрировалась ИК-детектором. Диаметр экрана 1 превышал диаметр отверстия в экране 2.

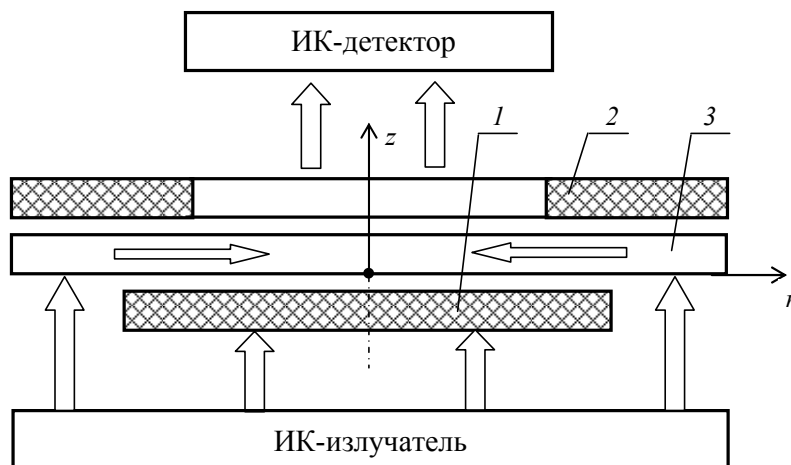


Рис. 1. Схема методики определения температуропроводности тонких металлических слоев

Регистрация кривой нагрева только центральной части образца позволяет отказаться от фокусирующей линзы, что значительно упрощает конструкцию прибора.

3. Математическое моделирование эксперимента

Физическую модель модернизированного метода Паркера измерения температуропроводности, схема которого представлена на рис. 1, можно описать следующим образом. Цилиндрический тонкий металлический образец радиусом r_0 и толщиной $l \ll r_0$ с коэффициентом температуропроводности α расположен в вакууме между двумя экранами с зеркальными поверхностями. В начальный момент времени система находится в тепловом равновесии при температуре T_0 . Нижняя периферийная кольцевая область образца с внутренним радиусом $r_1 < r_0$ равномерно облучается импульсом ИК-излучения энергией Q и длительностью $t_{\text{имп}}$. Рассчитанное распределение плотности потока энергии с тыльной поверхности образца в его центральной области радиусом $r_2 < r_1$ позволяет с использованием закона Стефана – Больцмана определить кривую нагрева (зависимость температуры, регистрируемой ИК-детектором, от времени), а затем величину $\tau_{1/2}$.

Для определения коэффициента температуропроводности образца в описанной выше физической модели необходимо решение нестационарного

уравнения теплопроводности. Точное аналитическое решение нестационарного уравнения теплопроводности для описанной физической модели представляет достаточно сложную задачу.

Поставленная задача была решена методом численного моделирования с использованием программного комплекса ANSYS. Расчеты выполнялись методом конечных элементов. Используемые при моделировании уравнение теплопроводности и краевые условия в цилиндрической системе координат имеют вид

$$\begin{aligned}\frac{\partial T}{\partial t} &= \alpha \cdot \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \text{ при } 0 < z < l, \ 0 < r < r_0, \ t > 0; \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial z} &= -\frac{Q}{t_{\text{имп}} \pi r_0^2} \vartheta(t_{\text{имп}} - t) \vartheta(r_0 - r) + \varepsilon_1 \sigma (T^4 - T_0^4) \text{ при } z = 0, \ r_1 < r < r_0; \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} &= \varepsilon_2 \sigma (T^4 - T_0^4) \text{ при } z = l, \ 0 < r < r_2; \\ T &= T_0 \text{ при } t = 0; \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial z} &= 0 \text{ при } z = 0, \ 0 < r < r_1; \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial z} &= 0 \text{ при } z = l, \ r_2 < r < r_0,\end{aligned}\quad (2)$$

где σ – постоянная Стефана – Больцмана; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – степень черноты нижней, верхней и боковой поверхностей образца; $\vartheta(t - t_{\text{имп}})$ и $\vartheta(r_0 - r)$ – функции Хэвисайда.

4. Результаты моделирования и их обсуждение

Математическое моделирование проводилось при следующих значениях характеристик физической модели. Радиус образца $r_0 = 6,3$ мм; радиус экрана на фронтальной поверхности образца $r_1 = 4$ мм; радиус отверстия в экране на тыльной поверхности образца $r_2 = 3$ мм; степень черноты нижней и верхней поверхностей образца ε_1 и ε_2 принималась равной 0,95; энергия импульса $Q = 10$ Дж; длительность ИК-импульса $t_{\text{имп}} = 0,8$ мс; $T_0 = 293$ К.

Из результатов математического моделирования (рис. 2,а) следует, что для тонких образцов, как и в формуле Паркера (1), коэффициент температуропроводности α обратно пропорционален $\tau_{1/2}$:

$$\alpha = \frac{K}{\tau_{1/2}}, \quad (3)$$

где K – постоянная, зависящая только от размеров экранов и образца.

Для оценки условия малости толщины исследуемого образца (при фиксированных значениях диаметров образца и диафрагм) компьютерным моделированием была получена зависимость коэффициента K от величины параметра $D = l / 2r_0$, приведенная на рис. 2,б.

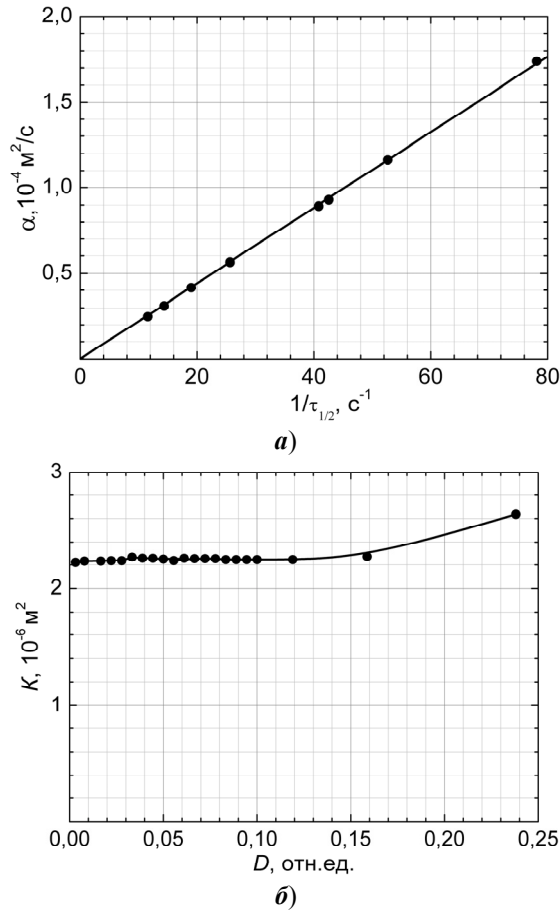


Рис. 2. Результаты математического моделирования для тонких образцов:

a – связь между температуропроводностью α и величиной $1/\tau_{1/2}$ (прямая линия – результаты обработки по методу наименьших квадратов);
б – зависимости коэффициента K в формуле (3) от параметра $D = l / 2r_0$

Из приведенных результатов следует, что при толщинах образца $l < 0,2r_0$ значение коэффициента K практически не зависит от толщины и коэффициента температуропроводности материала образца.

Поскольку в результате математического моделирования было установлено, что для тонких образцов коэффициент K в формуле (3) практически не зависит от коэффициента температуропроводности материала исследуемого образца и его толщины, а определяется только радиусами образца и экранов, то K можно определить по результатам измерений с тонким эталонным образцом по формуле

$$K = a_э \cdot (\tau_{1/2})_э, \quad (4)$$

где $a_э$ – известное значение коэффициента температуропроводности тонкого эталонного образца; $(\tau_{1/2})_э$ – измеренное значение $\tau_{1/2}$ для этого образца. Тогда коэффициент температуропроводности исследуемого тонкого образца может быть определен по формуле

$$a_X = \frac{K}{(\tau_{1/2})_X}, \quad (5)$$

где $(\tau_{1/2})_X$ – экспериментально полученное значение $\tau_{1/2}$ для исследуемого образца.

5. Образцы и методика эксперимента

Для проверки корректности результатов математического моделирования были измерены коэффициенты температуропроводности тонких слоев меди и алюминия и спеченного слоя серебрясодержащей пасты, применяемого в межэлементных соединениях СПП.

Измерения коэффициента температуропроводности проводились методом лазерной вспышки на установке LFA 427 (NETZSCH) при комнатной температуре. Исследуемые образцы имели форму диска диаметром 12,6 мм. В эксперименте использовались теплоотражающие экраны, изготовленные из полированной нержавеющей стали. Диаметр экрана на фронтальной поверхности образца составлял 8 мм. В экране диаметром 12,6 мм, расположенном на тыльной поверхности образца, вырезалось отверстие диаметром 6 мм. Между экранами и исследуемым образцом создавался зазор размером около 0,5 мм.

Фронтальная поверхность образцов облучалась лазерным импульсом длительностью 0,6 мс с длиной волны 1,064 мкм и энергией 10 Дж. Температура тыльной поверхности образцов измерялась с помощью ИК-детектора. В ходе измерений регистрировалась кривая нагрева тыльной стороны образцов и определялось время $\tau_{1/2}$.

Эталонный образец изготавливался из Ag фольги (Ср 99,99) в виде диска диаметром 12,6 мм и толщиной 90 мкм с коэффициентом температуропроводности $0,0179 \text{ м}^2/\text{с}$ [14]. В результате проведенных измерений и последующих расчетов по формуле (4) было получено значение коэффициента K для серебряной фольги, равное $(2,21 \pm 0,06) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$, согласующееся с приведенными выше результатами математического моделирования.

Исследуемые образцы диаметром 12,6 мм изготавливались из фольги меди марки М1 толщиной 100 мкм, фольги алюминия марки А6 толщиной 200 мкм и спеченного при температуре 250 °С и давлении 10 МПа слоя серебрясодержащей пасты LTS043 [6] толщиной 60 мкм.

Используя измеренные значения времени $\tau_{1/2}$ для исследуемых тонких металлических образцов и определенный в измерениях с эталонным образцом коэффициент K , по формуле (5) определили коэффициенты температуропроводности меди и алюминия: $(0,0116 \pm 0,0005) \text{ м}^2/\text{с}$ и $(0,0094 \pm 0,0005) \text{ м}^2/\text{с}$ соответственно. Соответствие полученных значений с табличными данными [14] ($0,0118 \text{ м}^2/\text{с}$ для меди и $0,0095 \text{ м}^2/\text{с}$ для алюминия) подтверждает корректность предложенной методики определения коэффициента температуропроводности тонких металлических слоев. Измеренное значение коэффициента температуропроводности тонкого спеченного слоя серебрясодержащей пасты составило $(0,0130 \pm 0,0005) \text{ м}^2/\text{с}$.

Заключение

Предложена методика измерения коэффициента температуропроводности тонких металлических слоев методом лазерной вспышки, основанная на

формировании в исследуемых слоях радиальных тепловых потоков, направленных от периферии к центру образца.

Проведено математическое моделирование процессов теплопереноса в данной геометрии. Показано, что при малых толщинах исследуемых металлических слоев их коэффициент температуропроводности определяется только измеренными из кривых нагрева значениями времени $\tau_{1/2}$ для образца и для эталона и не зависит от их толщин.

С использованием установки LFA 427 (NETZSCH) определены коэффициенты температуропроводности исследуемых тонких металлических слоев меди и алюминия. Соответствие результатов измерений коэффициентов температуропроводности литературным данным подтверждает корректность предложенной методики.

С применением разработанной методики определен коэффициент температуропроводности тонких спеченных слоев серебрясодержащей пасты, применяемых в межэлементных соединениях СПП.

Список литературы

1. **Гува, А. Я.** Контактный теплообмен силовых полупроводниковых приборов / А.Я. Гува. – Новосибирск, 2005. – 210 с.
2. **Мартыненко, В. А.** Новые высокоомощные диоды и тиристоры для промышленности, транспорта и энергетики / В. А. Мартыненко, Г. Д. Чумаков // Силовая электроника. – 2005. – № 3. – С. 8–10.
3. Patent US 3555669. Process for soldering silicon wafers to contacts / Tarn W. H. A Patented Jan. 19, 1971.
4. Patentschrift DE 3414065 C2, Deutsches Patentamt / Fellenger J., Baumgartner W., 1989.
5. **Schwarzbauer, H.** Novel Large Area Joining Technique for Improved Power Device Performance / H. Schwarzbauer, R. Kuhnert // IEEE Trans. Ind. Appl. – 1991. – Vol. 27, № 1. – P. 93.
6. Исследование низкотемпературного спекания серебрясодержащих паст методом растровой электронной микроскопии / К. Н. Нищев, М. И. Новопольцев, К. В. Саврасов, В. П. Мишкин, В. В. Елисеев, В. А. Мартыненко, А. В. Гришанин // Прикладная физика. – 2015. – № 3. – С. 10–14.
7. **Mertens, C.** Die Niedertemperatur-Verbindungstechnik der Leistungselektronik / C. Mertens // Fortschrittberichte: VDI-Verlag, Duesseldorf, 2004. – 141 s.
8. **Кикоин, И. К.** Таблицы физических величин. Справочник / И. К. Кикоин ; под ред. И. К. Кикоина. – М. : Атомиздат, 1976. – С. 256.
9. **Parker, W. J.** Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity and Thermal Conductivity / W. J. Parker, R. J. Jenkins, C. P. Butler, G. L. Abbott // J. Appl. Phys. – 1961. – Vol. 32, № 9. – P. 1679–1684.
10. **Hubert, M. J.** Some extensions of the flash method of measuring thermal diffusivity / M. J. Hubert // J. Appl. Phys. – 1980. – Vol. 51 (9). – P. 4666–4672.
11. Влияние длительности импульса и утечек тепла в импульсном методе измерения температуропроводности / В. Г. Баранов, Ю. Г. Годин, И. Г. Меринов, А.А. Одинцов, А. В. Тенишев // Научная сессия МИФИ–2000 : сб. науч. тр. – М. : МИФИ, 2000. – Т. 8. – 220 с.
12. **Larson, K. B.** Correction for Finite Pulse Time Effects in Very Thin Samples Using the Flash Method of Measurement Thermal Diffusivity / K. B. Larson, K. Koyama // J. Appl. Phys. – 1967. – Vol. 38, № 2. – P. 465–474.
13. Высокотемпературные измерения температуропроводности реакторных материалов методом лазерной вспышки / В. Г. Баранов, А. В. Тенишев, А. В. Лунёв,

- С. А. Покровский, А. В. Хлунов // Ядерная физика и инжиниринг. – 2011. – Т. 2, № 4. – С. 291–302.
14. **Зиновьев, В. Е.** Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Справочник / В. Е. Зиновьев. – М. : Metallurgiya. – 1989. – 384 с.

References

1. Guva A. Ya. *Kontaktnyy teploobmen silovykh poluprovodnikovyykh priborov* [Contact heat exchange of power semiconductor devices]. Novosibirsk, 2005, 210 p.
2. Martynenko V. A., Chumakov G. D. *Silovaya elektronika* [Power electronics]. 2005, no. 3, pp. 8–10.
3. *Patent US 3555669. Process for soldering silicon wafers to contacts.* Tarn W. H. A Patented Jan. 19, 1971.
4. *Patentschrift DE 3414065 C2, Deutsches Patentamt.* Fellenger J., Baumgartner W. 1989.
5. Schwarzbauer H., Kuhnert R. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 1991, vol. 27, no. 1, p. 93.
6. Novopol'tsev M. I., Savrasov K. V., Mishkin V. P., Eliseev V. V., Martynenko V. A., Grishanin A. V. *Prikladnaya fizika* [Applied physics]. 2015, no. 3, pp. 10–14.
7. Mertens C. *Fortschrittberichte: VDI-Verlag* [Performance report: VDI-publishing]. Duesseldorf, 2004, 141 p.
8. Kikoin I. K. *Tablitsy fizicheskikh velichin. Spravochnik* [Tables of physical values. Reference book]. Moscow: Atomizdat, 1976, p. 256.
9. Parker W. J., Jenkins R. J., Butler C. P., Abbott G. L. *J. Appl. Phys.* 1961, vol. 32, no. 9, pp. 1679–1684.
10. Hubert M. J. *J. Appl. Phys.* 1980, vol. 51 (9), pp. 4666–4672.
11. Baranov V. G., Godin Yu. G., Merinov I. G., Odintsov A. A., Tennishev A. V. *Nauchnaya sessiya MIFI-2000: sb. nauch. tr.* [Scientific session MIFI-2000: collected papers]. Moscow: MIFI, 2000, vol. 8, 220 p.
12. Larson K. B., Koyama K. *J. Appl. Phys.* 1967, vol. 38, no. 2, pp. 465–474.
13. Baranov V. G., Tennishev A. V., Lunev A. V., Pokrovskiy S. A., Khlunov A. V. *Yadernaya fizika i inzhiniring* [Nuclear physics and engineering]. 2011, vol. 2, no. 4, pp. 291–302.
14. Zinov'ev V. E. *Teplofizicheskie svoystva metallov pri vysokikh temperaturakh. Spravochnik* [Thermophysical properties of metals at high temperatures]. Moscow: Metallurgiya, 1989, 384 p.

Нищев Константин Николаевич

кандидат физико-математических наук,
доцент, директор Института физики
и химии, Мордовский государственный
университет имени Н. П. Огарева
(Россия, г. Саранск,
ул. Большевикская, 68)

E-mail: nishchev@inbox.ru

Nishchev Konstantin Nikolaevich

Candidate of physical and mathematical
sciences, associate professor, director
of the Institute of Physics and Chemistry,
Ogarev Mordovia State University
(68 Bolshevistskaya street, Saransk, Russia)

Новопольцев Михаил Ильич

кандидат физико-математических наук,
доцент, кафедра общей физики,
Мордовский государственный
университет имени Н. П. Огарева
(Россия, г. Саранск,
ул. Большевикская, 68)

E-mail: nishchev@inbox.ru

Novopol'tsev Mikhail Il'ich

Candidate of physical and mathematical
sciences, associate professor,
sub-department of general physics,
Ogarev Mordovia State University
(68 Bolshevistskaya street, Saransk, Russia)

Беглов Владимир Иванович

кандидат физико-математических наук,
доцент, кафедра радиотехники,
Мордовский государственный
университет имени Н. П. Огарева
(Россия, г. Саранск,
ул. Большевикская, 68)

E-mail: begvi1@mail.ru

Beglov Vladimir Ivanovich

Candidate of physical and mathematical
sciences, associate professor,
sub-department of radio engineering,
Ogarev Mordovia State University
(68 Bolshevistskaya street, Saransk, Russia)

Окин Максим Александрович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра радиотехники, Мордовский
государственный университет
имени Н. П. Огарева (Россия,
г. Саранск, ул. Большевикская, 68)

E-mail: okinma@mail.ru

Okin Maksim Aleksandrovich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of radio
engineering, Ogarev Mordovia State
University (68 Bolshevistskaya street,
Saransk, Russia)

Лютлова Екатерина Николаевна

ведущий инженер, кафедра общей
физики, Мордовский государственный
университет имени Н. П. Огарева
(Россия, г. Саранск,
ул. Большевикская, 68)

E-mail: ekat.lyutova@yandex.ru

Lyutova Ekaterina Nikolaevna

Principal engineer, sub-department
of general physics, Ogarev Mordovia
State University (68 Bolshevistskaya
street, Saransk, Russia)

УДК 536.2.083

Измерение температуропроводности тонких металлических слоев методом лазерной вспышки / К. Н. Нищев, М. И. Новопольцев, В. И. Беглов, М. А. Окин, Е. Н. Лютова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2015. – № 4 (36). – С. 101–110.