ОПТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ. 2023. Том 90. № 7. С. 94–100
OPTICHESKII ZHURNAL. 2023. V. 90. № 7. Pp. 94–100

Научная статья
Research Article

Оптический журнал

Оптическое приборостроение и метрология
Optical instrument making and metrology

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-07-94-100
УДК 535.377

Эффективность термолюминесцентного отклика лазерно-структурированного поликристаллического и монокристаллического α-Al_2O_3

Клавдия Владимировна Жук[1]✉, Серафим Всеволодович Смирнов[2]

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

[1]*klavdiia.v.korotkova@tusur.ru* *https://orcid.org/0000-0002-7957-583X*
[2]*serafim.smirnov@mail.ru* *https://orcid.org/0000-0002-7993-162X*

Аннотация

Предмет исследования. Термолюминесценция образцов сапфира и алюмооксидной керамики, наноструктурированных излучением лазера на CO_2. **Цель работы** — исследование возможности повышения термолюминесцентного отклика путем модификации поверхности поликристаллического и монокристаллического оксидов алюминия воздействием лазерного излучения. **Метод.** Лазерная обработка поверхности исследуемых образцов осуществлялась с использованием установки CERTON 3020 ULTRA непрерывным излучением CO_2-лазера с излучением длиной волны 10,6 мкм при разных скоростях сканирования. Ультрафиолетовое облучение образцов проводилось излучением ртутной лампы низкого давления с выделением спектральной полосы 230–240 нм. Для определения результатов лазерной обработки поверхности образцов использованы методы оптической и инфракрасной спектроскопии Фурье, фото- и термолюминесценции, рентгенофазового анализа, растровой электронной спектроскопии. **Основные результаты.** В процессе лазерной обработки в исследуемых образцах выявлена генерация повышенной концентрации F-центров и их производных. Установлено влияние режимов лазерной обработки на термолюминесцентный отклик. **Практическая значимость.** Показано, что лазерная обработка поверхности дозиметрических материалов излучением лазера на CO_2 приводит к повышению термолюминесцентного отклика поликристаллического и монокристаллического оксидов алюминия, что позволит создать дозиметры с пониженным порогом детектируемой дозы. Разработанный метод может быть использован в производстве дозиметров типа ТЛД-500к.

Ключевые слова: термолюминесцентный дозиметр, лазерная обработка, оптическая спектроскопия, фото- и термолюминесценция

Благодарность: работа выполнена сотрудниками научной лаборатории интегральной оптики и радиофотоники при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках соглашения №075-03-2020-237/1 от 5 марта 2020 г. (внутренний номер проекта FEWM-2020-0040), а также в рамках выполнения гранта Российского научного фонда № 21-72-00124.

Ссылка для цитирования: Жук К.В., Смирнов С.В. Эффективность термолюминесцентного отклика лазерно-структурированного поликристаллического и монокристаллического α-Al_2O_3 // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 7. С. 94–100. http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-07-94-100

Коды OCIS: 140.3390, 250.5230, 300.6360, 250.5230

Efficiency of thermoluminescent response of laser-structured polycrystalline and monocrystalline α-Al_2O_3

Klavdiya V. Zhuk[1]✉, Serafim V. Smirnov[2]

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

[1]klavdiia.v.korotkova@tusur.ru https://orcid.org/0000-0002-7957-583X
[2]serafim.smirnov@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-7993-162X

Abstract

Subject of study. Thermoluminescence of sapphire and alumina ceramic samples nanostructured by CO_2 laser radiation. The **aim of the study** is the possibility investigation of increasing the thermoluminescent response by modifying the surface of polycrystalline and single-crystal aluminum oxide by laser radiation. **Method.** Laser treatment of the studied samples surface was carried out using a CERTON 3020 ULTRA installation with continuous CO_2 laser radiation with a wavelength of 10.6 μm at different scanning speeds. Ultraviolet irradiation of the samples was carried out by low-pressure mercury lamp radiation with the separation of the spectral band 230–240 nm. To determine the results of laser treatment of the samples surface, the methods of optical and infrared Fourier spectroscopy, photo- and thermoluminescence, X-ray phase analysis, and scanning electron spectroscopy were used. **Main results.** In the course of laser treatment in the studied samples, generation of F-centers and their derivatives an increased concentration was revealed. The effect of laser processing modes on the thermoluminescent response is established. **Practical significance.** It is shown that laser treatment of the surface of dosimetric materials with CO_2 laser radiation leads to an increase in the thermoluminescent response of polycrystalline and single-crystal alumina, which will make it possible to create dosimeters with a lower detected dose threshold. The developed method can be used in the production of ТЛД-500к type dosimeters.

Keywords: thermoluminescent dosimeter, laser processing, optical spectroscopy, photo- and thermoluminescence

Acknowledgment: the work was carried out by the staff of the Research Laboratory of Integrated Optics and Radio Photonics with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under agreement № 075-03-2020-237/1 dated March 5, 2020 (internal project number FEWM-2020-0040), as well as within the framework of the grant of the Russian Science Foundation № 21-72-00124.

For citation: Zhuk K.V., Smirnov S.V. Efficiency of thermoluminescent response of laser-structured polycrystalline and monocrystalline α-Al_2O_3 [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. № 7. P. 94–100. http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-07-94-100

OCIS codes: 140.3390, 250.5230, 300.6360, 250.5230

ВВЕДЕНИЕ

Термолюминесцентные твердотельные дозиметры ультрафиолетового и ионизирующих излучений на основе анион-дефектных монокристаллов α-Al_2O_3 находят широкое применение как для индивидуальной дозиметрии, так и в научных исследованиях [1, 2]. Эффективность дозиметра определяется отношением энергии термолюминесценции к поглощенной энергии ультрафиолетового или ионизирующего излучения. Интегральный выход термолюминесценции в основном дозиметрическом пике α-Al_2O_3 при температуре 330 K и спектральной полосе 410–420 нм обусловлен высокой концентрацией центров захвата свободных электронов и центров рекомбинации дырок (p) в виде кислородных вакансий и различного рода F-центров по схеме [3–6]

$$F + p \rightarrow (F^+)^* \rightarrow F + h\nu, \quad (1)$$

где $(F^+)^*$ — возбужденное состояние F-центра, $h\nu$ — энергия фотона.

Вероятность освобождения электрона из ловушки в единицу времени t определяется выражением

$$P = s\exp(-E_t/kT), \quad (2)$$

где E_t — энергетический уровень ловушки, k — постоянная Больцмана, T — температура, s можно записать в виде

$$s = N_b\nu_t\sigma_t. \quad (3)$$

Здесь N_b — плотность состояний в зоне, в которую переходят носители зарядов, ν_t — тепловая скорость носителей, σ_t — сечение захвата носителей ловушкой.

Если n_t — концентрация захваченных ловушками электронов, то скорость ее изменения вследствие теплового возбуждения определяется как

$$dn_t/dt = -n_tP. \quad (4)$$

Если освобожденные электроны вновь не захватываются ловушками, то решение этого уравнения имеет вид

$$n_t = n_{t0}\exp(-t/\tau), \quad (5)$$

где n_{t0} — начальная концентрация захваченных электронов, τ — время освобождения электронов. Если излучательное время жизни τ_r много меньше, чем τ, то интенсивность термолюминесценции может быть определена из уравнения [7]

$$L(t, T) = (n_{t0}\eta s)\exp(-t/\tau)\exp(-E_t/kT), \quad (6)$$

где η — вероятность того, что рекомбинация носителя заряда приведет к испусканию фотона. Как следует из уравнения (6), интенсивность термолюминесценции определяется в основном концентрацией и типом ловушек.

Высокую анионную дефектность в кристаллах сапфира возможно получить легированием, например магнием, или электрофизическими методами, например, лазерной, электронной и ионной обработками [8–11]. В проведенном ранее исследовании для создания дефектов в анионной решетке сапфира использовалась обработка излучением непрерывного лазера на YAG мощностью 10 Вт (длина волны излучения λ = 1,06 мкм) [12, 13]. Плотность мощности в фокальном пятне — 10^6–10^7 Вт/см^2. При этом было установлено, что для более эффективной обработки целесообразно использование длинноволнового лазерного излучения, например, лазера на CO_2 с λ = 10,6 мкм [14], что связано с более высокой поглощающей способностью материалов на основе оксида алюминия в данном диапазоне длин волн (рис. 1).

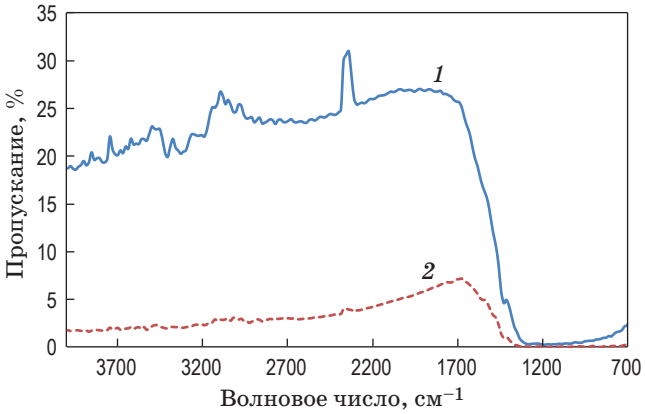

Рис. 1. Спектры пропускания исследуемых образцов монокристаллического (*1*) и поликристаллического (*2*) оксидов алюминия в инфракрасном диапазоне

Fig. 1. Transmission spectra (T) of the studied samples of (*1*) single-crystal and (*2*) polycrystalline aluminum oxides in the infrared range

Таким образом, существует возможность с помощью лазерной обработки поверхности образцов сапфира создать в них повышенную концентрацию кислородных вакансий и F-центров, которые и определяют вероятность и интенсивность термолюминесценции.

Поэтому цель настоящей работы состояла в исследовании возможности повышения термолюминесцентного отклика путем модификации поверхности поликристаллического и монокристаллического оксидов алюминия воздействием лазерного излучения.

ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В данной работе представлены результаты исследований термолюминесценции образцов дозиметров из поликристаллического (ВК-100, АО «Поликор») и монокристаллического (сапфир, АО «Монокристалл») оксидов алюминия толщиной 0,5 мм и размером 24×30 мм, полированных с одной стороны и шлифованных

с другой. Лазерная обработка поверхности исследуемых образцов проводилась на установке CERTON 3020 ULTRA непрерывным излучением CO_2-лазера ($\lambda = 10{,}6$ мкм), мощность луча, сфокусированного в пятно диаметром 50 мкм, составляла 24 Вт, скорость сканирования 200–2000 мм/с при шаге 50 мкм. В результате лазерного воздействия на поверхности образцов из расплава формировалась квазипериодическая структура, глубиной от 10 до 50 мкм. На рис. 2 представлена фотография поверхности образца дозиметра после лазерной обработки при скорости сканирования 200 мм/с и шаге 50 мкм.

В процессе плавления и испарения материала в приповерхностном слое образца происходит частичная потеря кислорода оксидом алюминия. Потеря кислорода приводит не только к изменению элементного состава материала, но и к перестройке структуры путем перехода α-фазы оксида алюминия в γ-фазу. Результаты рентгенофазового анализа, проведенного с помощью дифрактометра *Shimadzu* XRD-7000, представлены в таблице.

Нарушение стехиометрии в сторону недостатка кислорода вызывает увеличение концентрации анионных вакансий, а также изменение фазового состава лазерно-структурированного слоя [13, 15], в результате этого на рентгенограммах обработанных образцов обнаруживаются характерные рефлексы γ-Al_2O_3, при этом содержание γ-Al_2O_3 в приповерхностном слое достигает 80%.

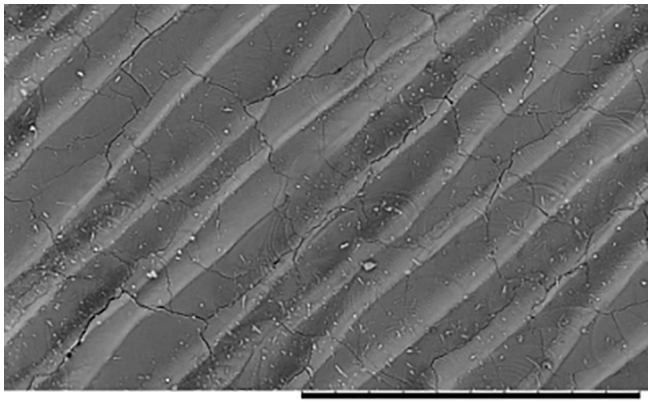

Рис. 2. Фотография квазипериодической структуры поверхностного слоя дозиметра из сапфира после лазерной обработки излучением CO_2-лазера при скорости сканирования 200 мм/с и шаге 50 мкм

Fig. 2. Photograph of the surface layer quasi-periodic structure of the sapphire dosimeter after CO_2 laser treatment at a scanning speed of 200 mm/s and a step of 50 μm

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Термолюминесценция керамических образцов регистрировалась в полосе излучения F-центров от 410 до 440 нм [12] с помощью полосового фильтра и ФЭУ-148. Ультрафиолетовая засветка образцов проводилась при комнатной температуре ртутной лампой низкого давления с выделением полосы ее излучения 230–240 нм при плотности потока излучения не менее 200 мкВт/см^2. Суммарная поглощенная доза составляла около 10 Гр. Скорость нагрева при измерениях варьировалась от 0,5 до 1 К/с и на основании измерений положений максимумов интенсивностей термолюминесценции оценивалась энергия активации процесса [7,16] как

$$\Delta E = (kT_{m1}T_{m2})/(T_{m1} - T_{m2}) \times \times \ln[(\beta_1 T^2{}_{m2})/(\beta_2 T^2{}_{m1})], \quad (7)$$

Результаты рентгенофазового анализа
Results of X-ray phase analysis

Образец	Фаза	Содержание, %	Постоянная решетки, нм	Размер области когерентного рассеяния, нм
ВК-100 (исходный)	α-Al_2O_3	100	5,14	127
Лазерно-структурированный слой 50 мкм	α-Al_2O_3	15	5,14	60
	γ-Al_2O_3	85	7,85	80
Сапфир (исходный)	α-Al_2O_3	100	4,75	
Лазерно-структурированный слой	α-Al_2O_3	20	4,72	60
	γ-Al_2O_3	80	7,8	80

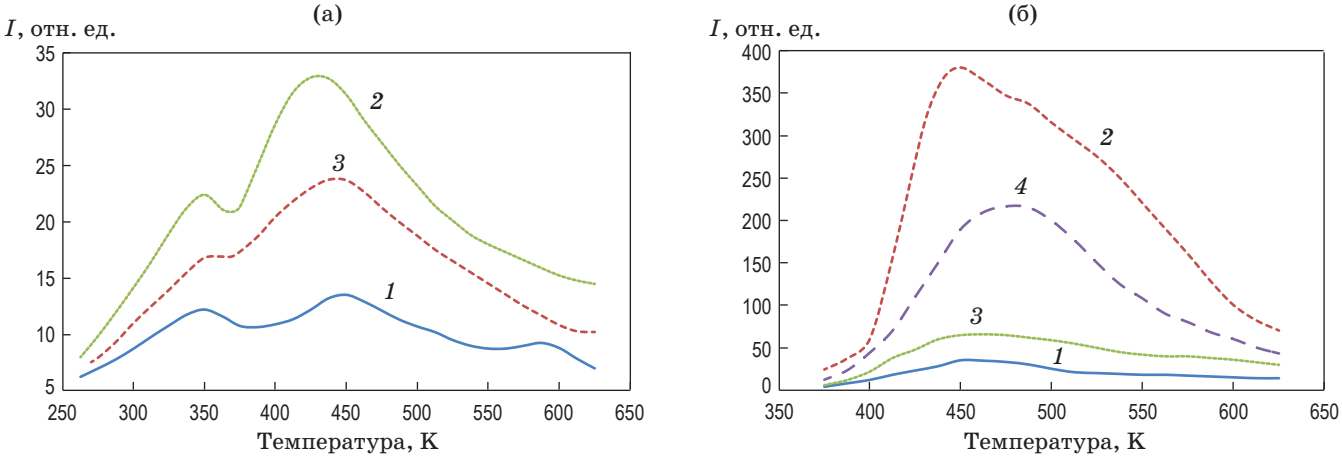

Рис. 3. Температурные зависимости интенсивности термолюминесценции дозиметров из керамики ВК-100 (а) и дозиметров из монокристаллического сапфира (б) при дозе ультрафиолетового облучения 10 Гр и мощности сканирующего лазера 24 Вт. *1* — исходный образец; (а) — лазерно-структурированные образцы керамики ВК-100 при скорости сканирования 50 (*2*) и 100 (*3*) см/с; (б) — лазерно-структурированные образцы монокристаллического сапфира при скорости сканирования 20 (*2*), 200 (*3*) и 60 (*4*) см/с

Fig. 3. The thermoluminescence intensity temperature dependences of (a) dosimeters made of ВК-100 ceramics and (б) dosimeters made of single-crystal sapphire at an ultraviolet irradiation dose of 10 Gy and a scanning laser power of 24 W. (*1*) is original sample; (a) presents laser-structured samples of ВК-100 ceramics at scanning speeds of (*2*) 50 and (*3*) 100 cm/s; (б) presents laser-structured samples of single-crystal sapphire at scanning speeds of (*2*) 20, (*3*) 200, and (*4*) 60 cm/s

где T_{m1} и T_{m2} — температуры максимумов термолюминесценции при скоростях нагрева β_1 и β_2 соответственно.

На рис. 3а представлены экспериментальные зависимости интенсивности термолюминесценции от температуры образцов из керамики ВК-100 как исходного, так и лазерно-структурированных при скорости сканирования 50 и 100 см/с. Выявлено, что интенсивность дозиметрического пика зависит от режима сканирования лазерным лучом и при скорости сканирования 50 см/с достигает максимума, который в 1,5 раза превышает интенсивность термолюминесценции исходного образца. Из графиков следует, что как в исходном, так и в структурированных образцах наблюдается основной дозиметрический пик при температурах 440–450 K, а также пик при 350 K, обусловленный мелкими ловушками [17, 18], который может быть связан с примесными ионами магния. Энергия активации процесса термолюминесценции керамики составила 0,8–0,9 эВ.

На рис. 3б представлены температурные зависимости термолюминесценции образцов из монокристаллического сапфира. Следует отметить, что монокристаллические образцы имеют пик термолюминесценции на порядок выше, чем поликристаллические, что может быть вызвано тем, что у поликристаллических образцов присутствуют собственные центры поглощения термолюминесценции, способствующие ее тушению [18]. Определена энергия активации термолюминесценции монокристаллических образцов оксида алюминия, которая составила 1,1–1,2 эВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены результаты исследований обработки поверхности поликристаллического и монокристаллического оксидов алюминия сканирующим пучком мощного лазерного излучения с целью повышения термолюминесцентного отклика. Показано, что обработка поверхностей сапфира и поликристаллического α-Al_2O_3 излучением лазера на CO_2 позволяет существенно увеличить выход термолюминесценции, который, в свою очередь, определяет дозовую чувствительность устройства. Определено влияние режима лазерной обработки

поверхности исследуемых образцов на термолюминесцентный отклик.

В результате проведенных исследований установлено, что причиной роста выхода термолюминесценции является генерация избыточной концентрации ловушек, в качестве которых выступают кислородные вакансии.

Полученные экспериментальные результаты продемонстрировали перспективность использования лазерной обработки для повышения чувствительности термолюминесцентных дозиметров. Разработанный метод может быть использован в производстве дозиметров типа ТЛД-500к.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кортов В.С., Мильман И.И., Никифоров С.В. Твердотельная дозиметрия // Известия Томского политехнического университета. 2000. Т. 303. Вып. 2. С. 35–45. http://earchive.tpu.ru/handle/11683/2971
2. Климанов В.А., Крамер-Агеев Е.А., Смирнов В.В. Радиационная дозиметрия / под ред. Климанова В.А. М.: НИЯУ МИФИ, 2014. 648 с.
3. Соловьев С.В., Мильман И.И., Сюрдо А.И. Термофотоиндуцированные преобразования центров люминесценции в анион-дефектных кристаллах α-Al_2O_3 // Физика твердого тела. 2012. Т. 54. Вып. 4. С. 683–690.
4. Рамазанова Г.Р., Ананченко Д.В., Никифоров С.В. и др. Люминесцентные свойства монокристалла сапфира, облученного импульсным ионным пучком Fe^{10+} // Опт. и спектр. 2021. Т. 129. Вып. 8. С. 1010–1018. http://doi.org/10.1883/os.2021.08.51196.1887-21
5. Perevalov T.V., Shaposhnikov A.V., Gritsenko V.A. Electronic structure of bulk and defect α- and γ-Al_2O_3 // Microelectron. Eng. 2009. V. 86. P. 1915–1917. https://doi.org/10.1016/j.mee.2009.03.006
6. Кортов В.С., Мильман И.И., Никифоров С.В. и др. Механизм люминесценции F-центров в анион-дефектных монокристаллах оксида алюминия // Физика твердого тела. 2003. Т. 4. Вып. 7. С. 1202–1208.
7. Као К., Хуанг В. Перенос электронов в твердых телах / пер. с англ. Высоцкого З.З. под ред. Пикуса Г.Е. М.: Мир, 1984. 352 с.
8. Zhang B., Lu S.-Z., Zhang H.-J., et al. The fluorescence and thermoluminescence characteristics of α-Al_2O_3:C ceramics // Chin. Phys. B. 2010. V. 19. № 10. P. 1–4. http://doi.org/10.1088/1674-1056/19/7/077805
9. Trinade N.M., Magalhaes M.G., Nunes M.C.S., et al. Thermoluminiscence of UV-irradiated α-Al_2O_3:C,Mg // J. Lumin. 2020. V. 223. P. 1–5. https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117195
10. Аулкер Н.Л., Винникова Е.А. Изучение оптических характеристик аниондефектного корунда // Вестник КемГУ, Химия. 2008. № 2. С. 214–219.
11. Pokorny P., Ibarra A. Impurity effects on the thermoluminescence of Al_2O_3 // J. Appl. Phys. 1994. V. 75. № 2. P. 1088–1090. https://doi.org/10.1063/1.356490
12. Смирнов С.В., Жук К.В., Саврук Е.В. Катодо- и термолюминесценция лазерно-наноструктурированной α-Al_2O_3 керамики // Прикладная физика (изд. НПО «Орион»). 2022. № 5. С. 49–53. http://doi.org/10.51368/1996-0948-2022-5-49-53
13. Саврук Е.В., Смирнов С.В. Исследование структуры алюмооксидной керамики после электронной и лазерной обработки // Заводская лаборатория. 2011. Т. 77. № 6. С. 32–35.
14. Битюков В.К., Петров В.А. Коэффициент поглощения расплава оксида алюминия // Прикладная физика (изд. НПО «Орион»). 2007. № 4. С. 18–34.

REFERENCES

1. Kortov V.S., Milman I.I., Nikiforov S.V. Solid-state dosimetry [in Russian] // Proc. of the Tomsk Polytechnic University. 2000. V. 303. № 2. P. 35–45. http://earchive.tpu.ru/handle/11683/2971
2. Klimanov V.A., Kramer-Ageev E.A., Smirnov V.V. Radiation dosimetry [in Russian] / ed. by Klimanova V.A. M.: "NIIAU MIFI" Publ., 2014. 648 p.
3. Solovev S.V., Milman I.I., Surdo A.I. Thermal- and photo-induced transformations of luminescence centers in α-Al_2O_3 anion-defective crystals // Phys. of the Solid State. 2012. V. 54. P. 726–734. http://doi.org/10.1134/S1063783412040270
4. Ramazanova G.R., Ananchenko D.V., Nikiforov S.V., et al. Luminescent properties of sapphire single crystals irradiated with a pulsed Fe^{10+} ion beam // Opt. and Spectrosc. 2021. V. 129. P. 1150–1159. http://doi.org/10.1134/S0030400X21080154
5. Perevalov T.V., Shaposhnikov A.V., Gritsenko V.A. Electronic structure of bulk and defect α- and γ-Al_2O_3 // Microelectron. Eng. 2009. V. 86. P. 1915–1917. https://doi.org/10.1016/j.mee.2009.03.006
6. Kortov V.S., Mil'man I.I., Nikiforov S.V., et al. Mechanism of F-center luminescence in anion-defective aluminum oxide single crystals // Phys. of the Solid State. 2003. V. 45. P. 1260–1266. http://doi.org/10.1134/1.1594239
7. Kao K., Huang V. Electron transport in solids. Oxford, N.Y.: Pergamon Press, 1981. 663 p. http://doi.org/10.1063/1.2915326
8. Zhang B., Lu S.-Z., Zhang H.-J., et al. The fluorescence and thermoluminescence characteristics of α-Al_2O_3:C ceramics // Chin. Phys. B. 2010. V. 19. № 10. P. 1–4. http://doi.org/10.1088/1674-1056/19/7/077805
9. Trinade N.M., Magalhaes M.G., Nunes M.C.S., et al. Thermoluminiscence of UV-irradiated α-Al_2O_3:C,Mg // J. Lumin. 2020. V. 223. P. 1–5. https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117195
10. Aulker N.L., Vinnikova E.A. Study of the optical characteristics of anion-defective corundum [in Russian] // Bulletin of the KemGU, Chemistry. 2008. № 2. P. 214–219.
11. Pokorny P., Ibarra A. Impurity effects on the thermoluminescence of Al_2O_3 // J. Appl. Phys. 1994. V. 75. № 2. P. 1088–1090. https://doi.org/10.1063/1.356490
12. Smirnov S.V., Zhuk K.V., Savruk E.V. Cathode- and thermoluminescence of laser-nanostructured α-Al_2O_3 ceramics [in Russian] // Appl. Phys. (publ. by the Scientific and Production Association "Orion", Moscow). 2022. № 5. P. 49–53. http://doi.org/10.51368/1996-0948-2022-5-49-53
13. Savruk E.V., Smirnov S.V. Investigation of the structure of alumina ceramics after electronic and laser processing [in Russian] // Factory Laboratory. 2011. V. 77. № 6. P. 32–35.
14. Bitiukov V.K., Petrov V.A. Absorption coefficient of aluminum oxide melt [in Russian] // Appl. Phys. (publ. by the SPA "Orion", Moscow). 2007. № 4. P. 18–34.

15. Лисаченко А.А., Глебовский А.А. Деструкция Al_2O_3 при лазерном возбуждении в полосе поглощения V-центров // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. Вып. 7. С. 87–94.
16. Кортов В.С., Никифоров С.В. Особенности люминесценции наноструктурного оксида алюминия // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. 2011. Т. 9. № 1. С. 41–48.
17. Алукер Н.Л., Артамонов А.С., Гимадова Т.И. и др. Термолюминесцентные дозиметры на основе керамики из оксида и нитрида алюминия // Приборы и техника эксперимента. 2021. № 6. С. 75–83. http://doi.org/10.31857/S0032816221050177
18. Звонарев С.В., Смирнов Н.О. Тушение люминесценции в керамиках оксида алюминия, допированных магнием // Физика твердого тела. 2019. Т. 61. Вып. 5. С. 934–938. http://doi.org/10.21883/FTT.2019.05.47596.36F

15. Lisachenko A.A., Glebovskii A.A. Destruction of Al_2O_3 under laser excitation in the absorption band of V-centers // JTF Lett. 2000. V. 26. № 7. P. 87–94. http://doi.org/10.1134/1.1262827
16. Kortov V.S., Nikiforov S.V. Features of the luminescence of nanostructured aluminum oxide [in Russian] // Nanosystems, nanomaterials, nanotechnologies. 2011. V. 9. № 1. P. 41–48.
17. Aluker N.L., Artamonov A.S., Gimadova T.I., et al. Thermoluminescent dosimeters based on aluminum oxide and nitride ceramics // Instruments and Experimental Technique. 2021. № 6. P. 860–868. http://doi.org/10.1134/S0020441221050158
18. Zvonarev S.V., Smirnov N.O. Luminescence quenching in magnesium-doped alumina ceramics // Physics of the Solid State. 2019. V. 61. № 5. P. 835–839. http://doi.org/10.1134/S1063783419050408

АВТОРЫ

Клавдия Владимировна Жук — младший научный сотрудник, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, 634050, Россия; Scopus ID: 57220209566; https://orcid.org/0000-0002-7957-583X; klavdiia.v.korotkova@tusur.ru

Серафим Всеволодович Смирнов — доктор технических наук, профессор, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, 634050, Россия; Scopus ID: 52164551900; https://orcid.org/0000-0002-7993-162X; serafim.smirnov@mail.ru

AUTHORS

Klavdiya V. Zhuk — Junior Research Fellow, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, 634050, Russia; Scopus ID: 57220209566; https://orcid.org/0000-0002-7957-583X; klavdiia.v.korotkova@tusur.ru

Serafim V. Smirnov — Doctor of Technical Sciences (Habilitation), Professor, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, 634050, Russia; Scopus ID: 52164551900; https://orcid.org/0000-0002-7993-162X; serafim.smirnov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 01.02.2023
Одобрена после рецензирования 17.04.2023
Принята к печати 29.05.2023

The article was submitted to the editorial office 01.02.2023
Approved after review 17.04.2023
Accepted for publication 29.05.2023