

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ. ДИЭЛЕКТРИКИ /
MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY. DIELECTRICS**

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2023. Т. 26, № 4. С. 272—278.

DOI: 10.17073/1609-3577j.met202308.551

УДК 535.341; 621.315

**Влияние легирования на оптические свойства кристаллов
лантан–галлиевого танталата**© 2023 г. Е. В. Забелина¹✉, Н. С. Козлова¹, О. А. Бузанов²¹ *Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация*² *АО «Фомос–Материалы»,
Буженинова, д. 16, стр. 1, Москва, 107023, Российская Федерация*

✉ Автор для переписки: zabelina.ev@misis.ru

Аннотация. Методом Чохральского из иридиевых тиглей в атмосферах аргона и аргона с кислородом выращены кристаллы лантан–галлиевого танталата $\text{La}_3\text{Ga}_{5,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_{14}$, номинально чистые, легированные алюминием, кремнием, и с добавлением количества оксида галлия выше стехиометрического. Измерены спектральные зависимости пропускания $T(\lambda)$ образцов этих кристаллов на UV–Vis–NIR спектрофотометре Cary–5000 в диапазоне длин волн 200–800 нм. На основании экспериментальных данных построены спектральные зависимости поглощения $\alpha(\lambda)$. На спектральных зависимостях поглощения нелегированных кристаллов, выращенных в бескислородной атмосфере, наблюдается одна слабая полоса поглощения в области длины волны $\lambda \sim 290$ нм. В случае кристаллов, полученных в атмосфере аргона с кислородом, на спектральных зависимостях поглощения наблюдаются полосы в области длин волн $\lambda \sim 290$, 360 и 480 нм. Показано, что в случае кристаллов, выращенных в бескислородной атмосфере аргона, внесение галлия выше стехиометрического состава приводит к снижению интенсивности единственной полосы поглощения при $\lambda \sim 290$ нм. Легирование алюминием кристаллов $\text{La}_3\text{Ga}_{5,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_{14}$ при выращивании их в бескислородной атмосфере обуславливает существенное усиление этой полосы поглощения, дополнительно усиливаются полосы при $\lambda \sim 360$ и 480 нм. В случае выращивания кристаллов $\text{La}_3\text{Ga}_{5,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_{14}$ в кислородсодержащей атмосфере легирование алюминием ведет к снижению интенсивности полос поглощения при $\lambda \sim 360$ и 480 нм и усилению интенсивности полосы при $\lambda \sim 290$ нм. Легирование кремнием таких кристаллов существенно ослабляет полосы при $\lambda \sim 480$ нм, также наблюдается ослабление интенсивности полос при $\lambda \sim 290$ и 360 нм.

Ключевые слова: монокристаллы, лантан–галлиевый танталат, легирование оптические свойства, спектрофотометрия, пропускание, поглощение

Благодарности: Исследования проводились при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания вузам FSME–2023–0003. Измерения проведены в МУИЛ полупроводниковых материалов и диэлектриков «Монокристаллы и заготовки на их основе» (ИЛМЗ) НИТУ МИСИС.

Для цитирования: Забелина Е.В., Козлова Н.С., Бузанов О.А. Влияние легирования на оптические свойства кристаллов лантан–галлиевого танталата. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.* 2023; 26(4): 272—278. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202308.551>

Effect of doping on the optical properties of lanthanum–gallium tantalate

E. V. Zabelina¹✉, N. S. Kozlova¹, O. A. Buzanov²

¹ *National University of Science and Technology MISIS,
4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation*

² *JSC Fomos–Materials, 16–1 Buzheninova Str., Moscow 107023, Russian Federation*

✉ Corresponding author: zabelina.ev@misis.ru

Abstract. Nominally pure lanthanum–gallium tantalate $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$ crystals doped with aluminum, silicon and gallium oxide to above stoichiometric content have been grown by the Czochralski technique in iridium crucibles in argon and argon + oxygen atmospheres. The transmittance spectra of the crystals have been recorded on a Cary–5000 UV–Vis–NIR spectrophotometer in the 200–800 nm range. Absorption spectra $\alpha(\lambda)$ have been plotted on the basis of the experimental data. The absorption spectra of the undoped crystals grown in an oxygen–free atmosphere have one weak absorption band at $\lambda \sim 290$ nm. The absorption spectra of the crystals grown in an argon+oxygen atmosphere have absorption bands at $\lambda \sim 290$, 360 and 480 nm. We show that for the crystals grown in an oxygen–free atmosphere, gallium doping to above stoichiometric content reduces the intensity of its only $\lambda \sim 290$ nm absorption band. Aluminum doping of the $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$ crystals grown in an oxygen–free atmosphere significantly reduces the intensity of the $\lambda \sim 290$ nm absorption band and increases the intensity of the $\lambda \sim 360$ and 480 nm bands. Aluminum doping of the $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$ crystals grown in an oxygen–containing atmosphere reduces the intensity of the $\lambda \sim 360$ and 480 nm bands and increases the intensity of the $\lambda \sim 290$ nm absorption band. Silicon doping of these crystals significantly reduces the intensity of the $\lambda \sim 480$ nm band and also reduces the intensity of the $\lambda \sim 290$ and 360 nm bands.

Keywords: single crystal, lanthanum–gallium tantalate, doping, optical properties, spectrophotometry, transmittance, absorption

Acknowledgments: The experiments were carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of Russia as part of the state assignment for universities FSME–2023–0003 at the Inter–University Test Laboratory for semiconductors and dielectrics “Single Crystals and Stock on their Base” of the National University of Science and Technology “MISIS”.

For citation: Zabelina E.V., Kozlova N.S., Buzanov O.A. Effect of doping on the optical properties of lanthanum–gallium tantalate. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2023; 26(4): 272–278. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202308.551>

Введение

Кристаллы лантан–галлиевого танталата ($\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$, ЛГТ) относятся к группе кристаллов со структурой кальций–галлиевого германата, точечная симметрия 32. Структура ЛГТ может быть представлена химической формулой $\text{A}_3\text{BC}_3\text{D}_2\text{O}_{14}$. Позиции А в виде томпсоновских скрученных кубов занимают ионы лантана La^{3+} . Октаэдрические позиции В занимают ионы галлия Ga^{3+}

и тантала Ta^{5+} . Большую и меньшую тетраэдрические позиции С и D занимают ионы галлия Ga^{3+} [1–3]. ЛГТ успешно применяют в качестве рабочих элементов устройств, работающих на пьезоэффекте [4–7]. Такой элемент преобразует механическую энергию в электрическую, что позволяет создавать датчики давления, температуры, вибрации, массы, скорости потоков и т. д. Пьезодатчики миниатюрны и не нуждаются во внешнем источнике энергии. В оптике ЛГТ может найти применение в

© 2023 National University of Science and Technology “MISIS”.

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

качестве матрицы для легирования редкоземельными и переходными элементами [8—16], для генерации второй гармоники [17—19] и создания электрооптических элементов [20]. Все это требует достижения высокого качества кристаллов, сохраняющегося с течением времени, что должно обеспечить стабильность работы устройств на их основе. Получение монокристаллов со структурой кальций–галлиевого германата больших размеров и высокого качества все еще является непростой задачей [6, 21].

Дефектные центры, имеющиеся в кристаллах, могут проявляться на спектральных зависимостях пропускания в виде полос поглощения. Установлено [22], что атмосфера выращивания оказывает определяющее влияние на спектральные зависимости пропускания кристаллов ЛГТ. В случае выращивания кристаллов в бескислородной атмосфере на спектральных зависимостях пропускания в ближней ультрафиолетовой и видимой областях спектра наблюдается одна слабовыраженная полоса поглощения в области $\lambda \sim 290$ нм. При добавлении в атмосферу выращивания кислорода, интенсивность этой полосы поглощения усиливается, дополнительно появляются полосы поглощения при $\lambda \sim 360$ и 480 нм. Наличие полосы поглощения при $\lambda \sim 480$ нм обуславливает желто–оранжевую окраску кристаллов.

Известно [23, 24], что в процессе выращивания кристаллов ЛГТ наблюдается испарение оксидов галлия, приводящее к появлению в кристалле значительных концентраций вакансий галлия и кислорода. Кроме этих процессов, в ростовой камере параллельно идут и другие. Так, часть кислорода расходуется на окисление материала тигля (иридия), а также на доокисление исходной шихты, поскольку в шихте могут присутствовать в следовом количестве недоокисленные компоненты. Эти процессы увеличивают недостаток кислорода в системе.

Природа дефектных центров в кристаллах ЛГТ еще не окончательно определена.

В работе [25] были проведены экспериментальные исследования спектральных зависимостей пропускания кристаллов ЛГТ, выращенных в разных атмосферах и подвергнутых послеростовым отжигам на воздухе и в вакууме, а также структурные исследования образцов методами диффузного рассеяния рентгеновских лучей и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. На основании результатов, полученных в работе [25], и литературных данных по высокотемпературному поведению оксидов галлия [26], было установлено, что полоса поглощения в видимой области спектра при $\lambda \sim 480$ нм обусловлена наличием в кристаллах дефектов типа F–центров ($V_o^{++} + 2e$) и их комплексов. Природа двух других

полос поглощения в ближней ультрафиолетовой области спектра при $\lambda \sim 290$ и 360 нм пока не ясна.

Летучесть галлиевых оксидов очень чувствительна к парциальному давлению кислорода в ростовой камере [26], и эта зависимость нелинейна относительно процентного содержания кислорода в атмосфере роста. Регулируя парциальное давление в ростовой камере, можно влиять на испарение оксида галлия, и, следовательно, на преимущественное формирование определенного типа дефектных комплексов в кристаллах. Однако наличие кислорода в ростовой камере приводит к окислению тигля [27].

Другим путем устранения недостатка галлия в кристаллах является добавление его оксида в начальную загрузку в количестве, выше стехиометрического состава.

Можно было бы предложить легировать кристаллы ЛГТ элементами, близкими по ионному радиусу к галлию, но менее летучими. Такими элементами могут быть алюминий и кремний. Галлий в структуре ЛГТ может занимать октаэдрические и тетраэдрические позиции. Ионный радиус Ga^{3+} в октаэдрической позиции составляет $0,62$ нм, в тетраэдрической — $0,47$ нм; ионные радиусы Si^{4+} — $0,40$ и $0,26$ нм соответственно, а Al^{3+} — $0,54$ и $0,39$ нм [28]. Согласно данным об испарении оксидов галлия, алюминия и кремния [26, 29, 30], оксиды кремния и алюминия при одинаковых условиях характеризуются более низкими интенсивностями улетучивания по сравнению с оксидами галлия.

Цель работы — определение влияния на оптические свойства кристаллов ЛГТ легирования алюминием, кремнием и добавления количества галлия выше стехиометрического состава при выращивании их в разных атмосферах.

Образцы и методы исследования

Рост кристаллов ЛГТ и подготовку образцов осуществляла компания АО «Фомос–Материалы». Начальную шихту получали методом твердофазного высокотемпературного синтеза с использованием следующих исходных компонентов: пятиокись тантала, оксиды лантана и галлия с чистотой не хуже $99,99\%$ (4N). Кристаллы выращивали методом Чохральского в модифицированной установке «Кристалл–3М» в иридиевых тиглях. Плавление исходной шихты и рост кристаллов проводили в защитной атмосфере чистого аргона (Ar) и аргона с добавлением до 2% (об.) кислорода (Ar + O₂). В атмосфере аргона выращивали нелегированные номинально чистые кристаллы, кристаллы с добавкой галлия выше стехиометрического состава, а также кристаллы, легированные алюминием. При добавлении в атмосферу выращивания кис-

лорода были получены номинально чистые кристаллы и кристаллы, легированные алюминием или кремнием. Все выращенные кристаллы были прозрачными, не имели трещин и других видимых дефектов, а также рассеивающих центров в пучке He—Ne—лазера. Из этих кристаллов были подготовлены образцы в виде пластин толщиной ~2 мм, полированные с двух сторон.

Оптические свойства образцов исследовали в аккредитованной испытательной лаборатории «Монокристаллы и заготовки на их основе» НИТУ МИСИС (аттестат аккредитации № ААЦ.Т.00038). Спектральные зависимости пропускания $T(\lambda)$ образцов измерены при комнатной температуре на UV–Vis–NIR спектрофотометре Cary–5000 в диапазоне длин волн 200—800 нм. Точность измерения $T(\lambda)$ была не хуже 1%. На основании полученных экспериментальных данных рассчитывали спек-

тральные зависимости показателей поглощения $\alpha(\lambda)$ по формуле

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln T, \quad (1)$$

где d — толщина образца, см.

Результаты и их обсуждение

Образцы всех кристаллов ЛГТ, полученных в бескислородной атмосфере, были бесцветными, независимо от легирования. Образцы кристаллов, выращенных в атмосфере с добавлением кислорода, характеризовались оранжевой окраской, кроме образцов кристаллов, легированных кремнием, которые также были бесцветными.

Спектральные зависимости поглощения образцов ЛГТ представлены на рис. 1. На спектральных

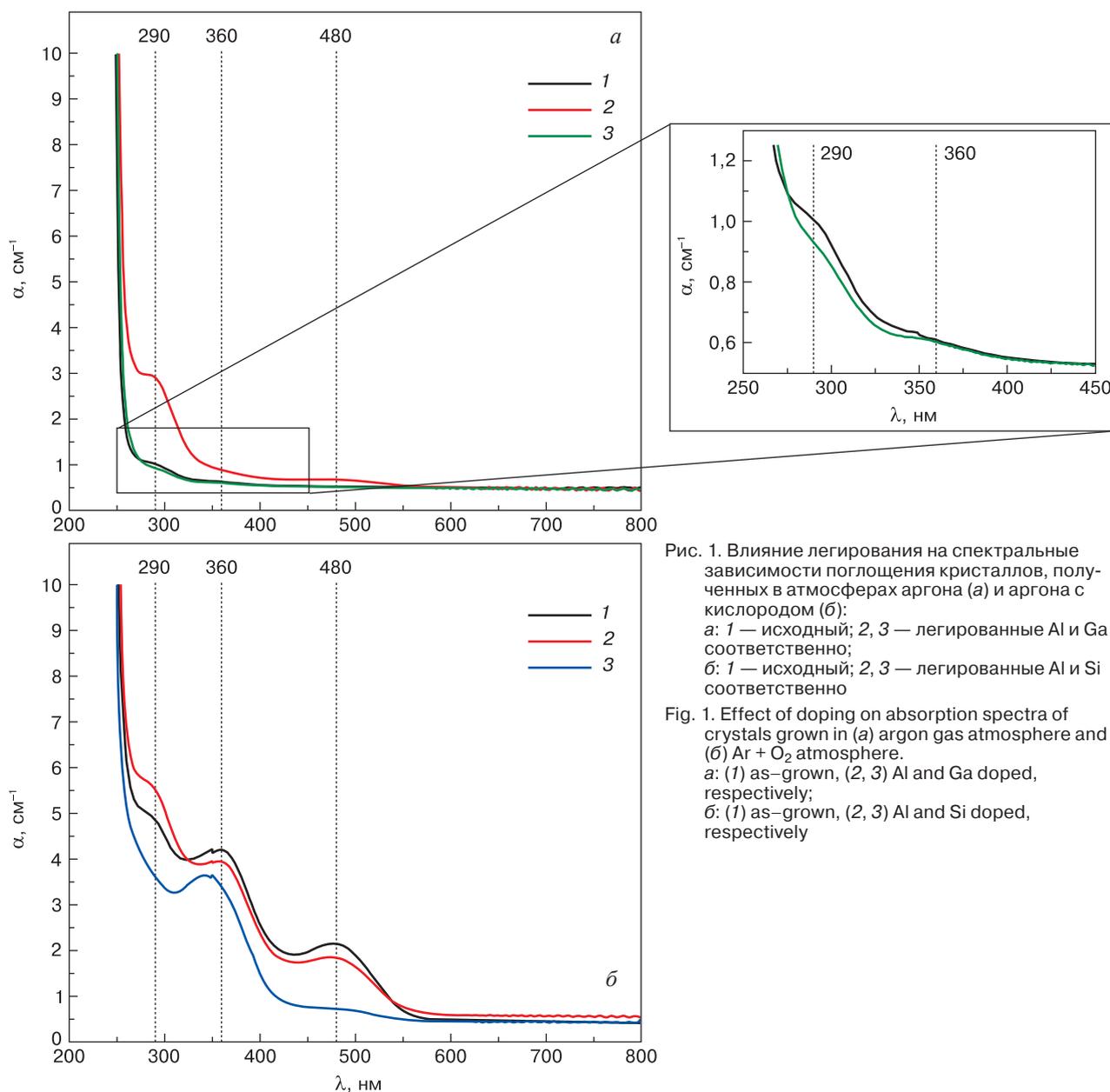


Рис. 1. Влияние легирования на спектральные зависимости поглощения кристаллов, полученных в атмосферах аргона (а) и аргона с кислородом (б): а: 1 — исходный; 2, 3 — легированные Al и Ga соответственно; б: 1 — исходный; 2, 3 — легированные Al и Si соответственно

Fig. 1. Effect of doping on absorption spectra of crystals grown in (a) argon gas atmosphere and (b) Ar + O₂ atmosphere. a: (1) as-grown, (2, 3) Al and Ga doped, respectively; б: (1) as-grown, (2, 3) Al and Si doped, respectively

зависимостях поглощения нелегированных кристаллов ЛГТ, выращенных в атмосфере аргона, наблюдается единственная слабая полоса поглощения в области $\lambda \sim 290$ нм (см. рис. 1, а). В случае выращивания кристаллов в атмосфере аргона с кислородом, наблюдаются три полосы поглощения при $\lambda \sim 290, 360$ и 480 нм (см. рис. 1, б).

Добавление оксида галлия в количестве выше стехиометрического в случае выращивания кристаллов в атмосфере аргона приводит к некоторому ослаблению интенсивности полосы поглощения в области $\lambda \sim 290$ нм (см. рис. 1, а, выноска).

Легирование алюминием кристаллов ЛГТ при выращивании их в бескислородной атмосфере приводит к существенному ухудшению оптического качества таких кристаллов: резко усиливается поглощение в области полосы с $\lambda \sim 290$ нм, увеличивается поглощение на длине волны $\lambda \sim 360$ нм, появляется полоса при $\lambda \sim 480$ нм (см. рис. 1, а). Существенное усиление интенсивности полос поглощения свидетельствует об увеличении концентрации дефектных комплексов.

Легирование алюминием при выращивании кристаллов в атмосфере аргона с кислородом, приводит к значительному увеличению интенсивности полосы поглощения в области $\lambda \sim 290$ нм, при этом интенсивность полос при $\lambda \sim 360$ и 480 нм несколько снижается (см. рис. 1, б).

В случае выращивания ЛГТ в кислородсодержащей атмосфере при добавлении в исходную загрузку кремния на спектральных зависимостях поглощения наблюдается увеличение пропускания во всем исследованном диапазоне длин волн. Наиболее существенный эффект наблюдается при $\lambda \sim 490$ нм — интенсивность этой полосы резко снижается (см. рис. 1, б).

Таким образом, к улучшению оптического качества кристаллов ЛГТ при их выращивании в атмосфере аргона приводит добавление галлия в количестве выше стехиометрического. В случае выращивания кристаллов в кислородсодержащей атмосфере легирование кремнием приводит к снижению интенсивности поглощения в области всех трех полос, особенно существенное снижение наблюдается в области полосы поглощения при $\lambda \sim 490$ нм.

Заключение

В атмосферах аргона и аргона с добавлением кислорода выращены номинально чистые кристаллы ЛГТ, а также кристаллы ЛГТ, легированные алюминием, кремнием и с добавлением галлия в количестве выше стехиометрического состава.

Исследование кристаллов методом спектроскопии показало, что наиболее оптически совершенными являются кристаллы ЛГТ, полученные

в атмосфере аргона. Спектральные зависимости пропускания таких кристаллов характеризуются наличием одной выраженной полосы поглощения в области 290 нм. Кристаллы ЛГТ, полученные в атмосфере аргона с кислородом, оптически менее совершенны, на спектрах пропускания таких кристаллов наблюдаются три ярко выраженные полосы в области длин волн $\lambda \sim 290, 360$ и 480 нм.

Установлены пути снижения интенсивности полос поглощения на спектральных зависимостях пропускания. Так, к снижению интенсивности единственной полосы поглощения в области $\lambda \sim 290$ нм в кристаллах ЛГТ, выращенных в атмосфере аргона, приводит добавление в исходную загрузку галлия в количестве выше стехиометрического состава. При выращивании кристаллов ЛГТ в аргоно-кислородной атмосфере легирование кристаллов кремнием приводит к увеличению пропускания в области всех трех полос поглощения и существенному снижению интенсивности поглощения в области полосы при $\lambda \sim 490$ нм.

Легирование алюминием приводит к ухудшению оптического качества кристаллов ЛГТ, выращенных в бескислородной атмосфере: на спектральных зависимостях пропускания существенно усиливается поглощение в области $\lambda \sim 290$ нм, появляются полосы при $\lambda \sim 360$ и 480 нм. В случае выращивания кристаллов в атмосфере аргона с кислородом легирование алюминием также приводит к усилению поглощения в области $\lambda \sim 290$ нм, интенсивность поглощения в области полос с $\lambda \sim 360$ и 480 нм снижается.

Библиографический список / References

1. Dorogovin B.A., Stepanov S.Yu., Semenkovich G.V., Doubovski A.B., Philippov I.M., Buglov Yu.P., Danilova G.K. Homogeneity of elastic properties of Lanthanum Gallium Silicate Crystals. *Proceedings of the 2000 IEEE/EIA International Frequency Control Symposium and Exhibition (Cat. No.00CH37052)*. 2000; 195—199. <https://doi.org/10.1109/FREQ.2000.887353>
2. Takeda H., Sugiyama K., Inaba K., Shimamura K., Fukuda T. Crystal growth and structural characterization of new piezoelectric material $\text{La}_3\text{Ta}_{0.5}\text{Ga}_{5.5}\text{O}_{14}$. *Japanese Journal of Applied Physics*. 1997; 36(2, 7B): L919—L921. <https://doi.org/10.1143/jjap.36.L919>
3. Alani M., Batis N., Laroche T., Nehari A., Cabane H., Lebbou K., Boy J.J. Influence of the growth and annealing atmosphere on the electrical conductivity of LGT crystals. *Optical materials*. 2017; 65: 99—102. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2016.09.072>
4. Zhang S., Yu F. Piezoelectric materials for high temperature sensors. *Journal of the American Ceramic Society*. 2011; 94(10): 3153—3170. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2011.04792.x>
5. Yu F.-P., Chen F.-F., Hou S., Wang H.-W., Wang Y.A., Tian S.-W., Jiang C., Li Y.-L., Cheng X.-F., Zhao X. High temperature piezoelectric single crystals: Recent developments. *2016 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves,*

- and Device Applications (SPAWDA). 2016; 1—7. <https://doi.org/10.1109/SPAWDA.2016.7829944>
6. Nehari A., Alombert–Goget G., Benamara O., Cabane H., Dumortier M., Jeandel P., Lasloudji I., Mokhtari F., Baron T., Wong G., Allani M., Boy J., Alzuaga S., Arapan L., Gegot F., Dufar T., Lebbou K. Czochralski crystal growth and characterization of large langatate ($\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$, LGT) crystals for SAW applications. *CrystEngComm*. 2019; 21: 1764—1771. <https://doi.org/10.1039/C8CE02157K>
 7. Takeda H., Tanaka S., Izukawa S., Shimizu H., Nishida T., Shiosaki T. Effective substitution of aluminum for gallium in langasite-type crystals for a pressure sensor use at high temperature. *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium*. 2005; 1: 560—563. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2005.1602915>
 8. Каминский А.А. Физика и спектроскопия лазерных кристаллов. М.: Наука; 1986. 271 с.
 8. Kaminskii A.A. Physics and spectroscopy of laser crystals. Moscow: Nauka; 1986. 271 p. (In Russ.)
 9. Georgescu S., Toma O., Chinie A.M., Gheorghe L., Achim A., Stefan A.S. Spectroscopic characteristics of langasite ($\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$) and langatate ($\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$) crystals doped with Eu^{3+} . *Optical Materials*. 2008; 30(6): 1007—1012. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2007.05.035>
 10. Georgescu S., Toma O., Gheorghe L., Achim A., Chinie A.M., Stefan A. Disorder effects in the fluorescence spectra of Eu^{3+} in langatate ($\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$) crystals. *Optical Materials*. 2007; 30(2): 212—215. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2006.10.027>
 11. Georgescu S., Toma O., Voiculescu A.M., Matei C., Birjega R., Petrescu L. Infrared-excited bright green and red luminescence in $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$ doped with erbium and ytterbium. *Physica B: Condensed Matter*. 2012; 407(7): 1124—1127. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2012.0>
 12. Georgescu S., Voiculescu A.M., Mateia C., Stefana A.G., Toma O. Violet and near-ultraviolet upconversion luminescence in $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$ codoped with Er^{3+} and Yb^{3+} . *Physica B: Condensed Matter*. 2013; 413: 55—58. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2012.12.045>
 13. Komar J., Lisiecki R., Ryba–Romanowski W., Berkowski M. Spectroscopic characterization of Sm^{3+} in $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$ single crystals. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014; 610: 50—54. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.04.191>
 14. Komar J., Lisiecki R., Ryba–Romanowski W., Berkowski M. Effect of temperature on excited state relaxation dynamics and up-conversion phenomena in $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}:\text{Er}^{3+}$ single crystals. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014; 610: 451—455. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.05.016>
 15. Lisiecki R., Ryba–Romanowski W., Macalik L., Komar J., Berkowski M. Optical study of $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$ single crystal co-doped with Ho^{3+} and Yb^{3+} . *Applied Physics B*. 2014; 116(1): 183—194. <https://doi.org/10.1007/s00340-013-5674-0>
 16. Voiculescu A.M., Georgescu S., Matei C., Stefan A., Toma O. Synthesis and characterization of $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$ doped with holmium and ytterbium. *Romanian Journal of Physics*. 2015; 60(3–4): 495—501. https://rjp.nipne.ro/2015_60_3-4/RomJPhys.60.p495.pdf
 17. Zverev P.G., Shilova G.V. Investigation of the second order nonlinear susceptibility in langasite and langatate crystals. *Laser Physics Workshop 2015. Book of abstracts. Seminar 5*. 2015.
 18. Boursier E., Segonds P., Boulanger B., Félix C., Debray J., Jegouso D., Ménaert B., Roshchupkin D., Shoji I. Phase-matching directions, refined Sellmeier equations, and second-order nonlinear coefficient of the infrared Langatate crystal $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$. *Optics Letters*. 2014; 39(13): 4033—4036. <https://doi.org/10.1364/OL.39.004033>
 19. Kaminskii A.A., Butashin A.V., Maslyanitsin I.A., Shigorin V.D. Nonlinear optical properties of acentric crystals with Ca–gallogermanate structure. *Physica Status Solidi (a)*. 1989; 112(1): K49—K52. <https://doi.org/10.1002/pssa.2211120172>
 20. Stade J., Bohaty L., Hengst M., Heimann R.B. Electro-optic, piezoelectric and dielectric properties of langasite ($\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$), langanite ($\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_{14}$) and langataite ($\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$). *Crystal Research & Technology*. 2002; 37(10): 1113—1120. [https://doi.org/10.1002/1521-4079\(200210\)37](https://doi.org/10.1002/1521-4079(200210)37)
 21. Allani M., Batis N., Laroche T., Nehari A., Cabane H., Lebbou K., Vacheret X., Boy J.J. Effects of the Langatate crystal quality on the resonance frequency stability of bulk acoustic wave resonators. *Advances in Applied Ceramics. Structural, Functional and Bioceramics*. 2017; 279—284. <https://doi.org/10.1080/17436753.2018.1447756>
 22. Buzanov O.A., Zabelina E.V., Kozlova N.S. Optical properties of lanthanum–gallium tantalate at different growth and post-growth treatment conditions. *Crystallography Reports*. 2007; 52(4): 691—696. <https://doi.org/10.1134/S1063774507040177>
 23. Buzanov O.A., Naumov A.V., Nechaev V.V., Kn-yazev S.N. A new approach to the growth of langasite crystals. *Proceedings of 1996 IEEE International Frequency Control Symposium*. 1996; 131—136. <https://doi.org/10.1109/FREQ.1996.559832>
 24. Uda S., Wang S.Q., Konishi N., Inaba H., Harada J. Growth habits of 3 and 4-inch langasite single crystals. *Journal of Crystal Growth*. 2002; 237–239(1): 707—713. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(01\)02007-3](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(01)02007-3)
 25. Забелина Е.В. Неоднородности в кристаллах лантан–галлиевого танталата и их влияние на оптические свойства. Дисс. ... канд. физ.–мат. наук. М., 2018. 150 с. <https://misis.ru/science/dissertations/2018/3392/>
 25. Zabelina E.V. Heterogeneities in lanthanum–gallium tantalate crystals and their effect on optical properties. Diss. ... Cand. Sci. (Phys.–Math.). Moscow; 2018. 150 p. (In Russ.) <https://misis.ru/science/dissertations/2018/3392/>
 26. Lamoreaux R.H., Hildenbrand D.L., Brewer L. High-temperature vaporization behavior of oxide II. Oxides of Be, Mg, Ca, Sr, Ba, B, Al, Ga, In, Tl, Si, Ge, Sn, Pb, Zn, Cd and Hg. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. 1987; 16(3): 419—443. <https://doi.org/10.1063/1.555799>
 27. Bohm J., Heimann R.B., Hengst M., Roewer R., Schindler J. Czochralski growth and characterization of piezoelectric single crystals with langasite structure: $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ (LGS), $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_{14}$ (LGN) and $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$ (LGT). Part I. *Journal of Crystal Growth*. 1999; 204: 128—136. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(99\)00186-4](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(99)00186-4)
 28. Database of Ionic Radii <http://abulafia.mt.ic.ac.uk/shannon/>
 29. Burns R.P., Jason A.J., Inghram M.G. Discontinuity in the rate of evaporation of aluminum oxide. *Journal of Chemical Physics*. 1964; 40(9): 2739—2740. <https://doi.org/10.1063/1.1725595>
 30. Burns R.P. Systematics of the Evaporation Coefficient Al_2O_3 , Ga_2O_3 , In_2O_3 . *Journal of Chemical Physics*. 1966; 44(9): 3307—3319. <https://doi.org/10.1063/1.1727229>

Информация об авторах / Information about the authors

Забелина Евгения Викторовна — канд. физ.–мат. наук, научный сотрудник, лаборатория «Монокристаллы и заготовки на их основе», Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5844-5673>; e-mail: zabelina.ev@misis.ru

Козлова Нина Семеновна — канд. физ.–мат. наук, ведущий эксперт, лаборатория «Монокристаллы и заготовки на их основе», Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4057-9718>; e-mail: kozlova_nina@mail.ru

Бузанов Олег Алексеевич — канд. техн. наук, главн. науч. сотрудник, АО «Фомос-Материалы», Буженинова, д. 16, стр. 1, Москва, 107023, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7532-5710>; e-mail: buzanov@newpiezo.com

Evgenia V. Zabelina — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Researcher, National University of Science and Technology “MISIS”, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5844-5673>; e-mail: zabelina.ev@misis.ru

Nina S. Kozlova — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Leading Expert, National University of Science and Technology “MISIS”, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4057-9718>; e-mail: kozlova_nina@mail.ru

Oleg A. Buzanov — Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, JSC Fomos–Materials, 16–1 Buzheninova Str., Moscow 107023, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7532-5710>; e-mail: buzanov@newpiezo.com

*Поступила в редакцию 14.08.2023; поступила после доработки 30.09.2023; принята к публикации 17.05.2023
Received 14 August 2023; Revised 30 September 2023; Accepted 17 November 2023*

* * *