

06

## Влияние облучения электронами с энергией 0.9 MeV на электрофизические параметры кристаллов $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

© Д.А. Бауман,<sup>1</sup> К.С. Давыдовская,<sup>2</sup> Д.Ю. Панов,<sup>1</sup> В.А. Спиридонов,<sup>1</sup> П.А. Богданов,<sup>1</sup> В.В. Лундин,<sup>2</sup> Е.Ю. Лундина,<sup>4</sup> А.Е. Романов,<sup>1,2</sup> В.В. Козловский,<sup>2,3</sup> А.А. Лебедев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет ИТМО,  
197101 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
195251 Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup> ООО „Монолюм“, 194214 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: dabauman@itmo.ru

Поступило в Редакцию 19 декабря 2025 г.

В окончательной редакции 10 мая 2026 г.

Принято к публикации 12 мая 2026 г.

Проведено исследование изменения свойств объемных кристаллов  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, выращенных методом Чохральского, при облучении электронами с энергией 0.9 MeV. С помощью вольт-фарадных измерений была измерена концентрация носителей. Обнаружено, что скорость удаления носителей зависит от дозы облучения и уменьшается почти на порядок. Методом нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней исследован спектр глубоких уровней в кристалле до и после облучения. Анализ спектров оптического пропускания показал уменьшение поглощения в длинноволновой области после облучения.

**Ключевые слова:** оксид галлия,  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, облучение электронами, радиационная стойкость.

DOI: 10.61011/JTF.2026.08.63404.340-25

### Введение

В последние годы усилился интерес к исследованию свойств и развитию технологии нового широкозонного полупроводника  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Благодаря своим уникальным физическим параметрам (ширина запрещенной зоны 4.8 eV; критическая напряженность электрического поля пробоя  $8 \cdot 10^6$  V/cm; скорость насыщения  $2 \cdot 10^7$  cm/s) этот материал рассматривается как перспективный для создания приборов силовой электроники нового поколения [1]. Специфика применения подобных приборов предполагает в том числе их использование в средах с высоким уровнем ионизирующего излучения. Поэтому представляется важным изучение влияния облучения потоками частиц высоких энергий на свойства выращенных кристаллов.

В последнее десятилетие опубликовано достаточно много работ, посвященных изучению оксида галлия, где авторы исследуют изменение свойств Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при облучении потоком нейтронов [2], протонов [3], тяжелых ионов [4] или гамма-излучения [5,6]. Также имеется целый ряд работ по облучению оксида галлия и приборов на его основе электронами [7–11]. В работе [7] исследовалось влияние электронного облучения с энергией 1 MeV и флюенсом  $10^{16}$  cm<sup>-2</sup> на диоды Шоттки на основе  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. В работе [8] было изучено влияние облучения электронами с энергиями 0.5 и 2.5 MeV на оксид галлия, легированный Zn и Hf. В работе [9], в числе прочего, наблюдалось резкое возрастание пика фото-

люминесценции  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (400 nm) под действием пучка электронов с энергией 1 MeV и флюенсом  $10^{16}$  cm<sup>-2</sup>, что предположительно объяснялось генерацией и излучательной рекомбинацией донорно-акцепторных пар; при этом природа акцепторов не уточнялась. Работа [10] посвящена изучению изменения характеристик фотоприемника на основе  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> под действием облучения электронами с энергией 1 MeV. При этом наблюдался обратный по сравнению с работой [9] эффект снижения интенсивности фотолюминесценции в том же диапазоне длин волн (400–530 nm). Наконец, в работе [11] наблюдался эффект уменьшения концентрации свободных электронов в  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> после облучения материала пучком электронов с энергией 2.5 MeV. Авторы предположили, что причиной наблюдаемого эффекта может быть генерация вакансий галлия (выступающих в качестве ловушек для электронов) под действием потока электронов высоких энергий. В целом, при некотором противоречии полученных результатов во всех работах прямо или косвенно наблюдается снижение концентрации электронов проводимости после облучения пучком электронов, в общем случае объясняемое компенсацией возникающими акцепторными центрами. В настоящей работе мы провели аналогичный эксперимент, облучив объемные кристаллы пучком электронов с энергией 0.9 MeV тремя разными дозами, оценив скорость удаления носителей и энергию активации наблюдавшихся глубоких центров.

## 1. Методика эксперимента

В настоящей работе были исследованы объемные кристаллы  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ , выращенные методом Чохральского на промышленной ростовой установке „Ника-3“ (производства ЭЗАН, Черногловка) с индукционным нагревом тигля. В качестве исходного материала использовался порошкообразный  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ . Чистота материала составляла 99.999 % (5N). Для расплава использовался тигель, изготовленный из иридия. В качестве затравок использовались фрагменты  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  в виде брусков размерами примерно  $3 \times 3 \times 30$  mm, полученные из ранее выращенных кристаллов. В ростовых экспериментах использовался ранее подобранный [12] состав атмосферы, состоящий из смеси Ar и  $\text{O}_2$ . Содержание кислорода составляло 5 vol.%, давление в ростовой камере составляло около 1.1 bar. Рост проводился при температуре около 1850 °C. Скорость вращения кристалла в процессе выращивания составляла 5 rpm, скорость вытягивания — около 6 mm/h.

Для исследований были изготовлены образцы в виде тонких пластин, в количестве 5 штук, толщиной от 0.4 до 0.5 mm и линейными размерами около  $10 \times 10$  mm, выколотые из центра объемного кристалла (були) вдоль плоскости спайности (100). Метод приготовления образцов подробно описан в [13]. Как показывают предыдущие эксперименты, образцы объемных кристаллов  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ , выращенные описанным выше методом, имеют фоновое легирование кремнием на уровне приблизительно  $1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  и обладают  $n$ -типом проводимости. Для проведения электрических измерений на поверхности образцов были изготовлены контакты Шоттки (с одной стороны образца) и омические (с противоположной). Круглые барьерные контакты (контакты Шоттки) диаметром 600  $\mu\text{m}$  формировались методом термического напыления через маску пленки Au толщиной 30 nm. Омический контакт формировался напылением двухслойного контакта Ti/Au (диаметром 4 mm с толщинами слоев 10/20 nm соответственно) с последующим отжигом при 600 °C в атмосфере азота. На один омический контакт, таким образом, приходилось 5–6 контактов Шоттки с противоположной стороны. Перед изготовлением контактов все образцы прошли очистку в изопропиловом спирте в ультразвуковой ванне с последующей отмывкой в дистиллированной воде и сушкой при 50 °C в азотной среде.

Облучение исследуемых образцов электронами с энергией 0.9 MeV проводили на импульсном ускорителе электронов „РТЭ-1В“. Частота импульсов составляла 490 Hz, а длительность импульса — 330  $\mu\text{s}$ . Облучение проводили на охлаждаемой проточной водой мишени. Температура мишени контролировалась и поддерживалась на уровне 20 °C.

Вольт-фарадные измерения ( $C-V$ ) проводились на измерителе иммитанса E7-20 LCR на частоте 100 kHz при комнатной температуре. Измерения нестационарной

емкостной спектроскопии глубоких уровней происходили на установке CE-8C компании Omnitel, работающей по принципам, описанным Д.В. Лангом. Для этого образец помещался в инерционный вакуумный криостат с прижимным контактом сверху и измерительным токопроводящим столиком снизу. Для охлаждения образца часть криостата помещалась в сосуд Дьюара с жидким азотом, а для получения высоких температур использовался нагревательный элемент, расположенный под токопроводящим столиком. Инерционный криостат позволял проводить измерения в диапазоне температур от 78 до 770 K. В настоящей работе для сохранности контактов образцов, а также дефектов, вызванных облучением, образцы нагревались только до 400 K. Спектры оптического пропускания были получены на спектрофотометре PerkinElmer Lambda 1050 с шагом 1 nm по длине волны.

## 2. Результаты и обсуждение

Длина свободного пробега электрона с энергией 0.9 MeV в  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  составляет приблизительно 0.6 mm [14]. Средняя плотность тока пучка электронов составляла  $12.5 \mu\text{A/cm}^2$ . Поскольку длина пробега электронов заметно больше толщины облучаемых образцов, можно считать, что при таком облучении дефекты вводились равномерно по всему объему образцов. Облучение проводилось при комнатной температуре  $T = 20$  °C. Все образцы облучались трижды: сперва с флюенсом  $D_1 = 2.0 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ , затем с флюенсом  $D_2 = 0.7 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  и затем с флюенсом  $D_3 = 1.0 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ . Суммарный флюенс составил  $D_{\text{sum}} = 1.27 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ . После каждого облучения были получены вольт-фарадные характеристики ( $C-V$ ) образцов. На основании этих измерений определялось значение концентрации нескомпенсированных доноров ( $N_d - N_a$ ) и рассчитывалась скорость удаления носителей ( $V_d$ ) по формуле

$$V_d = \frac{[(N_d - N_a)_0 - (N_d - N_a)_1]}{D}, \quad (1)$$

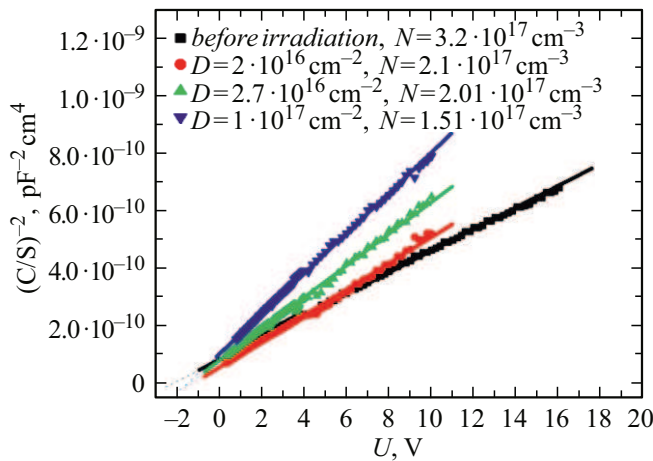
где  $(N_d - N_a)_0$  — концентрация нескомпенсированных доноров до облучения,  $(N_d - N_a)_1$  — после облучения,  $D$  — флюенс.

Для определения параметров и концентраций образующихся радиационных дефектов использовался метод нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (НСГУ, англ. DLTS — deep level transient spectroscopy) [15].

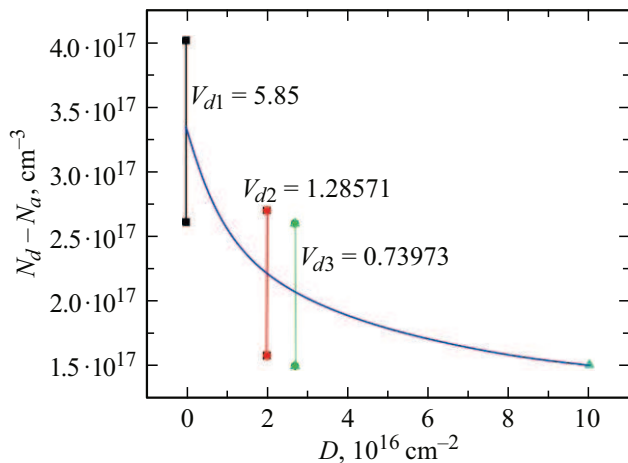
Результаты измерений вольт-фарадных измерений представлены на рис. 1. Как видно из рисунка, зависимости были линейны в координатах  $(1/C^2) - U$ , что говорит о равномерном распределении легирующей примеси вблизи поверхности образцов. Полученные значения концентраций усреднялись между различными контактами Шоттки на одном образце. Значения  $N_d - N_a$  как

**Таблица 1.** Средняя концентрация  $N_d - N_a$  в  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до и после облучения при комнатной температуре электронами с энергией 0.9 MeV

$D, \text{cm}^{-2}$	0	$2.0 \cdot 10^{16}$	$2.7 \cdot 10^{16}$	$1 \cdot 10^{17}$
$N_d - N_a, \text{cm}^{-3}$	$3.2 \cdot 10^{17}$	$2.1 \cdot 10^{17}$	$2.01 \cdot 10^{17}$	$1.51 \cdot 10^{17}$



**Рис. 1.** Зависимости  $(C/S)^{-2}$  от приложенного напряжения  $U$  для  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до и после облучения электронами с энергией 0.9 MeV при комнатной температуре.



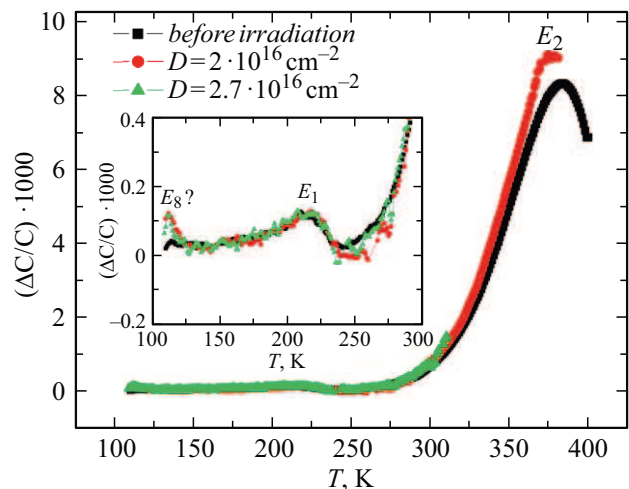
**Рис. 2.** Зависимость концентрации  $N_d - N_a$  от дозы облучения  $D$  для  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до и после облучения электронами с энергией 0.9 MeV при комнатной температуре.

в исходных образцах, так и после обоих доз облучения представлены в табл. 1.

Как видно из рис. 1, величина емкостной отсечки практически не зависела от облучения образца и составляла 2.0–2.5 V. На основе данных табл. 1 была рассчитана скорость удаления носителей по формуле (1). Полученные результаты представлены на рис. 2. Как видно из рисунка, наблюдалось уменьшение концентрации нескомпенсированных доноров с увеличением

дозы облучения, причем скорость удаления носителей уменьшалась с увеличением дозы облучения от 5.85 до 0.74  $\text{cm}^{-1}$ . Такой вид зависимости  $N_d - N_a = f(D)$  может указывать на то, что в Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в отличие от SiC при облучении электронами реализуется механизм компенсации, при котором радиационный дефект (вакансия) взаимодействует с атомом мелкой примеси, образуя электрически нейтральный или акцепторный центр [16]. В работе [17] при исследовании облучения  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, электронами с энергией 1.5 MeV также наблюдалась зависимость скорости удаления от дозы, которой авторы [17] пренебрегли, оценив значение  $V_d$  области малых доз как  $\sim 4.9 \text{ cm}^{-1}$ . Отметим, что для карбида кремния в аналогичных условиях облучения величина  $V_d$  заметно меньше (около 0.1  $\text{cm}^{-1}$ ) [18].

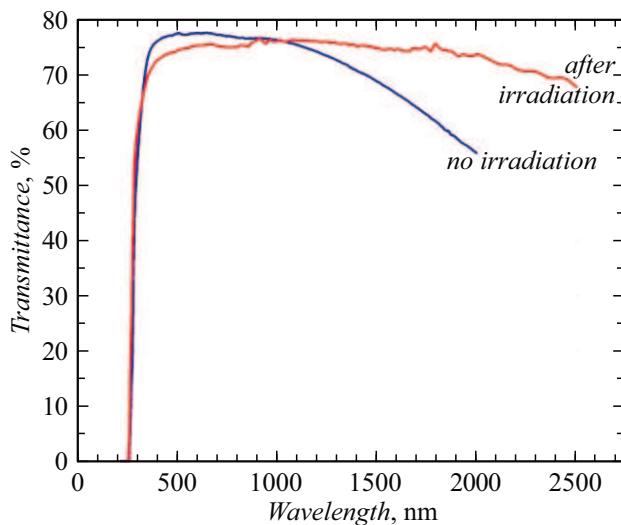
Полученные спектры DLTS показали наличие в исследуемых образцах по крайней мере двух типов глубоких уровней:  $E_1$  и  $E_2$  (рис. 3). На спектре также виден пик, похожий по температурной шкале на уровень  $E_8$  из статей [19,20], но из-за слабого сигнала, а также большого сопротивления на этом температурном промежутке, возможны сильные искажения в измерениях. В связи с этим нам не удалось извлечь параметры данного дефекта. Параметры обнаруженных центров показаны в табл. 2. Обнаруженный глубокий уровень ( $E_2$ ) ( $E_c - 0.81 \text{ eV}$ ) по мнению большинства исследователей [2,7,21,22] соответствует примеси железа (Fe). Согласно литературным данным [6,7,21–23], можно сказать, что уровень  $E_1$  ( $E_c - 0.42$ ),  $\sigma = 3.19 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2$  предположительно является дефектом примесной природы. На данный момент нет общего мнения, с какой конкретно примесью связан  $E_1$  — разные авторы связывают его с Si, Fe, Cr и Co, а также с комплексами мелких доноров с водородом. Согласно нашим данным, не происходило заметного роста концентраций уровней  $E_1$  и  $E_2$  в процессе облучения. Можно предположить, что радиационная компенсация



**Рис. 3.** DLTS-спектры для  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до и после облучения электронами с энергией 0.9 MeV при комнатной температуре. На вставке показана низкотемпературная часть DLTS-спектра в большем масштабе.

**Таблица 2.** Параметры обнаруженных глубоких центров для  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до и после облучения при комнатной температуре электронами с энергией 0.9 MeV

Положение максимума пика $T$ , К	220	380
Энергия ионизации, $E_i$ , eV	0.42	0.81
Сечение захвата, $\sigma$ , cm <sup>2</sup>	$3.19 \cdot 10^{-16}$	$7.48 \cdot 10^{-15}$
Соответствие литературным данным	$E_1$ Примесный уровень [2,7,21,22]	$E_2$ Примесь Fe [6,7,21–23]



**Рис. 4.** Спектры пропускания исследованных образцов до и после облучения электронами.

исследованных образцов была обусловлена образованием глубоких акцепторных уровней в нижней половине запрещенной зоны  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Однако для исследования нижней половины запрещенной зоны в материале  $n$ -типа методом DLTS необходима инжекция неосновных носителей заряда, что невозможно для диода Шоттки.

Также было проведено исследование спектров пропускания образцов до облучения и после двух сеансов облучения (суммарным флюенсом  $2.7 \cdot 10^{16}$  cm<sup>-2</sup>). В целом, в результате облучения пропускание немного уменьшилось, но длинноволновый край спектра поднялся (рис. 4). Общее снижение пропускания может быть связано поглощением на глубоких центрах (точечных дефектах), концентрация которых увеличилась. Поглощение в  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в длинноволновой части спектра обычно связывают с поглощением на электронах проводимости [23,24]. Следовательно, наблюдаемое увеличение пропускания подтверждает снижение концентрации свободных электронов. Можно сравнить наблюдаемый здесь эффект с увеличением пропускания в ИК области, наблюдавшемся при различном уровне легирования бета оксида галлия железом [25], когда снижение концентрации элект-

тронов связано с компенсацией доноров акцепторной примесью (железом). Качественно и количественно эффекты совпадают: в обоих случаях для 2000 nm пропускание возрастает на 15%–18% при снижении  $(N_d - N_a)$  приблизительно в 1.5 раза. Отметим, что спектр фотолюминесценции образцов не изменился после облучения (в нашей работе не приводится). По-видимому, в данных условиях облучения не происходит образование центров — активаторов фотолюминесценции.

Обнаружена нелинейная зависимость концентрации носителей заряда от дозы электронного облучения. Нелинейность свидетельствует о наличии в составе вторичного радиационного дефекта, ответственного за компенсацию проводимости, атома донорной примеси. Показано наличие глубоких центров, не связанных, по всей вероятности, с облучением образцов электронами. Полученные спектры пропускания подтверждают уменьшение количества свободных электронов.

### Финансирование работы

Д.А. Бауман, Д.Ю. Панов, В.А. Спиридонов, П.А. Богданов и А.Е. Романов выражают благодарность Российскому научному фонду за поддержку выращивания объемных кристаллов, контактного осаждения и получения спектров оптического пропускания (проект № 24-12-00229).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] S.J. Pearton, J. Yang, P.H. Cary, F. Ren, J. Kim, M.J. Tadjer, M.A. Mastro. *Appl. Phys. Rev.*, **5**, 011301 (2018). DOI: 10.1063/1.5006941
- [2] E. Farzana, M.F. Chaiken, T.E. Blue, A.R. Arehart, S.A. Ringel. *APL Mater.*, **7**, 022502 (2019). DOI: 10.1063/1.5054606
- [3] A.Y. Polyakov, V.I. Nikolaev, I.N. Meshkov, K. Siemek, P.B. Lagov, E.B. Yakimov, A.I. Pechnikov, O.S. Orlov, A.A. Sidorin, S.I. Stepanov, I.V. Shchemerov, A.A. Vasilev, A.V. Chernykh, A.A. Losev, A.D. Miliachenko, I.A. Khrisanov, Yu.S. Pavlov, U.A. Kobets, S.J. Pearton. *J. Appl. Phys.*, **132**, 035701 (2022). DOI: 10.1063/5.0100359
- [4] S. Yadav, S. Dash, A.K. Patra, G.R. Umapathy, S. Ojha, S.P. Patel, R. Singh, Y.S. Katharria. *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, **9**, 045015 (2020). DOI: 10.1149/2162-8777/ab8b49
- [5] M. Liu, M. Hua, X. Tian, Z. Wang, H. Gao, W. Wang, Y. Chen, C. Zhang, S. Zhao, Q. Feng, Y. Hao. *Appl. Phys. Lett.*, **123**, 212103 (2023). DOI: 10.1063/5.0170417
- [6] J. Kim, S.J. Pearton, C. Fares, J. Yang, F. Ren, S. Kima, A.Y. Polyakov. *J. Mater. Chem. C*, **7**, 10 (2019). DOI: 10.1039/C8TC04193H
- [7] Z. Zhang, T. Wang, L. Xiao, C. Liu, J. Zhou, Y. Zhang, C. Qi, G. Ma, M. Huo. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **71**, 1676 (2024). DOI: 10.1109/TED.2023.3334713
- [8] C. Remple, J. Huso, M.H. Weber, J.S. McCloy, M.D. McCluskey. *J. Appl. Phys.*, **135**, 185702 (2024). DOI: 10.1063/5.0196824

- [9] L. Ren, J. Lv. *Mater. Today Comm.*, **36**, 106621 (2023). DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.106621
- [10] T. Wang, S. Wang, B. Zhou, Y. Tang, L. Wang, B. Li, C. Liu, Z. Wu, Y. Yang, B. Mei, C. Qi, Y. Zhang, M. Liu. *ECS J. Sol. State Sci. Tech.*, **10**, 115001 (2021). DOI: 10.1149/2162-8777/ac2e4d
- [11] T.-H. Dang, M. Konczykowski, H. Jaffrès, V.I. Safarov, H.-J. Drouhin. *JVST A*, **40**, 033416 (2022). DOI: 10.1116/6.0001821
- [12] D.A. Bauman, D.Iu. Panov, V.A. Spiridonov, A.V. Kremleva, A.V. Asach, E.V. Tambulatova, A.V. Sakharov, A.E. Romanov. *JVST A*, **41** (5), 053203 (2023). DOI: 10.1116/6.0002644
- [13] D.A. Bauman, D.I. Panov, D.A. Zakgeim, V.A. Spiridonov, A.V. Kremleva, A.A. Petrenko, P.N. Brunkov, N.D. Prasolov, A.V. Nashchekin, A.M. Smirnov, M.A. Odnoblyudov, V.E. Bougrov, A.E. Romanov. *Phys. Status Solidi A*, **218** (20), 2100335 (2021). DOI: 10.1002/pssa.202100335
- [14] C. Lehmann. *Interaction of radiation with solids and elementary defect production* (North-Holland, Amsterdam, 1977), p. 139.
- [15] D.V. Lang. *J. Appl. Phys.*, **45**, 3023 (1974). DOI: 10.1063/1.1663719
- [16] V.V. Kozlovski, A.A. Lebedev, E.V. Bogdanova. *J. Appl. Phys.*, **117**, 155702 (2015). DOI: 10.1063/1.4918607
- [17] J. Yang, F. Ren, S.J. Pearton, G. Yang, J. Kim, A. Kuramata. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **35**, 031208 (2017). DOI: 10.1116/1.4983377
- [18] A.A. Lebedev, K.S. Davydovskaya, A.M. Strel'chuk, V.V. Kozlovski. *J. Surface Investigation, X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, **11**, 924 (2017).
- [19] A.Y. Polyakov, N.B. Smirnov, I.V. Shchemerov, E.B. Yakimov, S.J. Pearton, C. Fares, J. Yang, F. Ren, J. Kim, P.B. Lagov, V.S. Stolbunov, A. Kochkova. *Appl. Phys. Lett.*, **113**, 092102 (2018). DOI: 10.1063/1.5049130
- [20] A.Y. Polyakov, A.A. Vasilev, I.V. Shchemerov, A.V. Chernykh, I.V. Shetin, E.V. Zhevnerov, A.I. Kochkova, P.B. Lagov, A.V. Miakonkikh, Yu.S. Pavlov, U.A. Kobets, I.-H. Lee, A. Kuznetsov, S.J. Pearton. *J. Alloys Compounds*, **945**, 169258 (2023). DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.169258
- [21] A.Y. Polyakov, V.I. Nikolaev, E.B. Yakimov, F. Ren, S.J. Pearton, J. Kim. *J. Vac. Sci. Technol. A*, **40**, 020804 (2022). DOI: 10.1116/6.0001701
- [22] M.E. Ingebrigtsen, J.B. Varley, A.Yu. Kuznetsov, B.G. Svensson, G. Alfieri, A. Mihaila, U. Badstubner, L. Vines. *Appl. Phys. Lett.*, **112**, 042104 (2018). DOI: 10.1063/1.5020134
- [23] K. Irmscher, Z. Galazka, M. Pietsch, R. Uecker, R. Fornari. *J. Appl. Phys.*, **110**, 063720 (2011). DOI: 10.1063/1.3642962
- [23] Z. Galazka. *J. Appl. Phys.*, **131**, 031103 (2022). DOI: 10.1063/5.0076962
- [24] Д.А. Закгейм, Д.Ю. Панов, В.А. Спиридонов, А.В. Кремлева, А.М. Смирнов, Д.А. Бауман, А.Е. Романов, М.А. Оdnоблюдов, В.Е. Бугров. *Письма в ЖТФ*, **46** (22), 43 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.22.50308.18499
- [25] D.A. Bauman, D.I. Panov, V.A. Spiridonov, A.Yu. Ivanov, P.A. Bogdanov, W.V. Lundin, E.Yu. Lundina, A.F. Tsatsulnikov, M.V. Tokarev, B.Y. Ber, S.S. Rachkov, D.Yu. Kazantsev, P.N. Brunkov, A.E. Romanov. *J. Vac. Sci. Tech. A*, **43**, 042804 (2025). DOI: 10.1116/6.0004535