

07.2

Монолитный трехпереходный $p-i-n$ AlGaAs/GaAs фотопреобразователь лазерного излучения

© В.С. Калиновский, Е.В. Контрош, И.А. Толкачев, К.К. Прудченко, С.В. Иванов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: vitak.sopt@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 24 июня 2024 г.

В окончательной редакции 20 июля 2024 г.

Принято к публикации 25 июля 2024 г.

Исследованы фотовольтаические характеристики гетероструктурных трехпереходных $p-i-n$ AlGaAs/GaAs фотоэлектрических преобразователей монохроматического излучения, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии в едином технологическом процессе. Спектральная чувствительность созданных трехпереходных фотопреобразователей находилась в диапазоне длин волн $0.78-0.87 \mu\text{m}$. В фотовольтаическом режиме достигнуты значения напряжения холостого хода 1.82 V и электрической мощности 0.34 mW/cm^2 при плотностях мощности лазерного излучения $\leq 2 \text{ mW/cm}^2$ на длине волны $\lambda = 850 \text{ nm}$. Полученные значения превосходят характеристики однопереходных $p-i-n$ AlGaAs/GaAs фотоэлектрических преобразователей, созданных по идентичной технологии. Разработанные трехпереходные фотоэлектрические преобразователи могут быть использованы в системах дистанционного питания миниатюрных микросхем, в имплантируемой биоэлектронике и биосенсорах, а также в долговременных радиолюминесцентных источниках энергии.

Ключевые слова: молекулярно-пучковая эпитаксия, трехпереходный фотопреобразователь, фотовольтаические характеристики, лазерное излучение, $p-i-n$ AlGaAs/GaAs фотопреобразователь, длина волны.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.22.59133.20031

Оптические системы беспроводной и оптоволоконной передачи энергии и информации [1–4], дистанционные энергетические системы для сенсорных устройств субмиллиметрового масштаба, биоимплантируемые устройства [5–7] и долговременные радиолюминесцентные источники энергии [8–11] требуют разработки и создания эффективных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) оптического излучения. Эффективность данных систем во многом определяется увеличением напряжения и электрической мощности, вырабатываемой ФЭП, высоким соотношением сигнал/шум и линейностью зависимости токового сигнала от уровня оптической мощности, передаваемой от оптического источника по оптоволоконной линии связи. Перспективными в этом направлении являются разработка и создание монолитных многопереходных фотоэлектрических преобразователей (МП ФЭП) из фотоактивных субэлементов с одинаковой шириной запрещенной зоны [3]. В литературе обосновывается перспективность МП ФЭП с числом переходов до 100 [3–6]. Размерность слоев многопереходного $p-i-n$ ФЭП прежде всего обусловлена длиной волны и коэффициентом поглощения монохроматического излучения в полупроводнике с соблюдением условия равенства токов, генерируемых светом в каждом из субэлементов. Выражение

$$\begin{aligned} P_0(1 - e^{-l_1}) &= P_0 e^{-l_1 - l_{d,1}} (1 - e^{-l_2}) \\ &= P_0 e^{-l_1 - l_{d,1} - l_2 - l_{d,2}} (1 - e^{-l_3}) \end{aligned} \quad (1)$$

показывает равенство поглощенного монохроматического излучения в каждом субэлементе, которое в свою

очередь обеспечивает равенство фототоков. Используя выражение (1), можно оценить оптические толщины в субэлементах монолитного трехпереходного $p-i-n$ ФЭП. В (1) P_0 — интенсивность падающего оптического излучения, $l_j = \alpha_{pj}h_{pj} + \alpha_{ij}h_{ij} + \alpha_{nj}h_{nj}$ ($j = 1, 2, 3$) — оптическая толщина первого, второго и третьего субэлементов; $l_{d,m} = \alpha_{ptd,m}h_{ptd,m} + \alpha_{md,m}h_{md,m}$ ($m = 1, 2$) — оптическая толщина первого и второго соединительных туннельных диодов, h и α — действительные толщины и коэффициенты поглощения слоев p , i , n первого, второго и третьего субэлементов и соединительных туннельных диодов. Последовательное включение фотоактивных субэлементов через туннельные диоды в монолитной структуре МП ФЭП позволяет повысить выходные напряжение и мощность электрического сигнала при меньших рабочих токах, а также обеспечивает лучшее согласование с нагрузкой. Создание оптоволоконных модулей из нескольких соединенных монолитных МП ФЭП в перспективе обеспечит снижение количества элементов в сборке, оптических и электрических потерь как в оптоволоконных разветвлениях, так и на межэлементных соединениях [12].

В настоящей работе приведены результаты исследования фотоэлектрических характеристик монолитных трехпереходных $p-i-n$ AlGaAs/GaAs ФЭП (ТП ФЭП) (рис. 1, а) в сравнении с характеристиками однопереходных $p-i-n$ AlGaAs/GaAs ФЭП (ОП ФЭП) при возбуждении непрерывным лазерным излучением на длине волны $\lambda = 850 \text{ nm}$ при плотностях мощности $\leq 2 \text{ mW/cm}^2$.

Трехпереходные $p-i-n$ AlGaAs/GaAs ФЭП были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии

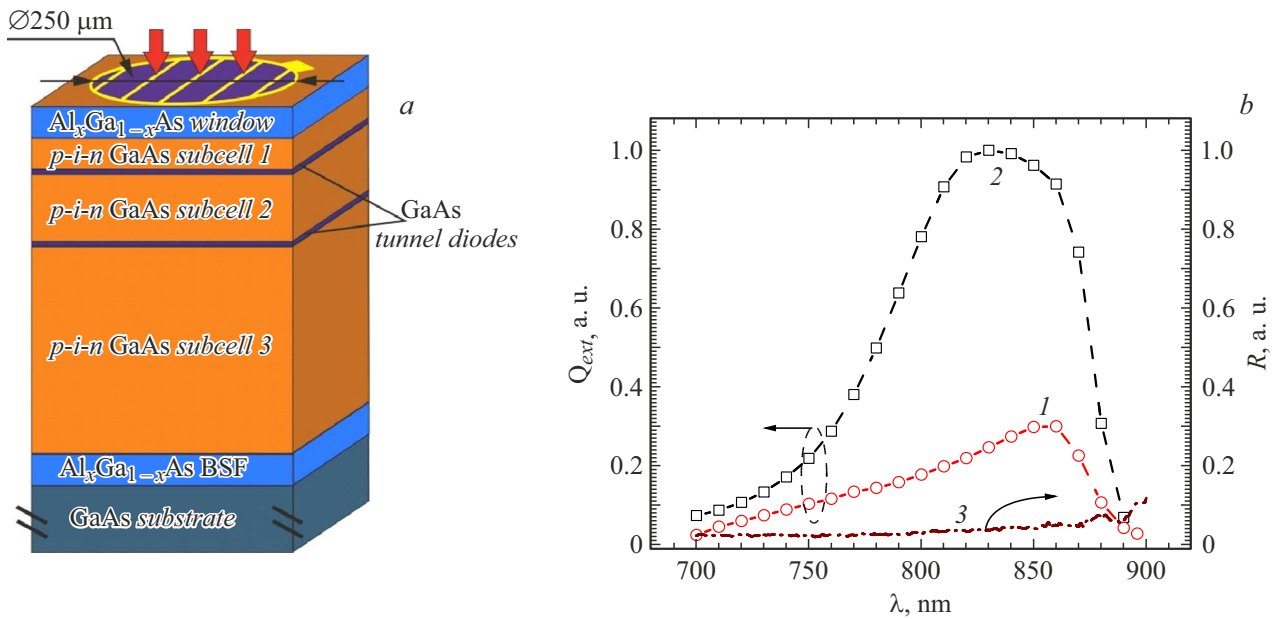


Рис. 1. *a* — монолитный трехпереходный $p-i-n$ AlGaAs/GaAs ФЭП. Обозначены верхний (1), средний (2) и нижний (3) $p-i-n$ GaAs-субэлементы и соединительные туннельные диоды на основе $n^{++}-p^{++}$ -GaAs. *b* — спектры фоточувствительности трехпереходного $p-i-n$ ФЭП (1) и однопереходного $p-i-n$ ФЭП (2). 3 — коэффициент отражения от фотоактивной поверхности трехпереходного $p-i-n$ -ФЭП.

(МПЭ) на подложке n -GaAs ($N_D \sim 3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$). Монолитная структура ФЭП (рис. 1, *a*) включала в себя три $p-i-n$ GaAs-субэлемента с толщинами верхнего ($\sim 0.4 \mu\text{m}$), среднего ($\sim 0.7 \mu\text{m}$) и нижнего ($\sim 2.3 \mu\text{m}$) переходов, выбранными в соответствии с выражением (1) и расчетами, выполненными ранее [12]. Уровни легирования для p -слоев составляли $N_A \geq 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, для n -слоев $N_D \leq 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, для i -слоев $\sim 1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. В качестве соединительных элементов между $p-i-n$ -переходами использовались встречно включенные наноразмерные туннельные диоды на основе $p^{++}-n^{++}$ -GaAs, каждый суммарной толщиной $\leq 30 \text{ nm}$. Структура включала широкозонное окно $p\text{-Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ (с $N_A \sim 5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ и толщиной $0.3 \mu\text{m}$) и тыльный потенциальный барьер $n\text{-Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ (с $N_D \sim 3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ и толщиной $0.2 \mu\text{m}$). Постростовым процессированием с использованием планарной технологии были сформированы чипы ФЭП с фоточувствительной поверхностью диаметром $250 \mu\text{m}$, кольцевым фронтальным контактом (Ag(Mn)/Ni/Au) толщиной $h = 3600 \text{ \AA}$, сплошным тыльным контактом (Au(Ge)/Ni/Au) толщиной $h = 2000 \text{ \AA}$, боковая поверхность структуры пассивировалась слоем диэлектрика Si_3N_4 . Отметим, что параметры структуры ТП ФЭП, определенные с использованием выражения (1), заданные технологически (рис. 1, *a*) и оцененные методом вторично-ионной масс-спектрометрии, хорошо согласуются между собой. Отличие толщин слоев в монолитной эпитаксиальной гетероструктуре ТП ФЭП от расчетных не превысило 12%.

Однопереходные AlGaAs/GaAs ФЭП, используемые для сравнения характеристик, выращены методом

МПЭ [12] и сформированы с использованием идентичной постростовой технологии с аналогичными контактами и фоточувствительной поверхностью диаметром $250 \mu\text{m}$. Непосредственно на эпитаксиальной пластине при комнатной температуре были измерены спектры фоточувствительности (рис. 1, *b*), темновые (рис. 2, *a*) и световые (рис. 2, *b*) вольт-амперные характеристики (ВАХ) и вольт-емкостные характеристики (ВЕХ) (рис. 2, *a*) обоих типов ФЭП. Темновые ВАХ ОП ФЭП измерялись в диапазоне прямого напряжения смещения до 1.5 V , а ТП ФЭП — до 4 V . Характеристики внешней квантовой эффективности ТП ФЭП и ОП ФЭП были измерены в диапазоне от 700 до 900 nm с использованием светосильного монохроматора с вводом оптического сигнала из $50 \mu\text{m}$ оптоволокна. Экспериментальные зависимости нормированных значений внешней квантовой эффективности для ТП ФЭП (кривая 1) и ОП ФЭП (кривая 2) представлены на рис. 1, *b*. Величины внешней квантовой эффективности на длине волны $\lambda = 850 \text{ nm}$ для ОП ФЭП составили $Q_{ext} = 80\%$, а для ТП ФЭП — $Q_{ext} \sim 30\%$ (рис. 1, *b*), что обусловлено перераспределением оптической мощности в ТП ФЭП между тремя $p-i-n$ -субэлементами и, как следствие, пропорциональным снижением фототока в монолитной трехпереходной структуре.

На основе проведенного анализа экспериментальных темновых ВАХ трехпереходных и однопереходных ФЭП определены доминирующие механизмы токопрохождения и значения токов насыщения (J_{0i}) и диодных коэффициентов (A_i). Механизмы транспорта соответствуют (см. рис. 2, *a* и таблицу): туннельно-ловушечному (J_{0i}) для ТП ФЭП — кривая 3 ($A_i > 6$), для ОП ФЭП — кри-

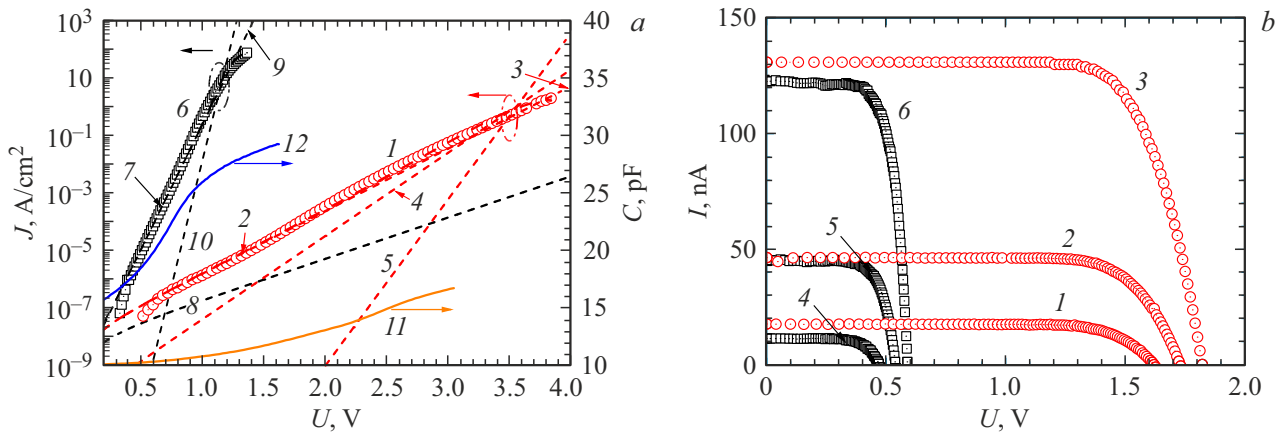


Рис. 2. *a* — экспериментальные (1, 6, 11, 12) и расчетные (2–5, 7–10) прямые темновые ВАХ и ВЕХ трехпереходного (1–5, 11) и однопереходного (6–10, 12) $p-i-n$ ФЭП. *b* — нагрузочные (световые) ВАХ трехпереходного (1–3) и однопереходного (4–6) $p-i-n$ ФЭП при освещении лазерным излучением ($\lambda = 850$ nm) мощностью 128 (1, 5), 342 (2, 6), 971 (3) и 32 nW (4).

Расчетные параметры, полученные из фиттинга прямых темновых ВАХ монолитных трехпереходных и однопереходных $p-i-n$ ФЭП

Тип $p-i-n$ ФЭП	J_{0r} , A/cm ²	J_{0s} , A/cm ²	J_{0d} , A/cm ²	R_s mΩ · cm ²
Трехпереходный	$1.1 \cdot 10^{-8}$	$5.3 \cdot 10^{-11}$	$2.6 \cdot 10^{-21}$	140
Однопереходный	$7.1 \cdot 10^{-9}$	$5.1 \cdot 10^{-10}$	$5.6 \cdot 10^{-20}$	1.6

вая 8 ($A_r > 2$); рекомбинационному (J_{0r}) для ТП ФЭП — кривая 4 ($A_r = 6$), для ОП ФЭП — кривая 9 ($A_r = 2$); диффузионному (J_{0d}) для ТП ФЭП — кривая 5 ($A_d = 3$), для ОП ФЭП — кривая 10 ($A_d = 1$). Значения J_{0r} , J_{0s} , J_{0d} и последовательного сопротивления структуры (R_s) ФЭП приведены в таблице. Кривые 2 и 7 (рис. 2, *a*) — прямые темновые ВАХ ФЭП, рассчитанные на основе полученных из фиттинга параметров. Наблюдаемое утроение диодных коэффициентов (A_i) доминирующих механизмов токопрохождения ТП ФЭП указывает на наличие в монолитной структуре трех фотоактивных $p-i-n$ -переходов, способных генерировать одинаковый фототок. Отсутствие на экспериментальных ВАХ экспоненциальных участков, соответствующих смешанным (туннельно-ловушечному и рекомбинационному или рекомбинационному и диффузионному) механизмам токопрохождения, объясняется идентичностью ВАХ каждого субэлемента ТП ФЭП. Кроме того, отсутствие „S-образности“ на прямых темновых ВАХ ТП ФЭП указывает на близость характеристик соединительных туннельных диодов с доминированием в диапазоне рабочих напряжений только туннельного механизма токопрохождения. Последовательное сопротивление R_s ТП ФЭП по сравнению с таковым для ОП ФЭП выросло на два порядка (см. таблицу). Необходимо отметить практически на порядок меньшее значение тока „насыщения“ J_{0d} для ТП ФЭП (см. таблицу), которое в значительной степени определяет КПД ФЭП в фотовольтаическом

режиме [12]. Измерения ВЕХ обоих типов образцов выполнялись на эпитаксиальной пластине на частоте 0.1 МГц. Экспериментальные ВЕХ представлены на рис. 2, *a* кривой 11 для ТП ФЭП и кривой 12 для ОП ФЭП. Величина емкости ТП ФЭП при прямом напряжении смещения ≥ 1.5 V составляет $C = 12$ pF, что в ~ 2.5 раза меньше, чем в случае ОП ФЭП.

Были проведены измерения нагрузочных вольт-амперных характеристик ОП ФЭП и ТП ФЭП с вводом из 200 μ m оптического волокна постоянного монохроматического излучения ($\lambda = 850$ nm) мощностью ≤ 2 mW/cm². Измеренные нагрузочные ВАХ и рассчитанные фотоэлектрические параметры для ФЭП представлены на рис. 2, *b* и 3. Согласно представленным на рис. 3, *a* зависимостям, напряжение холостого хода (U_{oc}) для ТП ФЭП в ~ 3 раза больше, чем для ОП ФЭП (кривые 1, 3), в то время как ток короткого замыкания (I_{sc}) для трехпереходного ФЭП почти в 3 раза меньше I_{sc} для ОП ФЭП (кривые 2, 4). Эти соотношения сохраняются практически во всем диапазоне мощности лазерного излучения, и при ~ 2 mW/cm² напряжение холостого хода составляет $U_{oc} = 1.82$ V для ТП ФЭП и $U_{oc} = 0.59$ V для ОП ФЭП (рис. 3, *a*). Важным преимуществом монолитной структуры трехпереходного $p-i-n$ AlGaAs/GaAs ФЭП по сравнению с однопереходным ФЭП является достижение большей выходной электрической мощности при существенно меньших значениях фототока. На рис. 3, *b* показаны зависимости выходной электрической мощности (кривые 1, 3) и КПД (кривые 2, 4) от величины фототока для ТП ФЭП и ОП ФЭП. Удельная выходная электрическая мощность для трехпереходного $p-i-n$ ФЭП $P_{out} = 0.34$ mW/cm² получена при величине фототока $J_{sc} = 0.25$ mA/cm² и КПД = 18.3%, в то время как для ОП ФЭП такая же выходная электрическая мощность возможна при большей плотности фототока ($J_{sc} = 0.7$ mA/cm²) и меньшем КПД (17%) (рис. 3). Полученные результаты показывают, что трехпереходный $p-i-n$ AlGaAs/GaAs ФЭП при

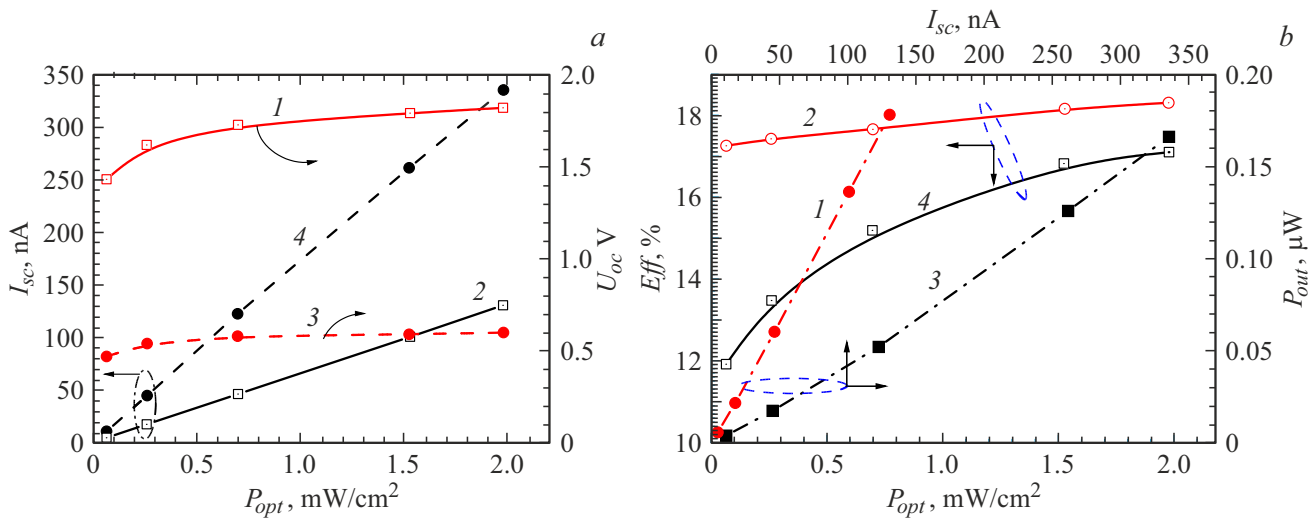


Рис. 3. *a* — зависимости напряжения холостого хода U_{oc} (1, 3) и тока короткого замыкания I_{sc} (2, 4) монолитного трехпереходного (1, 2) и однопереходного (3, 4) $p-i-n$ ФЭП от мощности оптического возбуждения ($\lambda = 850$ nm). *b* — зависимости выходной электрической мощности (1, 3) и КПД (Eff) (2, 4) трехпереходного (1, 2) и однопереходного (3, 4) $p-i-n$ ФЭП от величины фототока.

преобразовании излучения на длине волны $\lambda = 850$ nm в диапазоне мощности до 2 mW/cm^2 имеет КПД больше, чем однопереходный $p-i-n$ AlGaAs/GaAs ФЭП, при существенно меньших (примерно в 3 раза) значениях рабочего фототока.

Впервые методом МПЭ выращены эпитаксиальные структуры монолитных трехпереходных $p-i-n$ AlGaAs/GaAs ФЭП, которые в диапазоне плотности мощности $\leq 2 \text{ mW/cm}^2$ лазерного излучения на длине волны $\lambda = 850$ nm имели значения напряжения холостого хода 1.82 V и электрической мощности 0.34 mW/cm^2 при КПД = 18.3%. Полученные значения параметров заметно превосходят характеристики однопереходных $p-i-n$ AlGaAs/GaAs ФЭП, выращенных методом МПЭ и отпроцессированных при одинаковых условиях и параметрах технологических процессов, с идентичной геометрией чипов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] P. Bhatti, Sci. Transl. Med., **7**, 287ec75 (2015). DOI: 10.1126/scitranslmed.aab3974
- [2] H. Helmers, C. Armbruster, M. von Ravenstein, D. Derix, C. Schöner, IEEE Trans. Power Electron., **35**, 7904 (2020). DOI: 10.1109/TPEL.2020.2967475
- [3] S. Fafard, F. Proulx, M.C.A. York, L.S. Richard, P.O. Provost, R. Ares, V. Améz, D.P. Masson, Appl. Phys. Lett., **109**, 131107 (2016). DOI: 10.1063/1.4964120
- [4] M.C.A. York, S. Fafard, J. Phys. D: Appl. Phys., **50**, 173003 (2017). DOI: 10.1088/1361-6463/aa60a6
- [5] J. Huang, Y. Sun, Y. Zhao, S. Yu, J. Dong, J. Xue, C. Xue, J. Wang, Y. Lu, Y. Ding, J. Semicond., **39**, 044003 (2018). DOI: 10.1088/1674-4926/39/9/094006
- [6] A. Wang, J. Yin, S. Yu, Y. Sun, Appl. Phys. Lett., **121**, 233901 (2022). DOI: 10.1063/5.0109587
- [7] Y. Hanein, J. Goding, APL Bioeng., **8**, 020401 (2024). DOI: 10.1063/5.0209537
- [8] К.К. Прудченко, И.А. Толкачев, Е.В. Контрош, Е.А. Силантьева, В.С. Калиновский, ЖТФ, **92** (12), 1875 (2022). DOI: 10.21883/JTF.2022.12.53754.199-22 [К.К. Prudchenko, I.A. Tolkahev, E.V. Kontrosh, E.A. Silantieva, V.S. Kalinovskii, Tech. Phys., **67** (12), 1632 (2022). DOI: 10.21883/TP.2022.12.55199.199-22].
- [9] S.N. Bocharov, A.I. Isakov, Yu.Yu. Petrov, K.N. Orekhova, E.V. Dementeva, B.E. Burakov, M.V. Zamoryanskaya, Diam. Relat. Mater., **120**, 108658 (2021). DOI: 10.1016/j.diamond
- [10] C. Zhou, J. Zhang, X. Wang, Y. Yang, P. Xu, P. Li, L. Zhang, Z. Chen, H. Feng, W. Wu, ECS J. Solid State Sci. Technol., **10**, 027005 (2021). DOI: 10.1149/2162-8777/abe423
- [11] В.П. Хвостиков, В.С. Калиновский, С.В. Сорокина, О.А. Хвостикова, В.М. Андреев, Письма в ЖТФ, **45** (23), 30 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.23.48716.17941n [V.P. Khvostikov, V.S. Kalinovskii, S.V. Sorokina, O.A. Khvostikova, V.M. Andreev, Tech. Phys. Lett., **45** (12), 1197 (2019). DOI: 10.1134/S1063785019120083].
- [12] V.S. Kalinovskiy, E.V. Kontrosh, G.A. Gusev, A.N. Sumarokov, G.V. Klimko, S.V. Ivanov, V.S. Yuferev, T.S. Tabarov, V.M. Andreev, J. Phys.: Conf. Ser., **993**, 012029 (2018). DOI: 10.1088/1742-6596/993/1/01202