

Импульсные характеристики однопереходных и трёхпереходных фотопреобразователей лазерного излучения

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

ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
Санкт-Петербург, Россия
e-mail: vitak.sopt@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 07.05.2025 г.

В окончательной редакции 31.08.2025 г.

Принята к публикации 24.10.2025 г.

Исследованы импульсные характеристики фотоответа однопереходных и трехпереходных монолитных GaAs/AlGaAs $p - i - n$ -фотопреобразователей ($\varnothing 250 \mu\text{m}$) в фотovoltaическом режиме при возбуждении импульсным излучением с $\lambda = 850 \text{ nm}$. Пиковая плотность мощности лазерного излучения (P_p) варьировалась до 9.6 kW/cm^2 при длительности импульсов 140 ps. Показано, что уширение импульса фотоответа для однопереходных фотопреобразователей обусловлено влиянием коллапса электрического поля $p - i - n$ -перехода при $P_p \geq 1.1 \text{ kW/cm}^2$. В трехпереходных монолитных AlGaAs/GaAs $p - i - n$ -фотопреобразователях при пиковой плотности мощности излучения до 9.6 kW/cm^2 продемонстрировано существенное увеличение амплитуды генерируемого электрического импульса и быстродействия в субнаносекундном диапазоне.

Ключевые слова: импульсные характеристики, однопереходные и трёхпереходные монолитные $p - i - n$ -фотопреобразователи, коллапс электрического поля, вакуумная пайка.

DOI: 10.61011/OS.2025.11.62160.8140-25

В настоящее время активно развивается такое научно-техническое направление, как радиофотоника. Одним из ключевых элементов в ней является мощный импульсный фотопреобразователь (ФП), который используется, например, в радиофотонных фазированных антенных решётках [1–4]. Эффективность работы радиофотонных фазированных антенных решёток определяется совокупностью параметров: электрической мощностью ФП, быстродействием и согласованием с параметрами внешней нагрузки, например антенны, а также автономностью энергосистемы, создающей полную гальваническую развязку между излучателем — антенной решёткой и основным генерирующим оборудованием. В этом случае ФП должен в фотovoltaическом режиме (без обратного напряжения смещения) эффективно преобразовывать субнаносекундные оптические импульсы с минимальной задержкой. В различных источниках приводятся конструкции ФП, работающие в диодном режиме, при приложении обратного смещения. К ним относятся $p - i - n$ -ФП [5,6], униполярные ФП [7–9], модифицированные униполярные ФП [10], в которых ключевой особенностью является наличие нелегированного ($p - i - n$ -ФП и униполярные ФП) или слаболегированного (модифицированные униполярные ФП) микронного или субмикронного i -слоя.

Перспективным и более эффективным способом преобразования импульсного лазерного излучения в СВЧ сигналы является использование монолитных многопереходных $p - i - n$ -ФП (МП ФП). МП ФП состоят из последовательно включённых через тунNELьные диоды fotoактивных $p - i - n$ -субэлементов с одинаковой ши-

риной запрещённой зоны, но с разными толщинами fotoактивных слоёв [11]. Монолитное соединение субэлементов в МП ФП позволяет повысить уровень оптического возбуждения, снизить электрические и оптические потери, обеспечить увеличение амплитуды электрического сигнала и лучшее согласование с нагрузкой.

Целью настоящей работы является исследование импульсных характеристик однопереходных $p - i - n$ AlGaAs/GaAs-ФП (ОП ФП) и сравнение полученных результатов с импульсными характеристиками трёхпереходных AlGaAs/GaAs-ФП (ТП ФП), работающих в фотovoltaическом режиме при возбуждении из многоядерного оптоволокна диаметром 50 μm лазерными импульсами длительностью 140 ps на длине волн 850 nm при разной плотности мощности.

Ниже описаны технологические схемы структур ОП и ТП ФП, т. е. последовательность эпитаксиальных слоёв с исходными толщинами, составами и уровнями легирования, закладываемых технологиями в процессе роста эпитаксиальной структуры. Важно отметить, что в процессе роста структура ФП подвергается температурному воздействию, что влечёт за собой температурную диффузию атомов примеси, в результате чего параметры, заложенные в технологической схеме структуры, могут изменяться относительно исходных значений. Поэтому в процессе моделирования учитывалась исходная технологическая схема роста структуры ФП и параметры, полученные непосредственно из эпитаксиальной структуры методом вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС). Технологическая схема структуры ОП ФП включала в себя подконтактный слой p^+ -GaAs, ле-

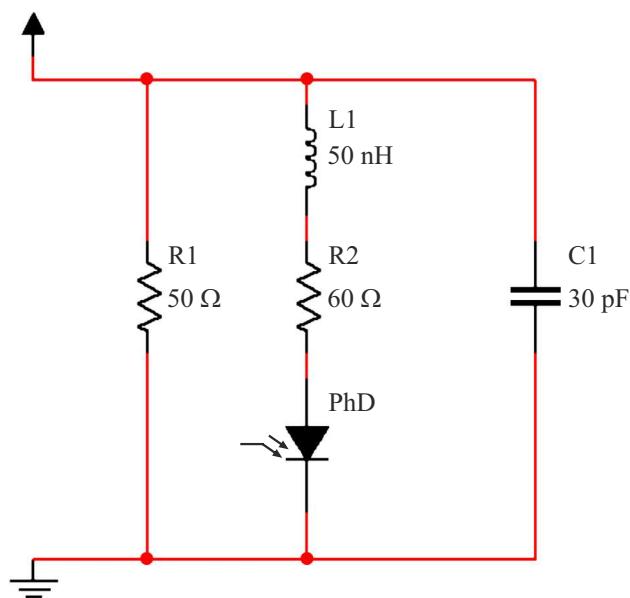


Рис. 1. Электрическая схема включения однопереходного $p-i-n$ AlGaAs/GaAs-ФП, где R_1 — сопротивление нагрузки, а R_2 , L_1 и C_1 соответственно паразитные сопротивления, индуктивность и ёмкость, обусловленные монтажом ОП ФП на микрополосковую линию.

гированный $N_A \sim 7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, толщиной $0.4 \mu\text{m}$, широкозонное окно из $p\text{-Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ ($N_A \sim 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) и $p\text{-Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ ($N_A \sim 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) с толщинами соответственно 0.04 и $2 \mu\text{m}$, эмиттерный $p\text{-GaAs-слой}$ ($N_A > 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) толщиной $0.7 \mu\text{m}$, $i\text{-GaAs-слой}$ ($N_D \sim 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) толщиной $1 \mu\text{m}$, а также базовый $n\text{-GaAs-слой}$ ($N_D \leq 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) толщиной $0.5 \mu\text{m}$, ниже брэгговский рефлектор, буферный $n^+\text{-AlAs/GaAs-слой}$ ($N_D \sim 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) на $n^+\text{-GaAs-подложке}$ ($N_D \sim 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$).

Технологическая схема структуры монолитного ТП ФП имела идентичный с ОП ФП подконтактный слой, однослойное широкозонное $p\text{-Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As-окно}$ ($N_A \sim 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) толщиной $0.3 \mu\text{m}$ и три $p-i-n$ -субэлемента с аналогичными, как и у ОП ФП, уровнями легирования. Толщины верхнего, среднего и нижнего фотоактивных переходов составляли соответственно 0.38 , 0.62 , $2.02 \mu\text{m}$ и были определены исходя из условия равенства фототоков [12], генерируемых в субэлементах на длине волны лазерного излучения. Структура также содержала тыльный потенциальный барьер $n\text{-Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ и была выращена на $n^+\text{-GaAs-подложке}$ ($N_D \sim 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$). Между фотоактивными $p-i-n$ -переходами в качестве соединительных элементов использовались встречно включённые туннельные GaAs $p^{++}-n^{++}$ -диоды с толщинами $\leq 30 \text{ nm}$. Диаметр фотоактивной поверхности мезы исследованных образцов был $250 \mu\text{m}$. В работе [12] было показано, что ТП ФП в диапазоне плотности мощности $\leq 2 \text{ mW/cm}^2$ постоянного лазерного излучения на длине волны $\lambda = 850 \text{ nm}$

имели значения напряжения холостого хода 1.82 V и электрической мощности 0.34 mW/cm^2 при КПД 18.3% , что при той же оптической мощности превосходит характеристики ОП ФП (КПД 17%), выращенных методом МПЭ и сформированных при одинаковых технологических процессах с идентичной геометрией чипов.

Надёжность и рабочие характеристики современных мощных полупроводниковых приборов со значительным тепловыделением во многом определяются эффективностью отвода тепла [13]. Для обеспечения эффективного теплоотвода и согласования с 50Ω нагрузкой ФП монтировались методом вакуумной пайки на симметричную микрополосковую линию, сформированную на керамическом теплоотводящем основании из AlN в условиях, не приводящих к деградации характеристик структуры ФП. Пайка ФП выполнялась на идентичные теплоотводящие основания с предварительно подготовленными металлическими контактами. На керамике были сформированы многослойные контакты из металлов Ti/Cu/Ni/Au общей толщиной $\sim 5 \mu\text{m}$, а тыльный контакт к ФП (Au(Ge)/Ni/Au) — с финальным слоем золота $\sim 0.2 \mu\text{m}$. Пайка осуществлялась в вакууме пастой Sn42%Bi58% (KOKI TB48-M742) с учётом рекомендаций производителя [14] и по технологии, разработанной на основе исследований, выполненных ранее методом лазерной сканирующей фотодефлексионной микроскопии с оптимизацией коэффициента теплопроводности паянного слоя [15,16]. Проведённые исследования показали, что для обеспечения наилучшего теплоотвода при выборе паяльной пасты и технологических условий пайки необходимо учитывать реальные тепловые характеристики слоев спая, которые могут значительно отличаться от характеристик базовых многокомпонентных сплавов.

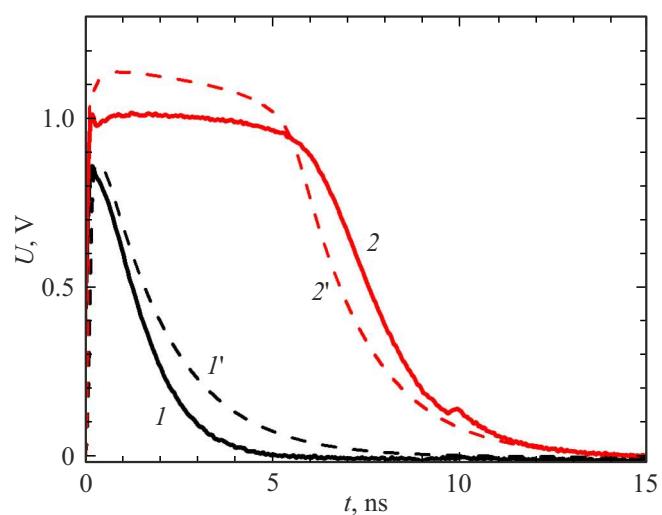


Рис. 2. Сравнение экспериментальных (кривые 1, 2) и симулированных (1', 2') импульсов фотоответа однопереходного $p-i-n$ AlGaAs/GaAs-ФП при возбуждении лазерным излучением ($\lambda = 850 \text{ nm}$, $\tau_{0.5} = 140 \text{ ps}$): кривые 1, 1' — 1.14 kW/cm^2 , кривые 2, 2' — 5.3 kW/cm^2 .

Параметры импульсов фотоответа экспериментальных и смоделированных на основе данных, взятых из технологической схемы эпитаксиального роста структуры и ВИМС для однопереходных и трехпереходных монолитных $p-i-n$ AlGaAs/GaAs-ФП

№	Структура	P_{peak} , kW/cm ²	U_{max} , V	$\tau_{0.5}$, ns	Примечание
1	ОП $p-i-n$ -ФП, эксперимент	1.14	0.857	1.46	
		5.3	1.015	7.54	
2	ОП $p-i-n$ -ФП, расчёт	1.14	0.865	1.73	Технологическая схема
		5.3	1.139	6.48	
3	ТП $p-i-n$ -ФП эксперимент	9.6	2.7	0.74	
4	ТП $p-i-n$ -ФП, расчёт	5.3	3.2	0.99	Технологическая схема
		5.3	3.1	0.91	ВИМС
		9.6	3.3	1.5	Технологическая схема
		9.6	3.4	1.38	ВИМС

Вывод фронтальных контактов ФП осуществлялся ультразвуковой сваркой 50 μm золотой проволокой с минимизацией значения паразитных индуктивностей.

При расчётах импульсных характеристик учитывалась электрическая схема включения, представленная на рис. 1, включающая в себя как 50 Ω нагрузочное сопротивление, так и паразитные сопротивление, индуктивность и ёмкость, обусловленные монтажом ОП ФП на микрополосковую линию. Параметры цепи были получены согласно методике, изложенной в работе [17].

В ходе работы было выполнено измерение импульсов фотоответа ОП ФП (рис. 2, кривые 1, 2) рассматриваемой структуры (таблица), которые сохраняют форму фотоотклика и быстродействие до определённого уровня мощности оптического излучения, после которого наступает насыщение. Чтобы понять причину насыщения, было проведено численное моделирование импульсов фотоотклика аналогичной структуры ОП ФП при возбуждении субнаносекундными импульсами постоянной длительности на тех же уровнях плотности мощности лазерного излучения, что и в эксперименте (рис. 2, кривые 1, 2').

При математическом моделировании импульсов фотоответа ОП ФП и ТП ФП в фотovoltaическом режиме закладывались параметры структуры согласно технологической схеме эпитаксиального роста без верхних подконтактных слоев, так как они непосредственно не участвуют в генерации носителей заряда [18]. Показано, что в смоделированном ОП ФП при плотности мощности 5.3 kW/cm² лазерного излучения наблюдается насыщение амплитуды импульса с сильным уширением длительности фотоотклика на полувысоте амплитуды до 7.54 ns, что представлено в таблице (рис. 2, кривая 2'). Сравнивая полученные импульсы фотоответа с

теоретически рассчитанными, видно, что смоделированные импульсы фотоответа качественно совпадают, но несколько выше по амплитуде экспериментальных, это можно объяснить несколькими факторами: во-первых, отличием технологических параметров от параметров реальной экспериментальной структуры, во-вторых, при расчёте не учитывался тепловой нагрев ФП, в-третьих, не учитывалось распределение плотности интенсивности лазерного излучения по фотоактивной поверхности ФП. Наблюданное насыщение амплитуды и увеличение длительности импульса фотоответа объясняется коллапсом электрического поля в ОП ФП [19]. На рис. 3, a показаны распределения напряжённости электрического поля в области объёмного заряда (ООЗ) ОП ФП, рассчитанные для различных моментов времени и при разных уровнях плотности мощности лазерного импульса. Видно, что при плотности мощности 1.14 kW/cm² электрическое поле хотя и уменьшилось, но остается достаточным для разделения зарядов и поэтому режим насыщения тока не наступает. В то же время при плотности мощности 5.3 kW/cm² напряжённость электрического поля в ООЗ становится практически равной нулю, в результате чего происходит коллапс способности встроенного электрического поля $p-i-n$ -перехода разделять заряды, что в свою очередь приводит к режиму насыщения. Вследствие этого наблюдаем ограничение роста амплитуды импульса фотоответа на уровне ~ 1 V при существенном увеличении длительности выходного электрического импульса ОП ФП до $\tau_{0.5} \sim 7.54$ ns, что обусловлено преобладанием диффузационного и снижением дрейфового механизма транспорта носителей через ООЗ. Ситуация изменяется при введении той же мощности в ТП ФП. На рис. 3, b приведены распределения напряжённости электрического поля в области

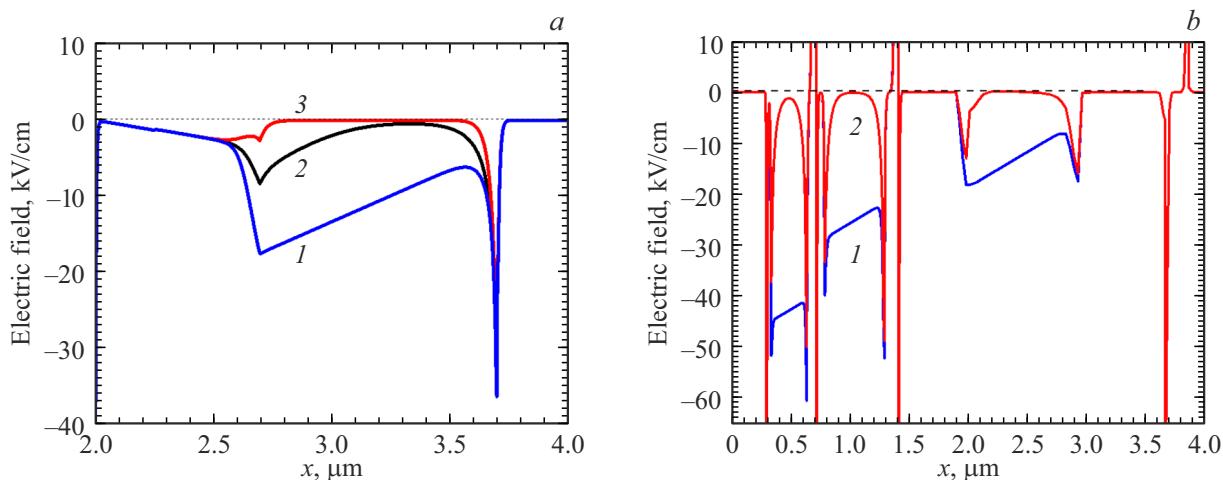


Рис. 3. Распределение напряжённости электрического поля по толщине ООЗ: (а) ОП $p-i-n$ AlGaAs/GaAs-ФП: 1 — момент начала оптического возбуждения, (2, 3) — в максимуме амплитуды импульса фотоответа при плотности мощности лазерного излучения 1.14 kW/cm^2 (2) и 5.3 kW/cm^2 (3), (б) ТП $p-i-n$ AlGaAs/GaAs-ФП по технологически заданным параметрам: 1 — момент начала оптического возбуждения, 2 — в максимуме амплитуды импульса фотоответа при возбуждении 5.3 kW/cm^2 .

ООЗ при плотности мощности лазерного излучения 5.3 kW/cm^2 .

Коллапс поля, наблюдаемый в ОП ФП при плотности мощности лазерного излучения 5.3 kW/cm^2 , приводит к сильному увеличению $\tau_{0.5}$ — длительности импульса (рис. 2, кривая 2), в то время как в трехпереходном $p-i-n$ -AlGaAs/GaAs-ФП в явном виде это не наблюдается при плотностях мощности до $\sim 9.6 \text{ kW/cm}^2$. Из рис. 3, б видно, что напряжённость электрического поля при плотности мощности 5.3 kW/cm^2 не спадает до нуля и в фронтальном $p-i-n$ -переходе сохраняется на уровне 1.2 kV/cm . Формы импульсов фотоответа для исследованных ФП и их параметры представлены на рис. 4 (кривые 1, 4) и даны в таблице. Коллапс поля в ТП ФП при плотности мощности лазерного излучения $\sim 9.6 \text{ kW/cm}^2$ в явном виде отсутствует, амплитуда импульса фотоответа составляет 2.7 V при длительности на полувысоте амплитуды $\tau_{0.5} \sim 740 \text{ ps}$ (рис. 4, таблица).

Формы импульса фотоответа ТП ФП, полученные из расчётов при плотности мощности лазерного излучения 9.6 kW/cm^2 , приведены на рис. 4, где кривая 4 — с использованием параметров из технологической схемы, кривая 5 — из измерений ВИМС. Параметры импульсов сведены в таблицу. Отличия по амплитуде смоделированных импульсов фотоответа от эксперимента для ТП ФП можно объяснить теми же факторами, указанными ранее для ОП ФП.

Таким образом, были исследованы импульсные характеристики фотоответа ОП ФП и ТП ФП в фотовольтаическом режиме при возбуждении лазерным излучением на длине волны 850 nm с длительностью $\tau_{0.5} = 140 \text{ ps}$ и уровнях плотности мощности лазерного излучения до 9.6 kW/cm^2 . Выполненные расчёты при моделировании структуры ОП ФП показали, что уширение импульса фотоотклика при плотности мощности лазерного излуче-

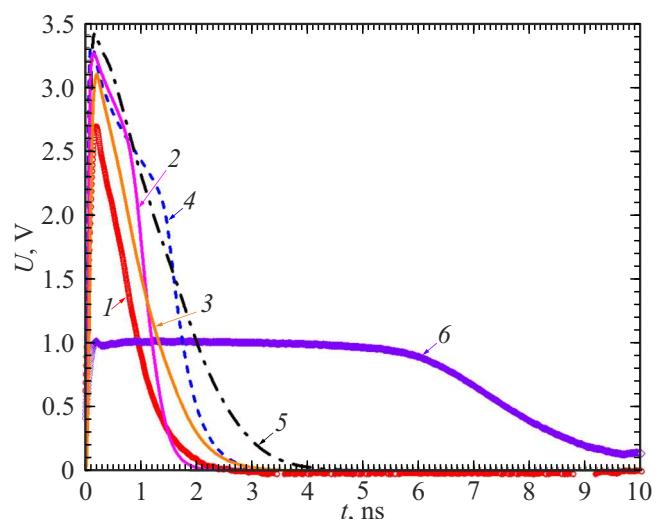


Рис. 4. Экспериментальные (кривые 1, 6) и расчётные (2–5) импульсные характеристики фотоответа ТП ФП (1–5) и ОП ФП (6) при плотности оптической мощности 5.3 W/cm^2 (2, 3, 6) и 9.6 kW/cm^2 (1, 4, 5), где кривые 2, 4 — расчёт по параметрам из технологической схемы, а 3, 5 — из измерений ВИМС.

ния $\leq 5.3 \text{ kW/cm}^2$ связано с коллапсом электрического поля в области объёмного заряда $p-i-n$ -AlGaAs/GaAs-ФП.

В монолитном ТП $p-i-n$ -AlGaAs/GaAs-ФП при преобразовании импульсного лазерного излучения в фотовольтаическом режиме на длине волны 850 nm при плотности мощности лазерного излучения до 9.6 kW/cm^2 в явном виде коллапс электрического поля отсутствует, при этом наблюдается увеличение амплитуды генерируемого электрического импульса субнаносекундного диа-

пазона пропорционально числу фотоактивных $p-i-n$ -AlGaAs/GaAs-переходов.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-19-00716 (<https://rsrf.ru/project/24-19-00716>).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Д.Ф. Зайцев, В.М. Андреев, И.А. Биленко, А.А. Березовский, П.Ю. Владиславский, Ю.Б. Гурфинкель, Л.И. Цветкова, В.С. Калиновский, Н.М. Кондратьев, В.Н. Косолобов, В.Ф. Курочкин, С.О. Слипченко, Н.В. Смирнов, Б.В. Яковлев. Радиотехника, **85** (4), 153 (2021). DOI: 10.18127/j00338486-202104-17
- [2] Л.Д. Бахрах, Д.Ф. Зайцев. ДАН, **394** (4), 465–468 (2004).
- [3] Д.Ф. Зайцев. Патент RU2298810, (2005).
- [4] Д.Ф. Зайцев. Нанофотоника и ее применение (АКТЕОН, М., 2014), с. 445.
- [5] T. Nagatsuma, H. Ito, T. Ishibashi. Laser & Photon, **3** (1–2), 123–137 (2009). DOI: 10.1002/lpor.200810024/
- [6] A. Rawat, M. Saif Islam. Proc. SPIE, 12880, 128800Q (2024). DOI: 10.1117/12.3003413
- [7] H. Ito, T. Furata, S. Kodama, T. Ishibashi. Electron. Lett., **36**, 1809–1810 (2000). <https://doi.org/10.1049/el:20001274>
- [8] И.Б. Чистохин, К.С. Журавлев. Успехи прикл. физики **3** (1), с. 85–94 (2015).
- [9] D. Maes, S. Lemey, G. Roelkens, M. Zaknoune, V. Avramovic, E. Okada, P. Sriftgiser, E. Peytavit, G. Ducournau, B. Kuyken. APL Photonics **8**, 016104, (2023). DOI: 10.1063/5.0119244
- [10] Y. Peng, K. Sun, Y. Shen, A. Beling, J. C. Campbell. Optics Express, **28** (19), 28563–28572 (2020). DOI: 10.1364/OE.399102
- [11] 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. Series, **993**, 012029 (2018). DOI: 10.1088/1742-6596/993/1/01202
- [12] В.С. Калиновский, Е.В. Контрош, И.А. Толкачев, К.К. Прудченко, С.В. Иванов. Письма в ЖТФ, **50** (22), 35–38 (2024).
- [13] J. Mathew, S. Krishnan. J. of Electronic Packaging, **144**, 010801 (2022). DOI: 10.1115/1.4050002
- [14] Koki Company Limited [Электронный ресурс], http://www.koki.org/pdf/B1-07_TB48-M742_E.pdf
- [15] А.Л. Глазов, В.С. Калиновский, Е.В. Контрош, К.Л. Муратиков. Письма в ЖТФ, **48** (22), 39–42 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.22.53806.19338
- [16] А.Л. Глазов, В.С. Калиновский, А.А. Капралов, Е.В. Контрош, К.Л. Муратиков, К.К. Прудченко. Письма в ЖТФ, **51** (4), 31–34 (2025). DOI: 10.61011/PJTF.2025.04.59840.20123
- [17] E.V. Kontrosh, V.V. Lebedev, G.V. Klimko, V.S. Kalinovskii, V.M. Andreev. J. Phys.: Conf. Ser., **697** 012185, (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1697/1/012185
- [18] В.С. Юферев, И.А. Толкачев, В.С. Калиновский. Письма в ЖТФ, **50** (1), 39–42 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.01.56925.19674
- [19] K.J. Williams, R.D. Esman, M. Dagenais. IEEE Photonics technology letters, **6** (5), 639–641 (1994).