

07.2

Мощный субнаносекундный модуль на основе $p-i-n$ AlGaAs/GaAs-фотодиодов

© В.М. Андреев, В.С. Калиновский, Н.А. Калюжный, Е.В. Контрош, А.В. Малевская, С.А. Минтаилов, М.З. Шварц

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия
E-mail: vmandreev@mail.ioffe.ru, kontrosh@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 16 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 28 мая 2024 г.

Принято к публикации 2 июня 2024 г.

Приведены результаты разработки и исследования фотоприемного модуля на основе $p-i-n$ AlGaAs/GaAs-фотодиодов при преобразовании лазерного излучения в фотовольтаическом (без обратного смещения) и фотодиодном (при обратном смещении до 120 В) режимах работы. Фотодиоды, выращенные методом МОС-гидридной эпитаксии, в фотовольтаическом режиме при возбуждении лазерным излучением на длине волны 810 нм с плотностью мощности $\sim 500 \text{ W/cm}^2$ обеспечивали КПД $\sim 54\%$. Максимальная выходная импульсная электрическая мощность фотоприемного модуля при возбуждении импульсным лазерным излучением с пиковой мощностью $\sim 13 \text{ W}$ и длительностью $\sim 1.0 \text{ ns}$ составила 2.5 W в фотовольтаическом режиме и 8.0 W в фотодиодном режиме при обратном смещении 120 В.

Ключевые слова: $p-i-n$ -фотоприемный модуль, лазерное излучение, $p-i-n$ AlGaAs/GaAs-фотодиоды, фотовольтаический режим, фотодиодный режим, МОС-гидридная эпитаксия, пиковая плотность мощности, длительность на полувысоте амплитуды.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.19.58647.19957

Фотоэлектрическое преобразование лазерного излучения широко применяется в волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) и атмосферных оптических линиях связи (АОЛС). В данных системах, как правило, применяются фотодиоды (ФД) на основе гетероструктур InGaAs/InP, перекрывающие спектральный диапазон лазерного излучения 1.3–1.55 μm и обеспечивающие в данном спектральном диапазоне передачу информации на большие расстояния в окнах прозрачности с минимальными потерями, что необходимо для эффективной работы ВОЛС и АОЛС.

Для устройств радиофотоники, включающих в себя приемопередающие тракты на основе коротких ВОЛС [1–8], а также систем АОЛС [9] перспективным является использование лазеров и ФД на основе гетеропереходов в системе AlGaAs/GaAs. Данные ФД в спектральном диапазоне 800–860 нм обеспечивают повышение эффективности и мощности систем передачи энергии и информации по оптическому каналу. Максимальные теоретические значения КПД фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения в диапазоне длин волны 800–860 нм могут достигать 85% при плотности мощности излучения более 100 W/cm^2 [10]. Практически достигнутые значения КПД составляют 54% при плотности мощности лазерного излучения $p_{\text{laser}} = 1.4 \text{ kW/cm}^2$ [11], 62% при $p_{\text{laser}} = 100 \text{ W/cm}^2$ [12] и 68.9% при $p_{\text{laser}} = 11 \text{ W/cm}^2$ [13]. Увеличение эффективности преобразования достигается в гетероструктурных ФД благодаря тыльному широкозонному барьеру для неоснов-

ных носителей заряда, а также за счет возвращения в активную область прошедшего, непоглощенного и оптического излучения, возникшего при рекомбинации не разделенных полем $p-n$ -перехода электронно-дырочных пар [12,13]. В радиофотонике и других информационно-энергетических системах наряду с задачами увеличения эффективности ФД необходимо повышение быстродействия при увеличении мощности на выходе фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения [1–8].

В настоящей работе приведены результаты исследования оптоволоконных фотоприемных модулей на основе сборки из AlGaAs/GaAs мощных быстродействующих $p-i-n$ ФД, обеспечивающих высокоэффективное фотоэлектрическое преобразование мощных субнаносекундных импульсов монохроматического излучения (810–850 нм). Фотодиоды для фотоприемных модулей были выполнены на основе AlGaAs/GaAs-гетероструктур, выращенных методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОС-гидридной эпитаксии). Структуры включали подложку n -GaAs ($N_D = 2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), тыльный потенциальный барьер n -Al_{0.2}Ga_{0.8}As толщиной 0.2 μm , фотоактивные слои n - и p -GaAs ($N_D, N_A = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) с суммарной толщиной 1.3 μm и расположенный между ними нелегированный „дрейфовый“ i -слой GaAs толщиной 1.5 μm . Фронтальный широкозонный слой p -Al_{0.13}Ga_{0.87}As толщиной 3 μm с концентрацией акцепторов, повышенной до $N_A \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, обеспечивал уменьшение омических потерь. Затем формировались чипы ФД с фоточувствительной областью диаметром 250–1000 μm . Омическое

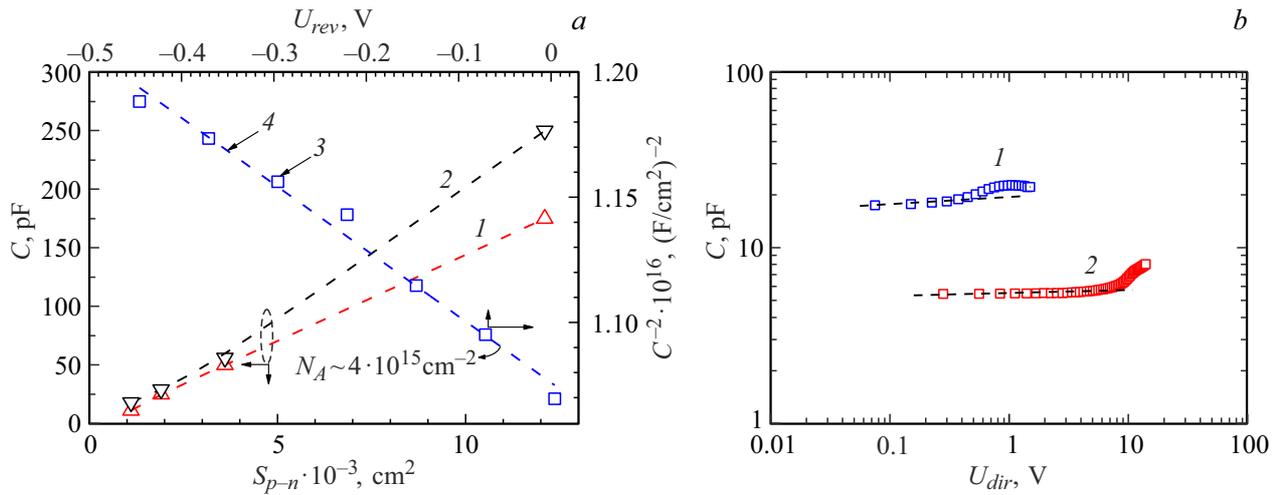


Рис. 1. *a* — зависимости емкостей $p-i-n$ ФД (\varnothing 250–1000 μm) от величины фотоактивной площади: при отсутствии смещения (1) и при прямом смещении 0.8 V (2), зависимость $C^{-2}(U)$ для $p-i-n$ AlGaAs/GaAs ФД (\varnothing 300 μm) (3) и ее линейная аппроксимация (4). *b* — зависимости емкостей от прямого напряжения смещения для $p-i-n$ ФД (\varnothing 300 μm) (1) и фотоприемного модуля из 16 ФД (2).

сопротивление, приведенное к единице площади ФД, составило порядка $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$.

Выполнены измерения вольт-фарядных характеристик (ВФХ) ФД с разной фотоактивной площадью (кривые 1, 2 на рис. 1, *a*). Емкость определялась с использованием LCR-измерителя на частоте сигнала 100 kHz. Согласно расчетам на основе экспериментальных ВФХ ФД с диаметром фоточувствительной поверхности 300 μm (кривая 3 на рис. 1, *a*), фоновая концентрация легирующей примеси в i -слое вблизи границы с p -слоем составляла $N_A \sim 4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

Разработанные с учетом концентрации примеси $N_A \sim 4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ в обедненном i -слое $p-i-n$ AlGaAs/GaAs ФД в дальнейшем были использованы в фотоэлектрических модулях. Исследуемые фотоприемные модули включали 16 последовательно коммутированных чипов $p-i-n$ ФД с диаметром фотоактивной поверхности 300 μm , смонтированных на теплоотводящей электроизолирующей микрополосковой керамической плате. Возбуждение модуля импульсами лазерного излучения осуществлялось по многомодовым оптоволоконам с диаметром сердечника 200 μm . Во всех измерениях вне зависимости от диаметра использованных многомодовых оптических волокон оптический сигнал полностью вводился в исследуемые $p-i-n$ ФД. В фотоэлектрическом модуле пространство между концами оптоволокон и фоточувствительными поверхностями ФД заполнялось иммерсионной жидкостью с показателем преломления, равным показателю преломления оптоволокон.

Передача энергии по оптоволокну позволяет осуществлять гальваническую развязку передающего и приемного энергетических модулей, что обеспечивает лучшую защиту от электромагнитных помех. Разработанный модуль ФД предполагается применять для преоб-

разования импульсного лазерного излучения в фотовольтаическом (без смещения) и фотодиодном режимах. В фотовольтаическом режиме функционирования $p-i-n$ ФД генерирует фотоэдс. Поэтому необходимо измерить ВФХ отдельных ФД и модуля при прямом напряжении смещения. Экспериментальные ВФХ как отдельного $p-i-n$ ФД, так и фотоэлектрического модуля из 16 последовательно включенных ФД представлены на рис. 1, *b*. Значения емкости для одиночных $p-i-n$ ФД при прямом смещении до 0.5 V остаются практически неизменными. Для сборки из 16 ФД постоянство емкости имеет место до 8 V. Модуль из 16 ФД показал следующие значения емкостей: при отсутствии напряжения смещения ≤ 5 pF, а при прямом смещении 10 V до 7 pF.

Измерения нагрузочных вольт-амперных характеристик (ВАХ) $p-i-n$ ФД осуществлялись при вводе лазерного излучения из оптоволокон диаметром 50 μm с длительностью импульсов 66 μs и частотой следования 200 Hz на длине волны 810 nm в диапазоне плотности мощности 0.1–1.5 kW/cm^2 . На рис. 2 приведены фотовольтаические параметры ФД в зависимости от мощности лазерного излучения. Зависимости тока короткого замыкания (кривая 1) и напряжения холостого хода (кривая 2) представлены на рис. 2, *a*. Максимальные значения КПД ($\sim 54\%$), полученные из расчета нагрузочных ВАХ, были достигнуты в диапазоне плотности мощности лазерного излучения 400–700 W/cm^2 (кривая 1 на рис. 2, *b*).

На рис. 3, *a* представлены результаты измерения электрических импульсов фотоответа фотоприемного модуля из 16 $p-i-n$ AlGaAs/GaAs ФД в фотовольтаическом режиме при отсутствии обратного смещения (кривая 2) и в фотодиодном режиме при обратном смещении (кривая 3). Измерительная цепь включала последовательно скоммутированные в модуле $p-i-n$

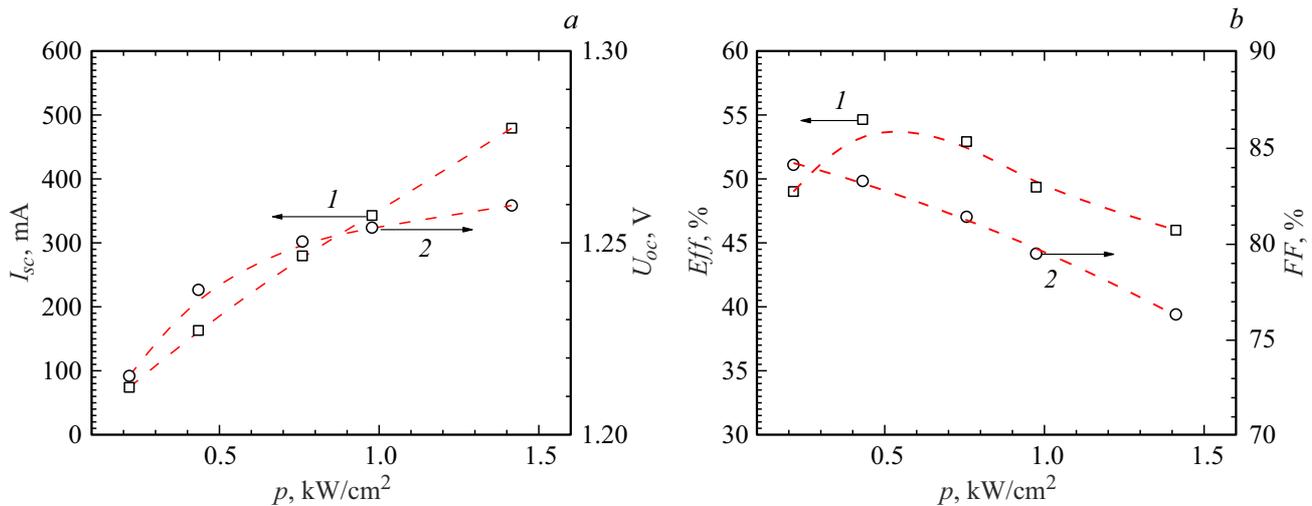


Рис. 2. Зависимости от плотности мощности лазерного излучения ($\lambda = 810$ nm) параметров $p-i-n$ ФД: a — тока короткого замыкания I_{sc} (1) и напряжения холостого хода U_{oc} (2); b — КПД (1) и фактора заполнения нагрузочной характеристики FF (2).

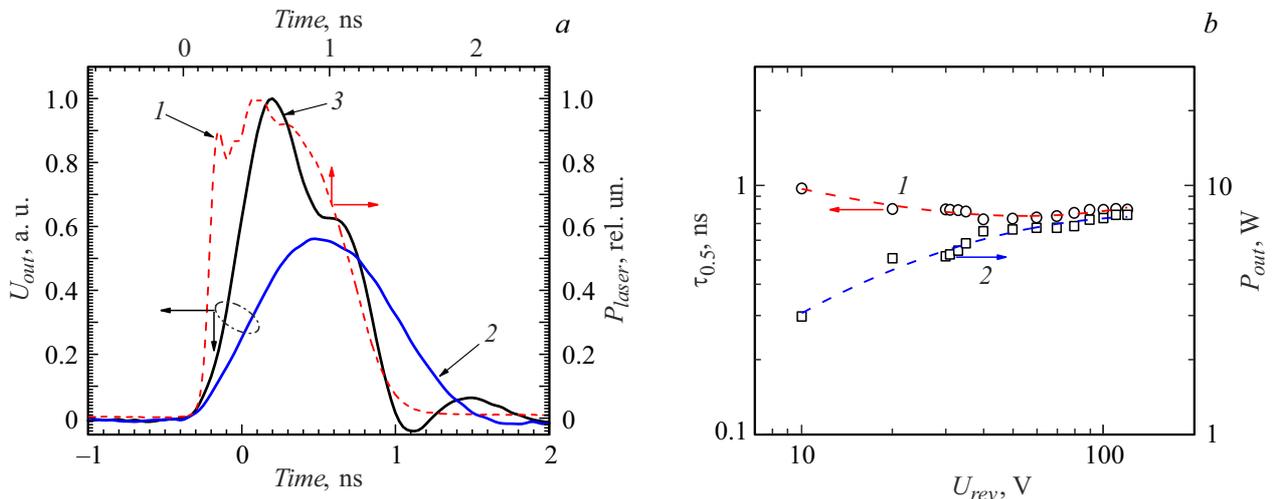


Рис. 3. a — нормированные формы импульсов: лазерного излучения ($\lambda = 850$ nm, $P_{peak} = 12.87$ W) (1), фотоэлектрического модуля из 16 $p-i-n$ ФД без смещения (2) и при обратном смещении 120 V (3). b — зависимость длительности электрических импульсов (на полувысоте амплитуды) $\tau_{0.5}$ на выходе фотоприемного модуля из 16 $p-i-n$ ФД от обратного смещения (1) и зависимость величины пиковой мощности фотоприемного модуля от величины обратного смещения ($P_{peak} = 12.87$ W) на сопротивлении нагрузки $R_{load} = 25 \Omega$ (2).

ФД, нагрузку (50Ω) и источник обратного смещения. Выходное импульсное напряжение на нагрузке регистрировалось осциллографом с полосой пропускания 7 GHz с входным сопротивлением 50Ω . Таким образом, суммарное сопротивление нагрузки составляло 25Ω , что соответствовало точке оптимальной нагрузки на световой ВАХ модуля и обеспечивало максимальную выходную электрическую мощность. На рис. 3, a также приведена форма импульса лазерного излучения с пиковой мощностью ~ 13.0 W (кривая 1). На основе полученных импульсных характеристик фотосоответа был выполнен расчет фотоэлектрических параметров в зависимости от прикладываемаемого обратного напряжения смещения в диапазоне $U_{rev} = 0-120$ V: длительности

электрического сигнала на уровне полувысоты амплитуды (кривая 1 на рис. 3, b), а также импульсной электрической мощности (кривая 2 на рис. 3, b). В диапазоне $U_{rev} = 0-120$ V длительность импульса фотосоответа уменьшается от ~ 1 до 0.75 ns. Максимальная выходная импульсная электрическая мощность фотоприемного модуля при мощности лазерного возбуждения ~ 13.0 W в фотовольтаическом режиме работы составила $P_{out} = 2.5$ W, а в фотодиодном режиме при обратном смещении $U_{rev} = 120$ V — $P_{out} = 8.0$ W. Уменьшение длительности импульса фотосоответа фотоприемного модуля при обратном смещении обусловлено уменьшением емкости $p-i-n$ ФД.

Приведены результаты исследования оптоволоконного фотоприемного модуля на основе 16 последовательно скоммутированных $p-i-n$ AlGaAs/GaAs ФД при возбуждении лазерным излучением в фотовольтаическом и фотодиодном режимах работы. В фотодетекторах с диаметром фоточувствительной поверхности $300\ \mu\text{m}$, входящих в модуль, при плотности мощности лазерного излучения $\sim 500\ \text{W}/\text{cm}^2$ КПД достигал $\sim 54\%$. Длительность электрических импульсов на выходе фотоприемного модуля при обратном напряжении смещения в диапазоне $U_{rev} = 30-120\ \text{V}$ составляла $\tau_{0.5} = 0.75-0.8\ \text{ns}$. Достигнутые параметры получены за счет разработанной конструкции $p-i-n$ -структуры ФД, идентичности их фотовольтаических характеристик, технологии монтажа диодов на микрополосковую линию с минимизацией паразитных индуктивностей и емкостей в модуле и согласования с внешней нагрузкой.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D. Wake, A. Nkansah, N.J. Gomes, C. Leithien, C. Sion, J.-P. Vilcot, *J. Lightwave Technol.*, **26** (15), 2484 (2008). DOI: 10.1109/JLT.2008.927171
- [2] H. Yang, C.L.L.M. Daunt, F. Gity, K.-H. Lee, W. Han, B. Corbett, F.H. Peters, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **22** (23), 1747 (2010). DOI: 10.1109/LPT.2010.2085041
- [3] A.S. Cross, Q. Zhou, A. Beling, Y. Fu, J.C. Campbell, *Opt. Express*, **21** (8), 9967 (2013). DOI: 10.1364/OE.21.009967
- [4] E. Rouvalis, F.N. Baynes, X. Xie, K. Li, Q. Zhou, F. Quinlan, T.M. Fortier, S.A. Diddams, A.G. Steffan, A. Beling, J.C. Campbell, *J. Lightwave Technol.*, **32** (20), 3810 (2014).
- [5] V.J. Urick, in *Conf. on lasers and electro-optics*, OSA Technical Digest (online) (Optica Publ. Group, 2018), paper SM1C.6. DOI: 10.1364/CLEO_SI.2018.SM1C.6
- [6] 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. Косолюбов, В.Ф. Курочкин, С.О. Слипченко, Н.В. Смирнов, Б.В. Яковлев, *Радиотехника*, **85** (4), 153 (2021). DOI: 10.18127/j00338486-202104-17
- [7] D.C. Scott, T.A. Vang, J.E. Leigh, D.V. Forbes, K. Everett, F. Alvarez, R. Johnson, J. Brock, L. Lembo, *Proc. SPIE*, **4112**, 75 (2000). DOI: 10.1117/12.399379
- [8] B. Li, S. Tang, N. Jiang, Z. Shi, R.T. Chen, *Proc. SPIE*, **3952**, 114 (2000). DOI: 10.1117/12.384390
- [9] В.С. Калиновский, Е.И. Теруков, Ю.В. Ащеулов, Е.В. Контрош, В.С. Юферева, К.К. Прудченко, А.В. Чекалин, Е.Е. Терукова, И.А. Толкачев, С.Е. Гончаров, В.М. Устинов, *Письма в ЖТФ*, **49** (2), 21 (2023). DOI: 10.21883/PJTF.2023.02.54281.19306 [V.S. Kalinovskii, E.I. Terukov, Yu.V. Ascheulov, E.V. Kontrosh, V.S. Yuferev, K.K. Prudchenko, A.V. Chekalin, E.E. Terukova, I.A. Tolkachev, S.E. Goncharov, V.M. Ustinov, *Tech. Phys. Lett.*, **49** (1), 62 (2023). DOI: 10.21883/TPL.2023.01.55352.19306].
- [10] E. Oliva, E. Dimroth, A.W. Bett, *Progr. Photovol.: Res. Appl.*, **16** (4), 289 (2008). DOI: 10.1002/pip.811
- [11] А.Н. Паньчак, П.В. Покровский, Д.А. Малевский, В.Р. Ларионов, М.З. Шварц, *Письма в ЖТФ*, **45** (2), 26 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.02.47218.17491 [A.N. Panchak, P.V. Pokrovskiy, D.A. Malevskiy, V.R. Larionov, M.Z. Shvarts, *Tech. Phys. Lett.*, **45** (1), 24 (2019). DOI: 10.1134/S1063785019010310].
- [12] N.A. Kalyuzhnyy, A.V. Malevskaya, S.A. Mintairov, M.A. Mintairov, M.V. Nakhimovich, R.A. Salii, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev, *Solar Energy Mater. Solar Cells*, **262**, 112551 (2023). DOI: 10.1016/j.solmat.2023.112551
- [13] H. Helmers, E. Lopez, O. Höhn, D. Lackner, J. Schön, M. Schauerte, M. Schachtner, F. Dimroth, A.W. Bett, *Phys. Status Solidi RRL*, **15** (7), 2100113 (2021). DOI: 10.1002/pssr.202100113