07

# Контактные системы „мостикового“ типа в InGaAs/InP фотоэлектрических преобразователях

© А.В. Малевская, Н.А. Калюжный, Н.Д. Ильинская, Ф.Ю. Солдатенков, А.А. Пивоварова, Р.А. Салий, Н.М. Лебедева, Р.В. Левин, В.С. Эполетов, П.В. Покровский, Д.А. Малевский

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: amalevskaya@mail.ioffe.ru

*Поступило в Редакцию 2 июня 2025 г.*
*В окончательной редакции 28 июля 2025 г.*
*Принято к публикации 7 августа 2025 г.*

Разработаны методы снижения резистивных потерь и емкости фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения ($1.55\,\mu$m) на основе InGaAs/InP-гетероструктур, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии. Проведены исследования различных контактных систем: NiCr/Ag/Au, AgMn/Ni/Au, Cr/Au/Ni/Au и Pd/Ge/Au, Au(Ge)/Ni/Au к слоям InGaAs и InP $p$- и $n$-типа проводимости соответственно. Проведен анализ влияния состава и режимов формирования омических контактов на величину удельного контактного сопротивления и вольт-амперные характеристики приборов. Минимальные значения удельного контактного сопротивления получены при формировании омического контакта Pd/Ge/Au к $n^+$-InGaAs ($\sim 10^{-7}\,\Omega\cdot$cm$^2$) и NiCr/Ag/Au к $p$-InGaAs ($-10^{-6}\,\Omega\cdot$cm$^2$). Разработана конструкция фотоэлектрических преобразователей с диаметром фоточувствительной области от $30\,\mu$m с контактной системой „мостикового“ типа, которая позволила уменьшить площадь $p-n$-перехода в фотоэлементе и соответственно его емкость.

**Ключевые слова:** InGaAs/InP фотоэлектрический преобразователь, контактные системы, резистивные потери.

DOI: 10.61011/JTF.2026.02.62294.135-25

## Введение

Фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) на основе A3B5 гетероструктур широко используются для преобразования лазерного излучения (ЛИ) в диапазоне длин волн $0.8-1.55\,\mu$m в волоконно-оптических и атмосферных оптических линиях связи [1–4]. Особенно важную категорию ФЭП ЛИ представляют собой фотоприемники мощных сигналов малой длительности с высокой (гигагерцовой) частотой повторения [5–7]. В диапазоне $0.8-0.86\,\mu$m основными являются AlGaAs/GaAs ФЭП, обеспечивающие преобразование мощного ЛИ [8]. При передаче информации наиболее востребованы длины волн $\sim 1.3$ и $\sim 1.55\,\mu$m, на которых обеспечивается трансляция на большие расстояния с минимальными потерями в окнах прозрачности оптоволоконных линий связи [9]. Для этого диапазона возможно использовать в активной области ФЭП материал InGaAs [10,11], который продемонстрировал полосу пропускания $\sim 1.3$ GHz ($\lambda = 0.97\,\mu$m) [12] и $\sim 8.3$ GHz по уровню $-3$ dB ($\lambda = 0.9\,\mu$m) [13]. $P-i-n$-ФЭП на основе квантовых точек InAs/InGaAs обладают полосой пропускания до 5.5 GHz ($\lambda = 1.5\,\mu$m) [14]. Другим решением являются гетероструктуры, выращенные на InP-подложках, с активной областью на основе псевдоморфных InGaAsP четверных [15] или тройных $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ твердых растворов. При использовании метаморфной технологии роста фоточувствительность гетероструктур InGaAs/InP может быть успешно распространена до $2.3-2.4\,\mu$m [16]. Быстродействующие ФЭП средней инфракрасной области спектра $1.2-2.4\,\mu$m на основе гетероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb с разделенными чувствительной и контактной мезами, соединенными „мостиковым“ фронтальным контактом, обладают полосой пропускания 2–5 GHz [17].

Основной целью настоящей работы является исследование методов снижения резистивных потерь и емкости приборов при формировании быстродействующих ФЭП на основе InGaAs/InP-гетероструктур. Для достижения поставленной цели выполнены исследования различных контактных систем к слоям InGaAs, InP $n$- и $p$-типа проводимости, разработаны новые конструкции приборов с контактными системами „мостикового“ типа и проведен анализ их влияния на характеристики ФЭП.

## 1. Гетероструктура ФЭП

ФЭП изготавливались на основе $p-i-n$-гетероструктур InGaAs/InP, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии на подложках InP двух типов:

— сильнолегированной подложке $n$-типа проводимости ($10^{19}$ cm$^{-3}$) (рис. 1, *a*);

— полуизолирующей подложке ($10^{15}$ cm$^{-3}$) (рис. 1, *b, c*).

Активная область гетероструктуры включала $p-i-n$-слои InGaAs с $i$-областью толщиной $\sim 1\,\mu$m, заключенные в барьерные слои InP $n$- и $p$-типа проводимости

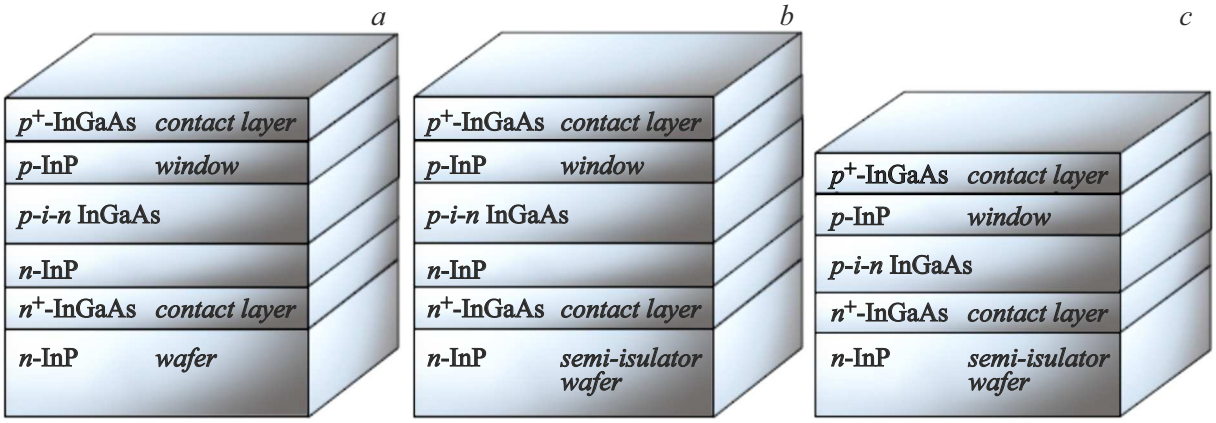


**Рис. 1.** Схематическое изображение InGaAs/InP-гетероструктуры на сильнолегированной подложке $n$-типа проводимости ($a$), полуизолирующей подложке с контактным слоем $n^+$-InGaAs ($b$) и $n^+$-InP ($c$).

соответственно. Для формирования низкоомных омических контактов выращивали сильно легированные контактные слои. В работе были проведены исследования разных составов контактных слоев на основе InGaAs и InP $p$- и $n$-типа проводимости для анализа возможности снижения контактного сопротивления и последовательного сопротивления приборов в целом. При росте гетероструктуры контактный слой $p$-типа проводимости формировался на основе высоколегированного $p^+$-InGaAs-материала, при росте контактного слоя $n$-типа проводимости рассмотрены варианты использования $n^+$-InGaAs и $n^+$-InP (рис. 1, $b, c$).

## 2. Контактные системы к слоям $n$- и $p$-типа проводимости

Преобразование мощных оптических сигналов ведет к необходимости снижения резистивных потерь на сопротивлении растекания, контактном сопротивлении и общем последовательном сопротивлении прибора. Основным путем снижения резистивных потерь является разработка и оптимизация технологии формирования контактных систем [18]. В полупроводниковых приборах на основе GaAs используются контактные системы на основе слоев AgMn/Ni/Au, Cr/Au, Pd/Ge/Au, Au(Ge)/Ni/Au [19,20]. Для их применения в ФЭП на основе InGaAs/InP-гетероструктур необходимо проведение дополнительных исследований по выявлению влияния состава и режимов отжига контактов на фотоэлектрические характеристики приборов.

В настоящей работе исследовались контактные системы при изготовлении InGaAs/InP ФЭП с разной топологией контактных площадок (рис. 2). При изготовлении ФЭП на сильнолегированной подложке InP $n$-типа проводимости (рис. 1, $a$) на тыльной стороне приборной структуры формировался сплошной контакт Au(Ge)/Ni/Au. При изготовлении чипов из структуры на полуизолирующей подложке InP (рис. 1, $b, c$) контактная

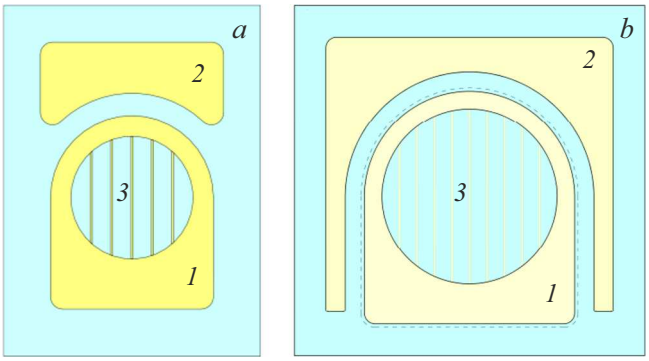


**Рис. 2.** Схематическое изображение топологии контактных площадок (*1*) к слою $p$-типа проводимости и (*2*) к слою $n$-типа проводимости, формируемых на фронтальной поверхности InGaAs/InP ФЭП с диаметром фоточувствительной области (*3*) 300 ($a$) и 500 $\mu$m ($b$).

площадка к слою $n$-типа проводимости ($n^+$-InP или $n^+$-InGaAs), как и контактная площадка к верхнему слою $p$-типа формировалась на фронтальной стороне ФЭП.

В качестве фронтального контакта к InGaAs $p$-типа проводимости в работе были рассмотрены различные контактные системы: NiCr/Ag/Au, AgMn/Ni/Au, Cr/Au. При напылении рассмотренных контактных материалов к InP $p$-типа проводимости омический контакт не формируется. На рис. 3 показаны темновые вольт-амперные характеристики (ВАХ) ФЭП с контактными системами к $p$-InGaAs.

При использовании контактной системы AgMn/Ni/Au наблюдается разброс темновых токов ФЭП, изготовленных на одной гетероструктуре, а также увеличение тока утечки из-за возможного шунтирования $p-n$-перехода при диффузии материала контакта в полупроводник при термическом отжиге. Формирование контакта на основе Cr/Au ведет к увеличению последовательного сопротивления прибора из-за большого вклада удельного контактного сопротивления на границе металл/полупроводник.

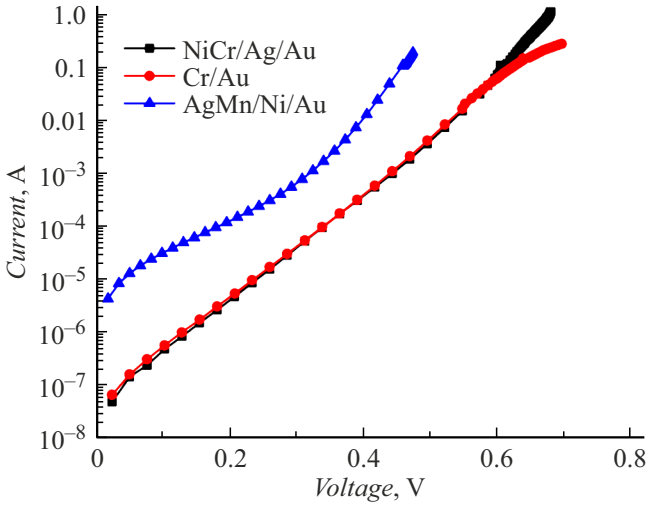


**Рис. 3.** Прямая ветвь ВАХ ФЭП с диаметром фоточувствительной области 300 $\mu$m с контактными системами к InGaAs $p$-типа проводимости: NiCr/Ag/Au, Cr/Au и AgMn/Ni/Au.

Минимальное последовательное сопротивление и ток утечки наблюдается на образцах с контактом на основе слоев NiCr/Ag/Au за счет низких значений удельного контактного сопротивления $\sim 10^{-6}\,\Omega\cdot\text{cm}^2$ и низкой степени диффузии в материал полупроводника.

При изготовлении ФЭП на полуизолирующей подложке InP снижение резистивных потерь достигается при формировании фронтального омического контакта на основе слоев AuGe/Ni/Au или Pd/Ge/Au к высоколегированному контактному слою гетероструктуры $n^+$-InGaAs или $n^+$-InP. Снижение температурного воздействия на ФЭП в ходе их изготовления возможно при использовании контактной системы Pd/Ge/Au, что позволяет предотвратить деградацию уже сформированного контакта $p$-типа проводимости [18]. На рис. 4, $a$ представлены зависимости удельного контактного сопротивления от отжига в диапазоне температур 150 °C–400 °C системы Pd/Ge/Au, нанесенной на слои $n^+$-InGaAs и $n^+$-InP. Измерения и расчет контактного сопротивления выполнены с использованием метода TLM (transmission line method, метод линии передачи) [21]. Минимальные значения удельного контактного сопротивления $1\cdot10^{-6}$–$1\cdot10^{-7}\,\Omega\cdot\text{cm}^2$ получены при формировании омического контакта Pd/Ge/Au к $n^+$-InGaAs при температуре отжига 170 °C–290 °C. При использовании слоя $n^+$-InP значения контактного сопротивления значительно выше — $5\cdot10^{-5}$–$3\cdot10^{-4}\,\Omega\cdot\text{cm}^2$. Для анализа влияния материала контакта на последовательное сопротивление приборов изготовлены ФЭП с диаметром фоточувствительной области 500 $\mu$m и измерены их ВАХ (рис. 4, $b$). Зарегистрировано снижение последовательного сопротивления приборов до $R_s = 8.8\cdot10^{-4}\,\Omega\cdot\text{cm}^2$ на структурах со слоем $n^+$-InGaAs, а на структурах с $n^+$-InP значение $R_s$ составило $1.86\cdot10^{-3}\,\Omega\cdot\text{cm}^2$. Снижение резистивных потерь возможно также за счет увеличения площади поперечного сечения контактных шин, получаемого при их электрохимическом наращивании с использованием слоев Ag/Ni/Au до общей толщины 2–5 $\mu$m [22].

## 3. Контактные системы „мостикового“ типа

Проведены исследования и разработана конструкция ФЭП с контактными системами „мостикового“ типа, которые обеспечивают уменьшение площади $p$–$n$-перехода и соответственно его емкости [23]. Изготовлены ФЭП с диаметром фоточувствительной области 30 и 80 $\mu$m на основе InGaAs/InP-гетероструктуры.

Изготовление образцов ФЭП включает этап осаждения слоев $TiO_x/SiO_2$ (при $x$, близком к 2), которые играют роль антиотражающего покрытия для фоточувствительной области прибора (снижение оптических потерь на ввод излучения составило менее 0.5 %) и выполняют функцию диэлектрической изоляции для контактной площадки. Для ФЭП на сильнолегированной подложке InP $n$-типа проводимости осуществляется напыление локального фронтального омического контакта $p$-типа проводимости по периметру фоточувствительной области с выводом контактной площадки (*2* на рис. 5) для монтажа ФЭП на диэлектрическое покрытие. Формирование „мостиковой“ структуры выполнено путем обтрава фоточувствительной области элемента, контактной мезаструктуры и перемычки в едином технологическом цикле при травлении в растворе на основе бромистоводородной кислоты и бихромата калия ($HBr:K_2Cr_2O_7$) до полного удаления рабочих слоев между мезами (рис. 5). При этом электрохимическое утолщение контактного „мостика“ способствует не только снижению резистивных потерь, но и увеличению механической жесткости конструкции ФЭП.

При изготовлении ФЭП на основе структуры с полуизолирующей подложкой InP формирование контакта „мостикового“ типа к слою $n$-типа проводимости осуществляется локально к высоколегированному контактному слою $n^+$-InGaAs или $n^+$-InP (рис. 1, $b, c$). А рабочая меза создается с фронтальной стороны посредством селективного удаления слоев гетероструктуры последовательно в разных травителях вплоть до контактного слоя. На рис. 6 приведен пример формирования мезы в структуре с контактным слоем $n^+$-InGaAs:

— контактный слой $p^+$-InGaAs травится в сильноразбавленном растворе на основе серной кислоты и перекиси водорода ($H_2SO_4:H_2O_2$);

— широкозонное окно $p$-InP и слой $n$-InP — в разбавленной соляной кислоте ($HCl{:}H_2O$);

— $p$–$i$–$n$-InGaAs — в растворе на основе ортофосфорной кислоты и перекиси водорода ($H_3PO_4:H_2O_2$).

Формирование локального контакта к слою $n$-типа проводимости осуществляется путем напыления слоев

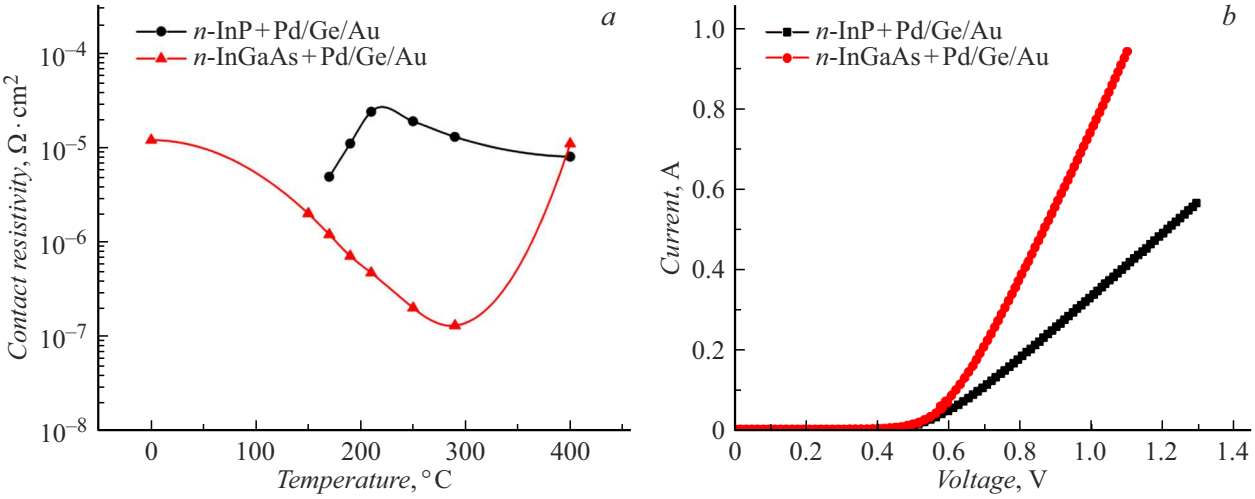


**Рис. 4.** Зависимость удельного контактного сопротивления Pd/Ge/Au к слоям InGaAs и InP $n$-типа проводимости от температуры отжига ($a$) и прямая ветвь ВАХ ФЭП с диаметром фоточувствительной области 500 $\mu$m ($b$).

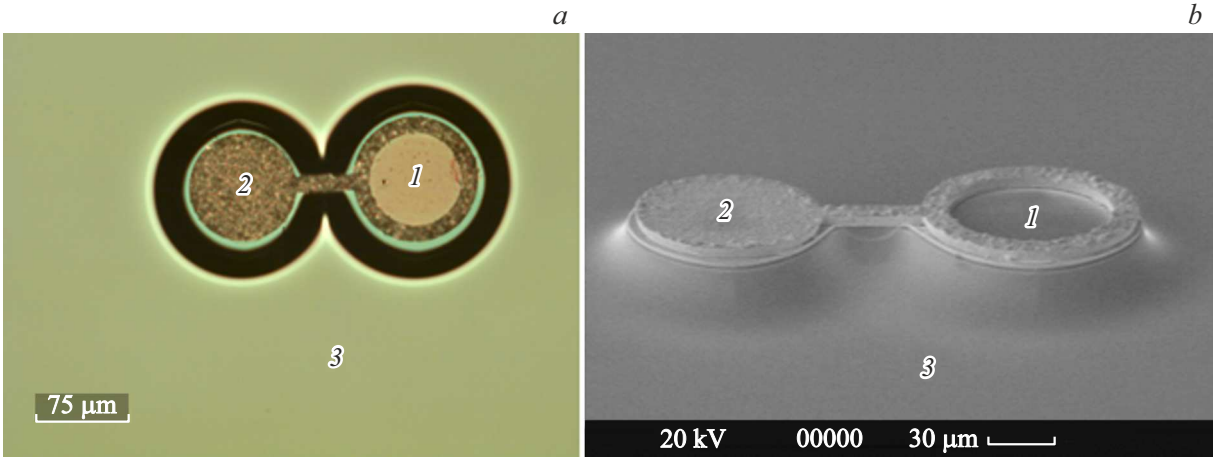


**Рис. 5.** Фотография ($a$) и изображение ($b$), выполненное на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ), ФЭП с фоточувствительной областью диаметром 80 $\mu$m (*1*) и фронтальным контактом NiCr/Ag/Au+Ag/Ni/Au (*2*), изготовленном на сильнолегированной подложке $n$-InP (*3*).

Pd/Ge/Au, с последующим его отжигом при температурах ниже 200 °C (*3* на рис. 7).

Проведен анализ электрических свойств ФЭП с диаметром фоточувствительной области 30 и 80 $\mu$m, изготовленных на сильнолегированной подложке $n$-InP с контактными системами „мостикового“ типа. Измерения темновой ВАХ ФЭП показали отсутствие токов утечки в пределах чувствительности измерительного оборудования ($< 10^{-9}$ A при напряжении $< 0.1$ V), что свидетельствует о высоком качестве формирования мезаструктуры. Последовательное сопротивление ФЭП составляет $R_s = (2{-}4) \cdot 10^{-4}\,\Omega{\cdot}\text{cm}^2$, что свидетельствует о низком уровне резистивных потерь. Снижение площади $p{-}n$-перехода элемента существенно увеличивает быстродействие прибора, что соответствует основному функциональному назначению ФЭП — приему — преобразованию сигналов гигагерцового уровня.

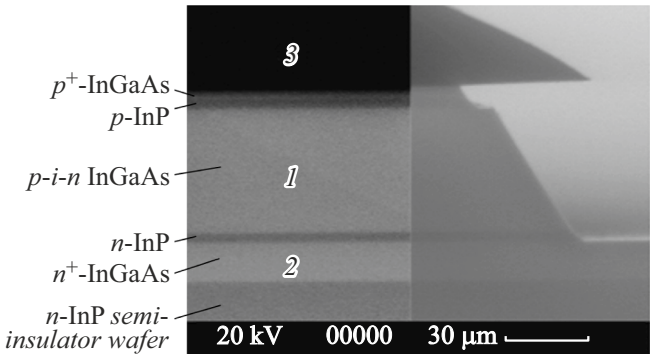


**Рис. 6.** Изображение СЭМ скола InGaAs/InP-гетероструктуры (*1*) после селективного травления до контактного слоя n+-InGaAs (*2*) через маску фоторезиста (*3*).

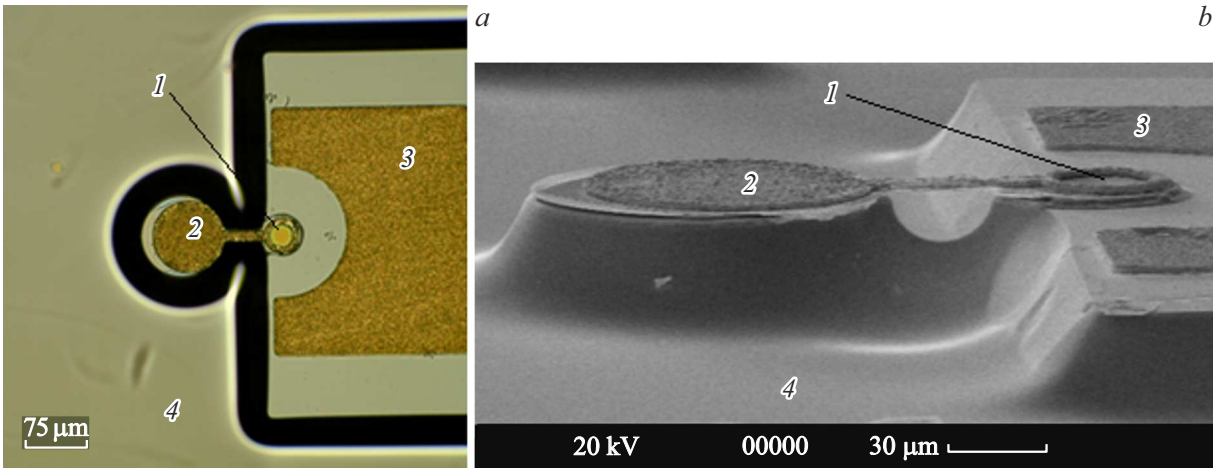


**Рис. 7.** Фотография (*a*) и изображение СЭМ (*b*) ФЭП с фоточувствительной областью диаметром 30 $\mu$m (*1*) с фронтальным „мостиковым“ контактом (*2*) к слою *p*-типа проводимости и контактом (*3*) к слою *n*-типа проводимости, изготовленному на полуизолирующей подложке InP (*4*).

## Заключение

Проведено исследование различных контактных систем к InGaAs и InP *n*- и *p*-типа проводимости. Достигнуты минимальные значение удельного контактного сопротивления $1 \cdot 10^{-7}\,\Omega\cdot\text{cm}^2$ при формировании омического контакта на основе Pd/Ge/Au к контактному слою $n^+$-InGaAs при температуре отжига 290 °C и значения $\sim 10^{-6}\,\Omega\cdot\text{cm}^2$ при предельно низкой температуре отжига — 170 °C, при которой минимизируется деградация приборов во время проведения постростовых операций. Разработана контактная система „мостикового“ типа с выводом контактной площадки за пределы фоточувствительной области ФЭП, что обеспечивает снижение емкости прибора за счет уменьшения общей площади $p-n$-перехода. Проведенные исследования омических контактов позволили снизить резистивные потери InGaAs/InP ФЭП — значение последовательного сопротивления приборов $R_s$ составляет $(2-4) \cdot 10^{-4}\,\Omega\cdot\text{cm}^2$.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

[1] C. Algora, I. García, M. Delgado, R. Pena, C. Vazquez, M. Hinojosa, I. Rey-Stolle. Joule, **6**, 340 (2022). DOI: 10.1016/j.joule.2021.11.014

[2] Y. Zheng, G. Zhang, Zh. Huan, Y. Zhang, G. Yuan, Q. Li, G. Ding, Zh. Lv, W. Ni, Yu. Shao, X. Liu, J. Zu. Space Solar Power and Wireless Transmission, **1** (1), 17 (2024). DOI: 10.1016/j.sspwt.2023.12.001

[3] 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

[4] N.A. Kalyuzhnyy, A.V. Malevskaya, S.A. Mintairov, M.A. Mintairov, M.V. Nakhimovich, R.A. Salii, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev. Sol. Energy Mater. Sol. Cells, **262**, 112551 (2023). DOI: 10.1016/j.solmat.2023.112551

[5] D.C. Scott, T.A. Vang, J.E. Leigth, D.V. Forbes, K. Everett, F. Alvarez, R. Johnson, J. Brock, L. Lembo. Proc. SPIE, 4112, **75** (2000). DOI: 10.1117/12.399379

[6] B. Li, S. Tang, N. Jiang, Z. Shi, R.T. Chen. Proc. SPIE, **3952**, 114 (2000). DOI: 10.1117/12.384390

[7] 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

[8] В.М. Андреев, В.С. Калиновский, Н.А. Калюжный, Е.В. Контрош, А.В. Малевская, С.А. Минтаиров, М.З. Шварц. Письма в ЖТФ, **50** (19), 5 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.19.58647.19957

[9] R. Pena, C. Algora. *20th European Photov. Sol. Energy Conf.* (Barcelons, Spain, 2005), p. 488.

[10] F. Koyama, D. Schlenker, T. Miyamoto, Z. Chen, A. Matsutani, T. Skaguchi, K. Iga. Electron. Lett., **35**, 1079 (1999). DOI: 10.1049/el:19990756

[11] A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, N.A. Maleev, S.S. Mikhrin, V.M. Ustinov, A.F. Tsatsul'nikov, M.V. Maximov, B.V. Volovik, D.A. Bedarev, Yu.M. Shernyakov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, N.N. Ledentsov, D. Bimberg. Appl. Phys. Lett., **75**, 1926 (1999). DOI: 10.1063/1.124873

[12] B.K. Jeong, Y.M. Song, V.V. Lysak, Y.T. Lee. J. Optoelectron. Adv. Mater., **10**, 2547 (2008).

[13] С.А. Минтаиров, С.А. Блохин, Н.А. Калюжный, М.В. Максимов, Н.А. Малеев, А.М. Надточий, Р.А. Салий, Н.В. Крыжановская, А.Е. Жуков. Письма в ЖТФ, **48** (4), 32 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.04.52082.19059

[14] D. Inoue, Y. Wan, D. Jung, J. Norman, C. Shang, N. Nishiyama, S. Arai, A.C. Gossard, J.E. Bowers. Appl. Phys. Lett., **113**, 093506 (2018). DOI: 10.1063/1.5041908

[15] M.N. Beattie, H. Helmers, G.P. Forcade, C.E. Valdivia, O. Höhn, K. Hinzer. IEEE J. Photovoltaics, **13** (1), 113 (2023). DOI: 10.1109/JPHOTOV.2022.3218938

[16] Н.А. Калюжный, С.С. Кижаев, С.А. Минтаиров, А.А. Пивоварова, Р.А. Салий, А.В. Черняев. Письма в ЖТФ, **50** (17), 15 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.17.58574.19966

[17] И.А. Андреев, О.Ю. Серебренникова, Г.С. Соколовский, В.В. Дюделев, Н.Д. Ильинская, Г.Г. Коновалов, Е.В. Куницына, Ю.П. Яковлев. ФТП, **47** (8), 1109 (2013). DOI: 10.47612/0514-7506-2023-90-1-102-108
[18] A.V. Malevskaya, F.Yu. Soldatenkov, R.V. Levin, N.A. Kalyuzhnyy, M.Z. Shvarts. Vacuum, **233**, 114030 (2025). DOI: 10.1016/j.vacuum.2025.114030
[19] P.H. Hao, L.C. Wang, F. Deng, S.S. Lau, J.Y. Cheng. J. Appl. Phys., **79**, 4211 (1996). DOI: 10.1063/1.361788
[20] L.C. Wanga, P.H. Hao, J.Y. Cheng, F. Deng, S.S. Lau, J. Appl. Phys., **79**, 4216 (1996). DOI: 10.1063/1.361789
[21] S. Grover. 2020 Int. *Conf. on microelectronic test structures* (UK, Edinburgh)
[22] А.В. Малевская, Н.Д. Ильинская, Д.А. Малевский, П.В. Покровский. ФТП, **56** (3), 376 (2022). DOI: 10.21883/FTP.2022.03.52127.9774
[23] Н.Д. Ильинская, А.А. Пивоварова, Е.В. Куницына, И.А. Андреев, Ю.П. Яковлев. Патент РФ № 221645 (2023).