

07

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

© А.В. Малевская, Н.А. Калужный, 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 ($1.55\ \mu\text{m}$) 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 ($\sim 10^{-7}\ \Omega\cdot\text{cm}^2$) и NiCr/Ag/Au к p -InGaAs ($\sim 10^{-6}\ \Omega\cdot\text{cm}^2$). Разработана конструкция фотоэлектрических преобразователей с диаметром фоточувствительной области от $30\ \mu\text{m}$ 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 АЗВ5 гетероструктур широко используются для преобразования лазерного излучения (ЛИ) в диапазоне длин волн $0.8\text{--}1.55\ \mu\text{m}$ 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 $0.8\text{--}0.86\ \mu\text{m}$ основными являются AlGaAs/GaAs ФЭП, обеспечивающие преобразование мощного ЛИ [8]. При передаче информации наиболее востребованы длины волн ~ 1.3 и $\sim 1.55\ \mu\text{m}$, 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 $\sim 1.3\ \text{GHz}$ ($\lambda = 0.97\ \mu\text{m}$) [12] и $\sim 8.3\ \text{GHz}$ по уровню $-3\ \text{dB}$ ($\lambda = 0.9\ \mu\text{m}$) [13]. P - i - n -ФЭП на основе квантовых точек InAs/InGaAs обладают полосой пропускания до $5.5\ \text{GHz}$ ($\lambda = 1.5\ \mu\text{m}$) [14]. Другим решением являются гетероструктуры, выращенные на InP-подложках, с активной областью на основе псевдоморфных InGaAsP четверных [15] или тройных $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ твердых растворов. При использовании метаморфной технологии роста фоточувствительность гетероструктур InGaAs/InP может быть успешно распространена до $2.3\text{--}2.4\ \mu\text{m}$ [16].

Быстродействующие ФЭП средней инфракрасной области спектра $1.2\text{--}2.4\ \mu\text{m}$ на основе гетероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb с разделенными чувствительной и контактной мезами, соединенными „мостиковым“ фронтальным контактом, обладают полосой пропускания $2\text{--}5\ \text{GHz}$ [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 ($10^{19}\ \text{cm}^{-3}$) (рис. 1, *a*);
- полуизолирующей подложке ($10^{15}\ \text{cm}^{-3}$) (рис. 1, *b, c*).

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

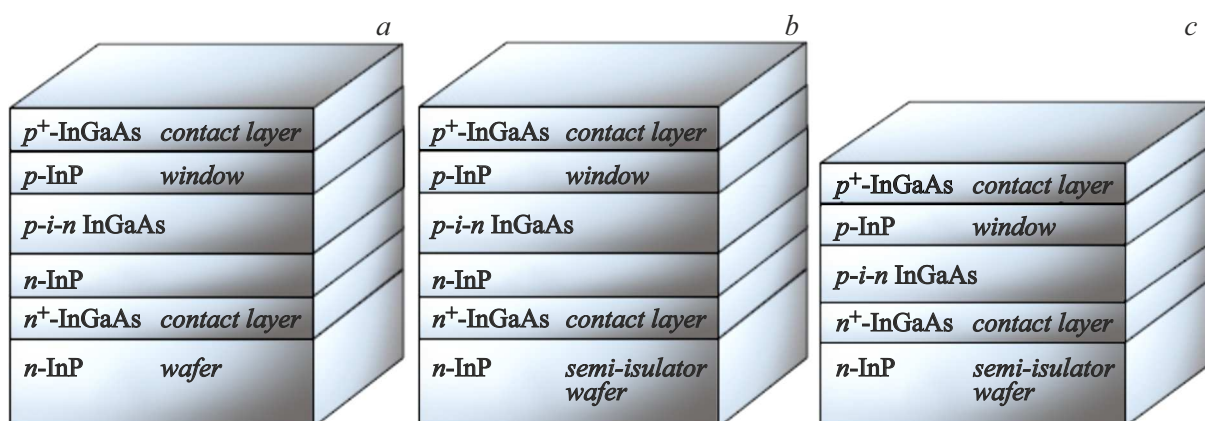


Рис. 1. Схематическое изображение InGaAs/InP-гетероструктуры на сильнолегированной подложке n -типа проводимости (а), полуизолирующей подложке с контактным слоем n^+ -InGaAs (b) и n^+ -InP (c).

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, а) 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

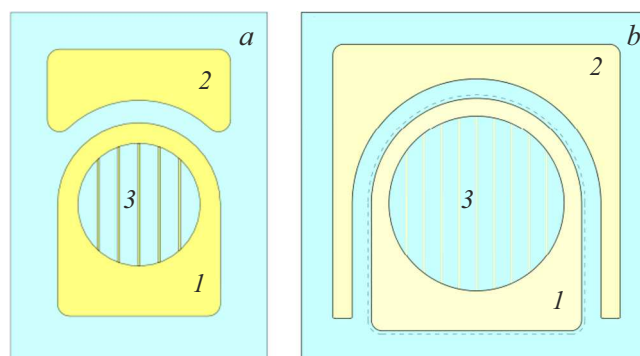


Рис. 2. Схематическое изображение топологии контактных площадок (1) к слою p -типа проводимости и (2) к слою n -типа проводимости, формируемых на фронтальной поверхности InGaAs/InP ФЭП с диаметром фоточувствительной области (3) 300 (а) и 500 μm (b).

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.

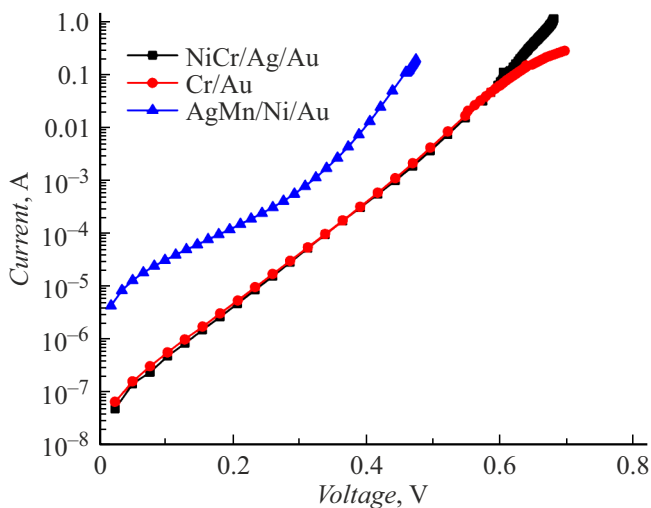


Рис. 3. Прямая ветвь ВАХ ФЭП с диаметром фоточувствительной области $300\ \mu\text{m}$ с контактными системами к InGaAs p -типа проводимости: NiCr/Ag/Au, Cr/Au и AgMn/Ni/Au.

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, а представлены зависимости удельного контактного сопротивления от отжига в диапазоне температур $150^\circ\text{C} - 400^\circ\text{C}$ системы Pd/Ge/Au, нанесенной на слой 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 $1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-7}\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ получены при формировании омического контакта Pd/Ge/Au к n^+ -InGaAs при температуре отжига $170^\circ\text{C} - 290^\circ\text{C}$. При использовании слоя n^+ -InP значения контактного сопротивления значительно выше — $5 \cdot 10^{-5} - 3 \cdot 10^{-4}\ \Omega\cdot\text{cm}^2$. Для анализа влияния материала контакта на последовательное сопротивление приборов изготовлены ФЭП с диаметром фоточувствительной области $500\ \mu\text{m}$ и измерены их ВАХ (рис. 4, б). Зарегистрировано снижение последовательного сопротивления приборов до $R_s = 8,8 \cdot 10^{-4}\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ на структурах со слоем n^+ -InGaAs, а на структурах с n^+ -InP значение R_s составило $1,86 \cdot 10^{-3}\ \Omega\cdot\text{cm}^2$. Снижение резистивных потерь возможно также за счет увели-

чения площади поперечного сечения контактных шин, получаемого при их электрохимическом наращивании с использованием слоев Ag/Ni/Au до общей толщины $2 - 5\ \mu\text{m}$ [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 $80\ \mu\text{m}$ на основе InGaAs/InP-гетероструктуры.

Изготовление образцов ФЭП включает этап осаждения слоев $\text{TiO}_x/\text{SiO}_2$ (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 обтравы фоточувствительной области элемента, контактной мезаструктуры и перемычки в едином технологическом цикле при травлении в растворе на основе бромистоводородной кислоты и бихромата калия ($\text{HBr} : \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) 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, б, с). 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 ($\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2$);
- широкозонное окно p -InP и слой n -InP — в разбавленной соляной кислоте ($\text{HCl} : \text{H}_2\text{O}$);
- p - i - n -InGaAs — в растворе на основе ортофосфорной кислоты и перекиси водорода ($\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2$).

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

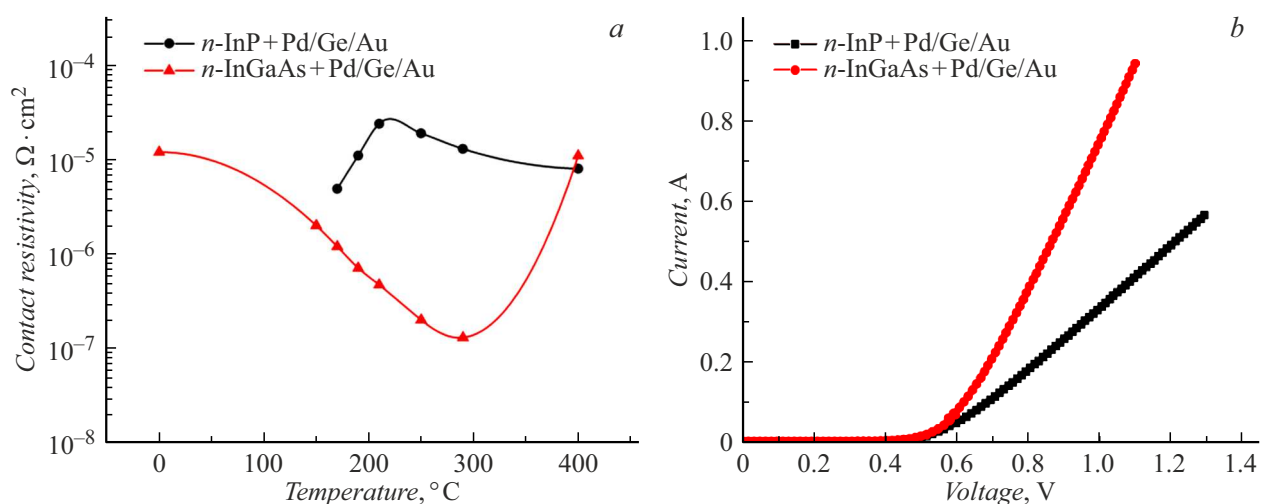


Рис. 4. Зависимость удельного контактного сопротивления Pd/Ge/Au к слоям InGaAs и InP n -типа проводимости от температуры отжига (а) и прямая ветвь ВАХ ФЭП с диаметром фоточувствительной области 500 μm (b).

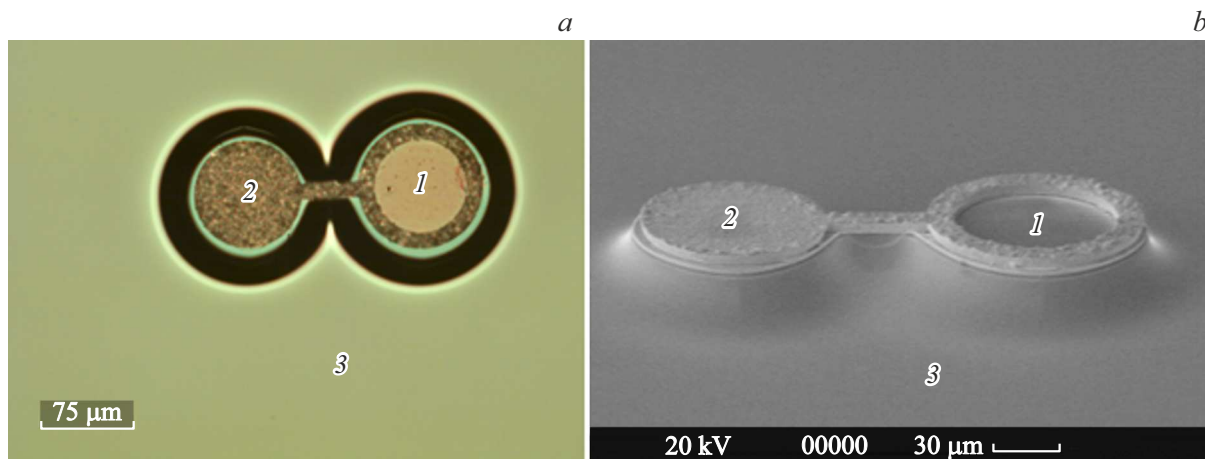


Рис. 5. Фотография (а) и изображение (b), выполненное на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ), ФЭП с фоточувствительной областью диаметром 80 μm (1) и фронтальным контактом NiCr/Ag/Au+Ag/Ni/Au (2), изготовленном на сильнолегированной подложке $n\text{-InP}$ (3).

Pd/Ge/Au, с последующим его отжигом при температурах ниже 200 $^{\circ}\text{C}$ (3 на рис. 7).

Проведен анализ электрических свойств ФЭП с диаметром фоточувствительной области 30 и 80 μm , изготовленных на сильнолегированной подложке $n\text{-InP}$ с контактными системами „мостикового“ типа. Измерения темновой ВАХ ФЭП показали отсутствие токов утечки в пределах чувствительности измерительного оборудования ($< 10^{-9}$ А при напряжении < 0.1 В), что свидетельствует о высоком качестве формирования мезоструктуры. 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.

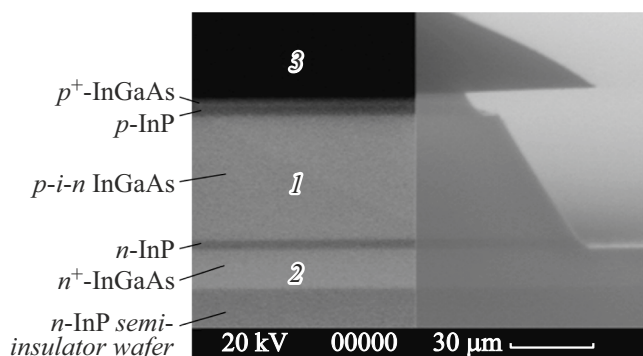


Рис. 6. Изображение СЭМ скола InGaAs/InP-гетероструктуры (1) после селективного травления до контактного слоя $n^+\text{-InGaAs}$ (2) через маску фоторезиста (3).

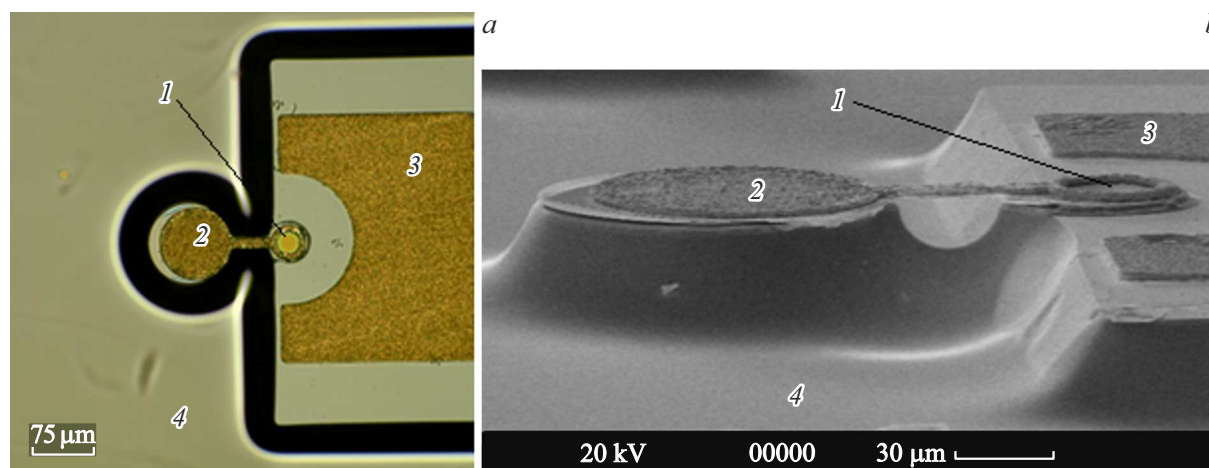


Рис. 7. Фотография (а) и изображение СЭМ (b) ФЭП с фоточувствительной областью диаметром $30\text{ }\mu\text{m}$ (1) с фронтальным „мостиковым“ контактом (2) к слою p -типа проводимости и контактом (3) к слою n -типа проводимости, изготовленному на полуизолирующей подложке InP (4).

Заключение

Проведено исследование различных контактных систем к InGaAs и InP n - и p -типа проводимости. Достигнуты минимальные значения 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 пюстростовых 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 $(2\text{--}4) \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$.

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. Saliy, 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. Leigh, 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. Калужный, 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. Калужный, 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. Hinzner. *IEEE J. Photovoltaics*, **13** (1), 113 (2023). DOI: 10.1109/JPHOTOV.2022.3218938
- [16] Н.А. Калужный, С.С. Кижаяев, 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. Серебrenникова, 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. Wang, 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).