

07

Контактные системы для фотоэлектрических преобразователей на основе InGaAsP/InP

© Н.С. Потапович, А.В. Малевская, Ф.Ю. Солдатенков, В.П. Хвостиков

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

E-mail: amalevskaya@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 6 октября 2023 г.

В окончательной редакции 27 ноября 2023 г.

Принято к публикации 28 ноября 2023 г.

Выполнены исследования влияния режимов формирования контактных систем на основе Pd–Ge–Au и Au(Ge)–Ni–Au к InGaAsP *n*-типа проводимости и NiCr–Ag–Au к InGaAsP и InP *p*-типа проводимости на величину удельного переходного контактного сопротивления. Достигнуты низкие значения удельного переходного контактного сопротивления $\sim 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$ при использовании контактной системы Au(Ge)–Ni–Au (при температуре вжигания 420–440°C) и $\sim 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ при напылении Pd–Ge–Au (при пониженных температурах вжигания < 200°C) для составов твердого раствора *n*-InGaAsP с низким содержанием фосфора. Для образцов *p*-InGaAsP с контактной системой NiCr–Ag–Au минимальное контактное сопротивление составило $\sim 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ при температурах отжига 460°C.

Ключевые слова: контактные системы, InGaAsP/InP, термический отжиг, гетероструктуры, фотоэлектрические преобразователи.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.05.57181.19757

Фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) монохроматического излучения на основе гетероструктур InGaAsP/InP предназначены для работы в диапазоне длин волн от 0.8 до 1.75 μm в качестве приемников в устройствах передачи энергии по лазерному лучу и оптических трактах [1–3].

К перспективным методам формирования гетероструктуры на основе четверного твердого раствора InGaAsP на подложке InP, в частности, относятся жидкофазная эпитаксия и диффузия из газовой фазы, обеспечивающие высокое кристаллическое совершенство структур и достижение близкого к 100% внутреннего квантового выхода фотоответа.

Развитие технологии изготовления мощных ФЭП, предназначенных для преобразования излучения высокой плотности, обуславливает необходимость совершенствования технологии формирования гетероструктур, омических контактов, защитных и просветляющих покрытий [4,5]. Настоящая работа посвящена исследованию и разработке систем омических контактов к InGaAsP *n*- и *p*-типа проводимости и *p*-InP, обеспечивающих снижение резистивных потерь приборов за счет уменьшения удельного переходного контактного сопротивления [6,7].

Исследование контактных систем проводилось на основе гетероструктур InGaAsP/InP, полученных комбинацией двух методов: жидкофазной эпитаксии в атмосфере водорода и диффузии из газовой фазы. При формировании слоев InGaAsP *n*-типа проводимости осуществлялось легирование оловом до концентрации $(4–6) \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$. Слои InGaAsP и InP *p*-типа проводимости легировались цинком из жидкой фазы (при жидкофазной эпитаксии) или из газовой фазы (при

диффузии). Известен ряд контактных систем на основе Au(Ge)–Ni–Au, Pd–Ge–Au, Cr–Au, Ag(Mn)–Ni–Au и т.д., широко используемых при создании оптоэлектронных приборов на базе GaAs [8–10]. Разработка ФЭП на основе гетероструктуры InGaAsP/InP требует проведения дополнительных исследований режимов формирования контактов и их электрических характеристик.

Проведены исследования контактных систем к эпитаксиальным слоям InGaAsP *n*-типа проводимости на основе Au(Ge)–Ni–Au и Pd–Ge–Au. Многослойный контакт Au(Ge)–Ni–Au является широко распространенной контактной системой и обеспечивает переходное контактное сопротивление к GaAs *n*-типа проводимости $\sim 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$ [8] после проведения высокотемпературного отжига при $T > 370^\circ\text{C}$. Однако при формировании полупроводниковых приборов с неглубоким залеганием *p*–*n*-перехода проведение высокотемпературного отжига может привести к деградации их фотоэлектрических параметров. Контактная система на основе Pd–Ge–Au обеспечивает достижение низких значений удельного переходного контактного сопротивления $\sim 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$ к GaAs *n*-типа проводимости при температуре термического отжига ниже 200°C [9,10].

Известные контактные системы на основе Cr–Au и Ag(Mn)–Ni–Au обеспечивают значения удельного переходного контактного сопротивления $\sim 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ к GaAs *p*-типа проводимости после проведения отжига при $T > 370^\circ\text{C}$. Однако металлы, составляющие данные контактные системы, диффундируют в материал полупроводника на глубину до 0.1–0.3 μm , что негативно сказывается на характеристиках готовых приборов. Для формирования омического контакта к InGaAsP и InP *p*-типа проводимости выполнены исследования контакт-

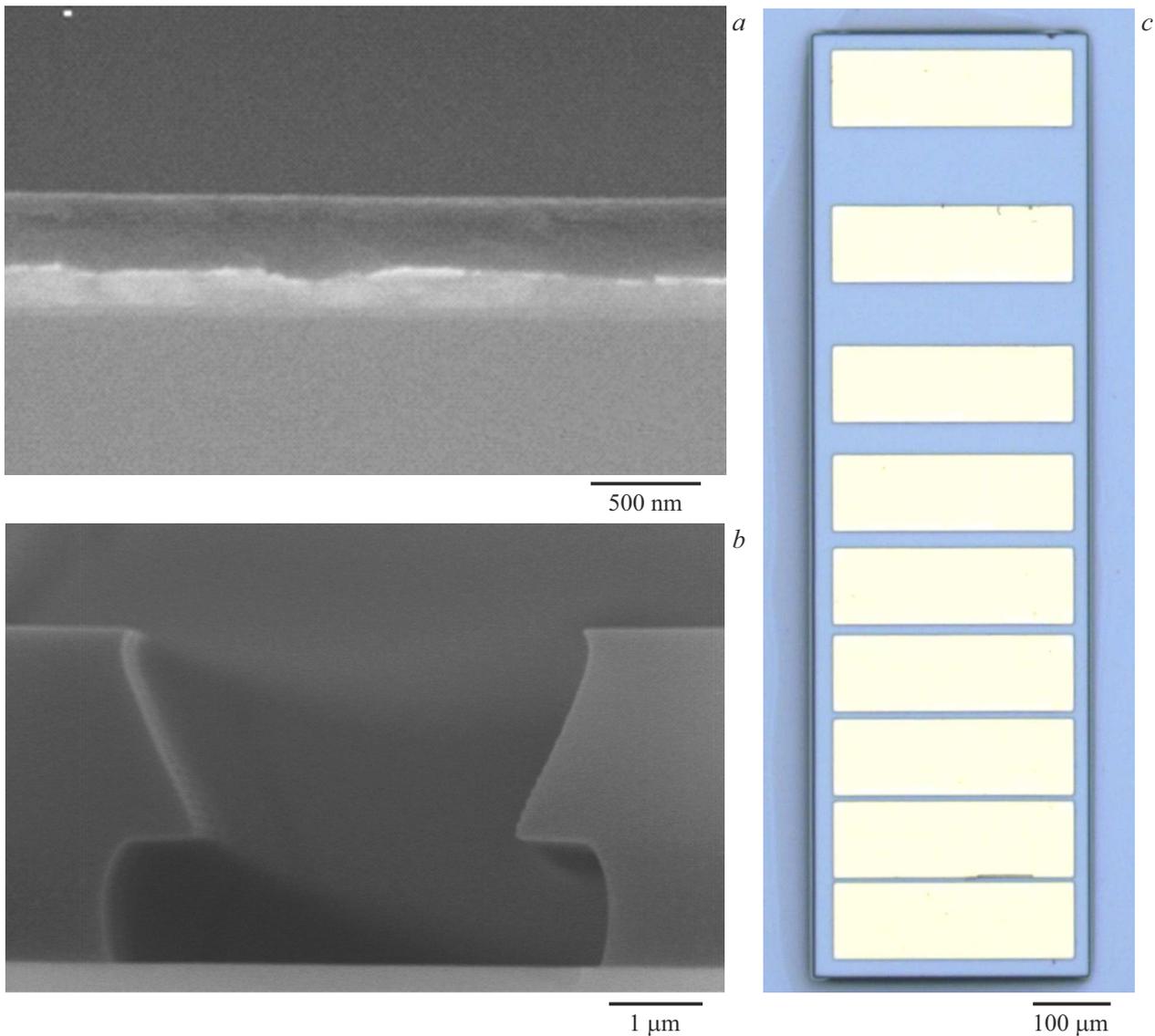


Рис. 1. Фотографии, выполненные на растровом электронном микроскопе (*a, b*) и оптическом микроскопе (*c*). *a* — скол омического контакта NiCr–Ag–Au, *b* — маска на основе слоев LOR+фоторезист, *c* — тестовый образец для измерения удельного переходного контактного сопротивления.

ной системы на основе слоев NiCr–Ag–Au. Первый слой сплава никеля и хрома (NiCr) толщиной 10–20 нм обеспечивал хорошую адгезию контакта к поверхности полупроводника и снижение удельного переходного контактного сопротивления. Также слой NiCr выполнял барьерную функцию и препятствовал диффузии слоев серебра и золота в глубь полупроводникового материала, что особенно важно при формировании мелкого *p–n*-перехода в ФЭП на основе гетероструктур InGaAsP/InP (рис. 1, *a*).

Для измерения удельного переходного контактного сопротивления изготавливались тестовые структуры InGaAsP и InP *n*- и *p*-типа проводимости с прямоугольными контактными площадками, выполненными на основе исследуемых контактных систем, расположенные на

разном расстоянии друг от друга. Устранение эффектов, связанных с краевым поверхностным растеканием тока, достигалось путем формирования меза-структуры по периметру групп контактных площадок (рис. 1, *c*). Измерения удельного переходного контактного сопротивления выполнялись с использованием методики LTLM (linear transmission line model) с прямоугольной геометрией контактных площадок [10].

Формирование контактных систем проводилось с использованием технологии „взрывной“ фотолитографии при формировании двухслойной маски с *T*-образным профилем, включающей слой LOR-резиста (lift-off photoresist) и позитивного фоторезиста (рис. 1, *b*). Данная конфигурация маски при напылении металлов обеспечивает высокую точность задания топологии контактных

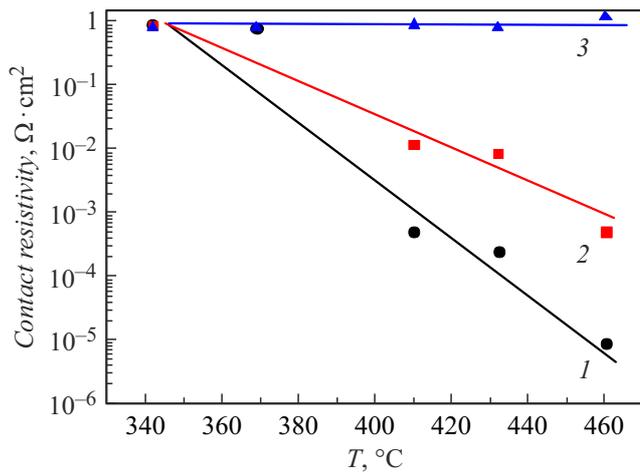


Рис. 2. Зависимость от температуры вжигания (в атмосфере H_2) переходного контактного сопротивления омического контакта NiCr–Ag–Au к диффузионному слою p -InGaAsP (1), эпитаксиальному слою p -InGaAsP (2) и эпитаксиальному слою p -InP (3).

ной сетки и ровный край полосковых контактов, что особенно важно при изготовлении мощных ФЭП с шириной полосковых контактов менее $5 \mu m$.

Напыление слоев контактных систем проводилось методом магнетронного распыления NiCr, Ni и Ag и методом термического резистивного испарения сплава AuGe, Pd, Ge и Au в вакууме. Термический отжиг тестовых образцов проводился в атмосфере водорода (H_2) в кварцевом реакторе трубчатого типа и в атмосфере азота (N_2) на установке для процессов быстрой температурной обработки STE RTA100, обеспечивающей быстрый выход на температурный режим и поддержание постоянной температуры в течение длительного времени (до 60 min).

Результаты исследования режимов формирования контактной системы на основе NiCr–Ag–Au к диффузионным и эпитаксиальным слоям p -InGaAsP ($E_g = 0.8$ eV), полученным методами жидкофазной эпитаксии и комбинацией методов эпитаксии и диффузии из газовой фазы, и к эпитаксиальному слою InP p -типа проводимости представлены на рис. 2.

Из рис. 2 следует, что применение NiCr–Ag–Au при изготовлении контакта к четверному твердому раствору InGaAsP p -типа проводимости, предназначенному для преобразования излучения с длиной волны $1.55 \mu m$, с высокой поверхностной концентрацией носителей заряда, полученной за счет диффузии цинка из газовой фазы, позволяет достичь значений удельного переходного сопротивления $\sim (7-8) \cdot 10^{-6} \Omega \cdot cm^2$ при температуре вжигания $460^\circ C$. Это можно объяснить, вероятно, более высокой поверхностной концентрацией носителей в диффузионных образцах, чем в эпитаксиальных структурах [11]. Однако при использовании данной контактной системы для изготовления контакта к эпи-

таксиальному слою p -InGaAsP, легированному цинком, не удалось получить контакты с удельным переходным контактным сопротивлением менее $5 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot cm^2$, а в случае применения этого многослойного контакта к эпитаксиальным слоям p -InP (Zn) значения контактного сопротивления составили $\sim 1 \Omega \cdot cm^2$. Из полученных данных следует вывод о нежелательном использовании контакта NiCr–Ag–Au при изготовлении приборов на основе эпитаксиальных слоев p -InGaAsP и p -InP, легированных цинком, из-за больших резистивных потерь на контактах.

Для формирования омического контакта к эпитаксиальным слоям InGaAsP n -типа проводимости ($E_g = 0.8$ и 1.1 eV), легированным оловом ($n = (4-6) \cdot 10^{17} cm^{-3}$), предназначенным для преобразования излучения с длинами волн 1.1 и $1.5 \mu m$, были исследованы контактные системы на основе Au(Ge)–Ni–Au и Pd–Ge–Au.

При формировании контакта на основе Au(Ge)–Ni–Au к эпитаксиальному слою n -InGaAsP с $E_g = 1.1$ eV (кривая 1 на рис. 3, а) низкие значения

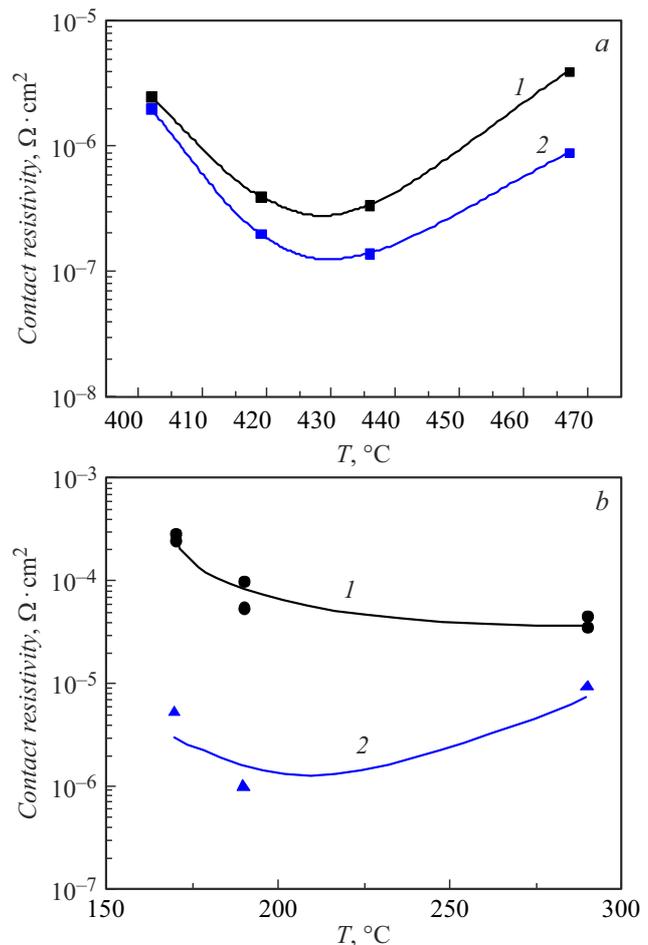


Рис. 3. Зависимость от температуры вжигания (а — в атмосфере H_2 , б — в атмосфере N_2) переходного контактного сопротивления омического контакта AuGe–Ni–Au (а) и Pd–Ge–Au (б) к эпитаксиальным слоям n -InGaAsP ($n = (4-6) \cdot 10^{17} cm^{-3}$). $E_g = 1.1$ (1) и 0.8 eV (2).

удельного переходного контактного сопротивления ($\sim (3-4) \cdot 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$) были достигнуты в диапазоне температур отжига 420–440°C. В случае эпитаксиальных слоев $n\text{-InGaAsP}$ с $E_g = 0.8 \text{ eV}$ (кривая 2 на рис. 3, а) значения переходного контактного сопротивления составили $\sim (1-2) \cdot 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$ при температуре отжига 420–440°C.

Снижение температур отжига возможно при использовании контактной системы на основе Pd–Ge–Au. Минимальные значения удельного переходного контактного сопротивления ($\sim (1-5) \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$) достигнуты при температурах вжигания в атмосферах H_2 и N_2 в диапазоне 170–200°C на образцах $n\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{P}_y$ ($E_g = 0.8 \text{ eV}$) с наименьшим содержанием фосфора $y = 0.15-0.1$ (рис. 3, б).

В результате проведенного исследования определены оптимальные режимы и параметры формирования контактных систем к InGaAsP n - и p -типа проводимости и $p\text{-InP}$. Обнаружено, что контактная система Pd–Ge–Au позволяет получать достаточно низкие значения контактного сопротивления $\sim (1-5) \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ для четверных твердых растворов $n\text{-InGaAsP}$ ($E_g = 0.8 \text{ eV}$) при низких температурах отжига (170–200°C в атмосфере H_2 и N_2). Для образцов $n\text{-InGaAsP}$ ($E_g = 0.8$ и 1.1 eV) с контактной системой Au(Ge)–Ni–Au минимальное контактное сопротивление составило $\sim (1-4) \cdot 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$, а для образцов $p\text{-InGaAsP}$ ($E_g = 0.8 \text{ eV}$) с контактной системой NiCr–Ag–Au $\sim (7-8) \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ при температурах отжига 460°C в атмосфере водорода. Найденные контактные системы и режимы отжига дают возможность снижать омические потери в фотоэлектрических преобразователях, предназначенных для преобразования лазерного излучения большой мощности.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] C.A. Schäfer, D. Gray, *Acta Astron.*, **79**, 140 (2012). DOI: 10.1016/j.actaastro.2012.04.010
- [2] Н.С. Потапович, М.В. Нахимович, В.П. Хвостиков, *ФТП*, **55** (11), 1091 (2021). DOI: 10.21883/FTP.2021.11.51566.9688 [N.S. Potapovich, M.V. Nakhimovich, V.P. Khvostikov, *Semiconductors*, **56** (13), 2068 (2022). DOI: 10.21883/SC.2022.13.53907.9688].
- [3] X. Jiang, M.A. Itzler, R. Ben-Michael, K. Slomkowski, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **13** (4), 895 (2007). DOI: 10.1109/JSTQE.2007.903001
- [4] H.J. Levinson, *Principles of lithography*, 3rd ed. (SPIE, Washington, 2010), p. 504.
- [5] N.A. Kalyuzhnyy, A.V. Malevskaya, S.A. Mintairov, M.A. Mintairov, M.V. Nakhimovich, R.A. Saliy, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev, *Solar Energy Mater. Solar Cells*, **262**, 112551 (2023). DOI: 10.1016/j.solmat.2023.112551
- [6] A. Zekry, A.Y. Al-Mazroo, *IEEE Trans. Electron Dev.*, **43** (5), 691 (1996). DOI: 10.1109/16.491244
- [7] А.В. Малевская, Ю.М. Задиранов, А.А. Блохин, В.М. Андреев, *Письма в ЖТФ*, **45** (20), 15 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.20.48386.17916 [A.V. Malevskaya, Yu.M. Zadiranov, A.A. Blokhin, V.M. Andreev, *Tech. Phys. Lett.*, **45**, 1024 (2019). DOI: 10.1134/S1063785019100262].
- [8] 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
- [9] 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
- [10] D.M. Mitin, F.Yu. Soldatenkov, A.M. Mozharov, A.A. Vasil'ev, V.V. Neplokh, I.S. Mukhin, *Nanosystems: physics, chemistry, mathematics*, **9** (6), 789 (2018). DOI: 10.17586/2220-8054-2018-9-6-789-792
- [11] В.П. Хвостиков, С.В. Сорокина, О.А. Хвостикова, Н.Х. Тимошина, Н.С. Потапович, Б.Я. Бер, Д.Ю. Казанцев, В.М. Андреев, *ФТП*, **47** (2), 273 (2013). [V.P. Khvostikov, S.V. Sorokina, O.A. Khvostikova, N.Kh. Timoshina, N.S. Potapovich, B.Ya. Ber, D.Yu. Kazantsev, V.M. Andreev, *Semiconductors*, **47**, 307 (2013). DOI: 10.1134/S1063782613020139].