

07

Микроразмерные GaSb фотоэлектрические преобразователи лазерного излучения высокой плотности

© В.П. Хвостиков, А.В. Малевская, П.В. Покровский, О.А. Хвостикова, Ф.Ю. Солдатенков, М.В. Нахимович

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

E-mail: amalevskaya@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 8 октября 2024 г.

В окончательной редакции 31 октября 2024 г.

Принято к публикации 31 октября 2024 г.

Выполнены исследования и разработана технология изготовления фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения ($\lambda = 1550$ nm), получаемых методом двухстадийной диффузии Zn в подложку *n*-GaSb, с диаметром фоточувствительной области 30 и 80 μm . Проведены исследования по снижению оптических и омических потерь при преобразовании высокой плотности мощности лазерного излучения (до 1.6 kW/cm²). Достигнута эффективность преобразования лазерного излучения более 38% при плотности фототока 200–550 A/cm².

Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь, лазерное излучение, диффузия.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.04.59845.20142

Фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) лазерного излучения (ЛИ) широко используются для беспроводной передачи энергии удаленному источнику, в том числе для дистанционного электропитания космических летательных аппаратов, при создании солнечных электростанций, в волоконно-оптических линиях связи, а также в бытовых областях, например, для беспроводной зарядки приборов [1–4]. При длине волны ЛИ 1500–1700 nm наблюдаются минимальные оптические потери, а также минимальная дисперсия в оптических волокнах [5]. Это обосновывает целесообразность использования ФЭП на основе GaSb, обладающего спектральной чувствительностью в диапазоне длин волн 1400–1700 nm [6,7]. Формирование ФЭП ЛИ осуществляется с использованием различных методов: технологии жидкофазной эпитаксии, газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений и путем диффузии цинка из газовой фазы в подложку *n*-GaSb [8–12]. Преимуществами метода диффузии являются технологическая простота реализации, формирование градиентного поля, обеспечивающего разделение носителей заряда, высокий уровень легирования приповерхностных областей, обеспечивающий формирование металлических контактов с низким удельным контактным сопротивлением, что особенно важно при изготовлении мощных ФЭП. При этом GaSb характеризуется низкой скоростью поверхностной рекомбинации, что позволяет формировать фотоактивную область ФЭП без широкозонного оптического окна и соответствует возможностям диффузионного метода.

Фотоэлектрические преобразователи лазерного излучения получены методом локальной диффузии Zn из газовой фазы в подложку *n*-GaSb для формирования фоточувствительной области диаметром 30 и 80 μm , что ведет к возможности преобразования предельной плотности мощности. Для обеспечения максималь-

ной спектральной чувствительности на длине волны 1550 nm и снижения омических потерь, обусловленных сопротивлением растекания вдоль слоя, формирование *p*–*n*-перехода в GaSb осуществляется в две стадии. На первой стадии через маску диэлектрика Si₃N₄ проводится диффузия Zn для формирования мелкого *p*–*n*-перехода на глубине ~ 500 nm в области ФЭП диаметром 40 или 100 μm . Методом плазмоактивированного пиролиза осаждается диэлектрический слой Si₃N₄ толщиной ~ 100 nm, что обеспечивает высокую адгезию слоя к поверхности GaSb и высокую стойкость к диффузии Zn. На втором этапе проводится заглубление диффузионного слоя до глубины 1000–1500 nm по периметру фоточувствительной области под зоной фронтального омического контакта через вторую маску Si₃N₄. При этом проводится оптимизация толщины слоя Si₃N₄, являющегося также просветляющим покрытием и обеспечивающего электрическую изоляцию фронтального металлического контакта вне фоточувствительной области ФЭП.

Преобразование высокой плотности мощности лазерного излучения (до 1.6 kW/cm²) ведет к необходимости формирования низкоомных металлических контактов [13]. Ранее контакты к GaSb *p*-типа проводимости формировались на основе слоев Cr/Au и AgMn/Ni/Au. Основным недостатком данных контактов является высокая степень диффузии в глубь полупроводника при термическом отжиге, что может приводить к шунтированию *p*–*n*-перехода. Разработка новой контактной системы NiCr/Ag/Au, обладающей хорошей адгезией к поверхности полупроводника и низкой степенью диффузии при термическом отжиге, обеспечила формирование низкоомного омического контакта, а также способствовала увеличению выхода годных приборов и снижению токов утечки. Контактная система Au(Ge)/Ni/Au

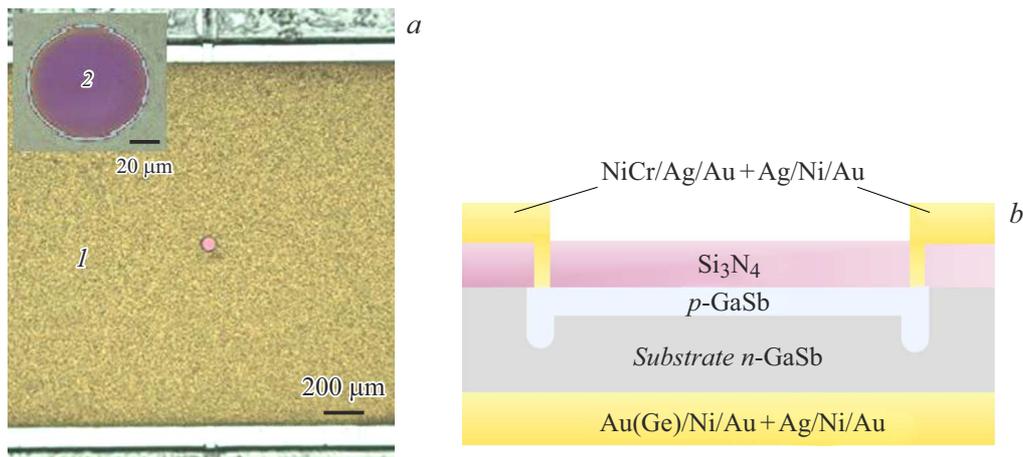


Рис. 1. Фотография (а) и схематическое изображение скола (b) ФЭП ЛИ на основе GaSb (диаметр фоточувствительной области 80 μm). 1 — металлический контакт, 2 — фоточувствительная область.

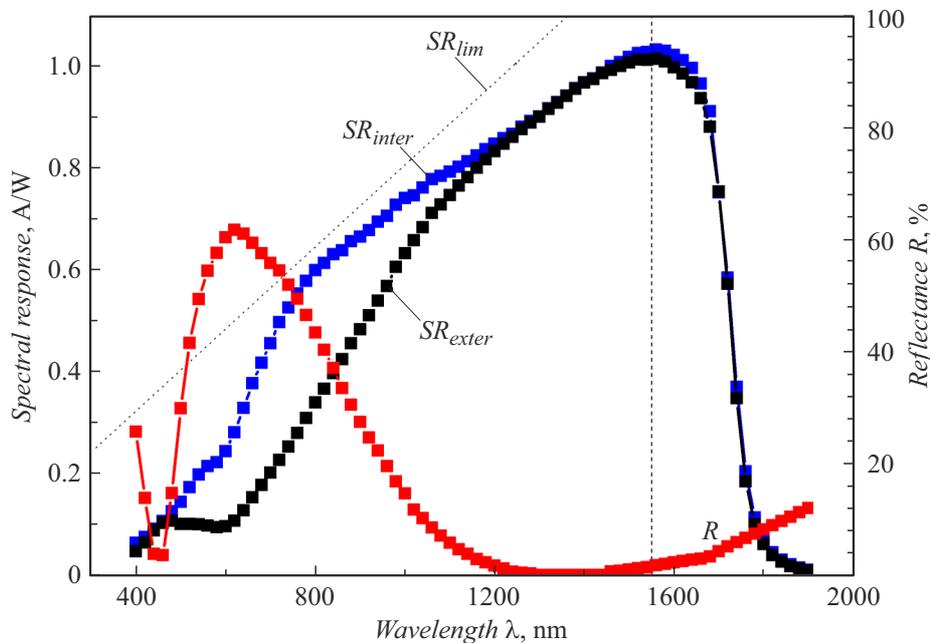


Рис. 2. Спектральная фоточувствительность (SR) тестовых образцов ФЭП на основе GaSb размером 3 × 3 mm.

является широко применимой к полупроводниковым материалам *n*-типа проводимости. При разработке технологии формирования ФЭП на основе GaSb была проведена оптимизация режимов нанесения и термического отжига. Результатом проведенных исследований стало достижение низких значений удельного контактного сопротивления напыленных систем к поверхности полупроводника — $(2-3) \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$. Напыление перечисленных выше контактных систем осуществляется до толщины 0.2–0.3 μm, для увеличения электрической проводимости контактов проводится их наращивание методом электрохимического осаждения слоев Ag/Ni/Au толщиной 2–3 μm. Формируется мезо-структура ФЭП размером 0.5 × 1.5 mm за счет увеличения площади

периферического фронтального контакта, что ведет к улучшению теплоотвода и возможности монтажа и тестирования элементов (рис. 1).

Измерение спектральной фоточувствительности ФЭП выполнено на тестовых образцах размером 3 × 3 mm. В рабочем диапазоне длин волн 1300–1600 nm значения внутренней (SR_{inter}) и внешней (SR_{exter}) фоточувствительности ФЭП практически совпадают и равны 1 A/W, что свидетельствует о низких оптических потерях на ввод ЛИ. Снижение коэффициента отражения падающего излучения до 0–2% достигнуто за счет оптимизации технологии формирования просветляющего покрытия на основе Si₃N₄. Достижение минимального коэффициента отражения возможно при формировании двухслойного

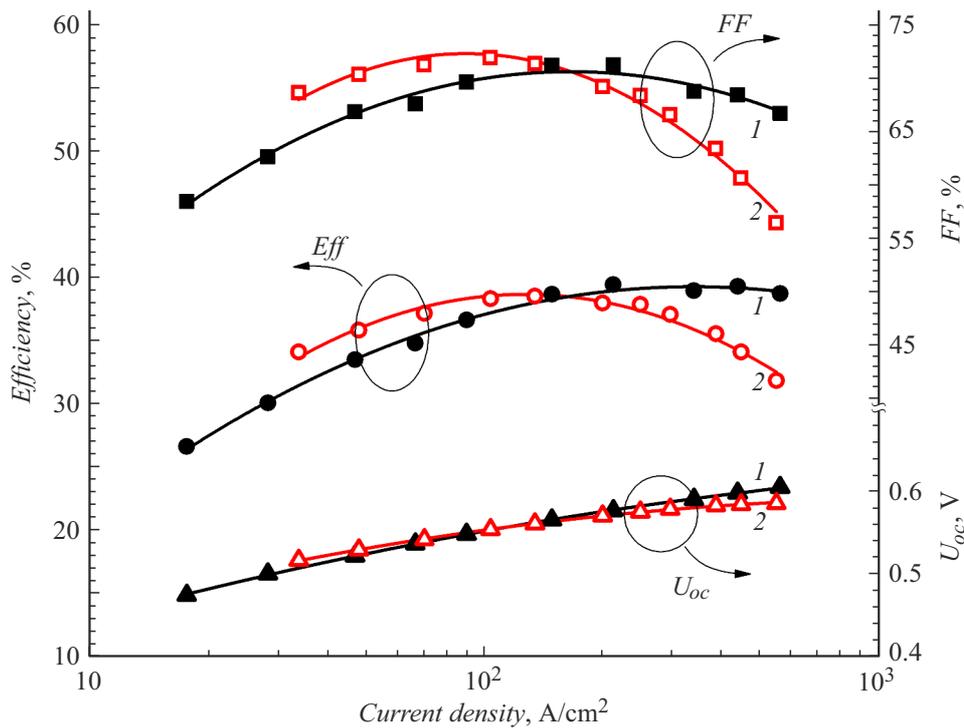


Рис. 3. Зависимости эффективности, фактора заполнения (FF) вольт-амперной характеристики и напряжения холостого хода (U_{oc}) от плотности фототока для ФЭП с диаметром фоточувствительной поверхности 30 (1) и 80 μm (2) при засветке непрерывным ЛИ ($\lambda = 1550 \text{ nm}$).

просветляющего покрытия на основе слоев $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$, оптимизированного на длину волны 1550 nm. Однако при изготовлении ФЭП на основе GaSb просветляющее покрытие также служит маской для проведения локальной диффузии Zn. Исследования показали, что однослойное покрытие Si_3N_4 является более устойчивым к диффузии и соответственно обладает преимуществом перед двухслойным. Предельное значение (SR_{lim}) фоточувствительности показано пунктирной линией (рис. 2).

Фотоэлектрические характеристики ФЭП с диаметром фоточувствительной области 30 и 80 μm измерены при засветке непрерывным лазерным излучением ($\lambda = 1550 \text{ nm}$) из оптического волокна диаметром 50 μm с числовой апертурой 0.22. На рис. 3 приведены характерные зависимости КПД, фактора заполнения вольт-амперной характеристики и напряжения холостого хода от плотности фототока для двух типоразмеров ФЭП. Максимальные значения эффективности достигнуты при плотности фототока 130–200 A/cm^2 и составили 39.4 и 38.5% для элементов с диаметром фоточувствительной поверхности 30 и 80 μm соответственно. Из зависимости напряжения холостого хода от плотности фототока видно, что ФЭП с диаметром фоточувствительной области 80 μm нагревается при увеличении плотности фототока более 200 A/cm^2 . В то же время ФЭП с диаметром фоточувствительной области 30 μm практически не подвержен нагреву из-за существенно меньшей абсолютной

мощности, что позволяет достичь напряжения холостого хода 0.605 V при плотности фототока $\sim 550 \text{ A}/\text{cm}^2$.

Таким образом, разработана технология изготовления фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения ($\lambda = 1550 \text{ nm}$) на основе GaSb с диаметром фоточувствительного окна 30 и 80 μm . Снижение оптических потерь достигнуто за счет оптимизации технологии формирования диффузионного p – n -перехода в GaSb, а также за счет разработки технологии формирования просветляющего покрытия на основе Si_3N_4 , что позволило достичь внешней фоточувствительности ФЭП 1 A/W . Снижение омических потерь достигнуто при создании микроразмерных ФЭП за счет снижения сопротивления растекания, а также при разработке новых контактных систем к GaSb p -типа проводимости на основе NiCr/Ag/Au + Ag/Ni/Au, что обеспечило возможность преобразования высокой плотности мощности ЛИ (до 1.6 kW/cm^2). Ранее нами были получены фотоэлектрические преобразователи на основе GaSb, работающие при плотностях падающего излучения до 100 W/cm^2 , при этом получен КПД $\sim 34\%$ [7,14]. Результатом проведенных исследований и разработок стало получение ФЭП ЛИ ($\lambda = 1550 \text{ nm}$) с КПД более 38% при плотности фототока вплоть до 550 A/cm^2 .

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J.T. Howell, M.J. O'Neill, R.L. Fork, in *Proc. 5th Wireless Power Transmission Conf. Together with 4th Int. Conf. on Solar Power From Space* (Granada, Spain, 2004), p. 187.
- [2] S.D. Jarvis, J. Mukherjee, M. Perren, S.J. Sweeney, *IET Optoelectron.*, **8** (2), 64 (2014).
DOI: 10.1049/iet-opt.2013.0066
- [3] L. Summerer, O. Purcel, in *Proc. Int. Conf. on Space Optical Systems and Applications* (Noordwijk, Netherlands, 2009).
- [4] M. Dumke, G. Heiserich, S. Franke, L. Schulz, L. Overmeyer, *J. Syst. Cybernet. Inform.*, **8** (1), 55 (2010).
- [5] R. Pena, C. Algora, in *Proc. Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf.* (Barcelona, Spain, 2005), p. 488.
- [6] V.P. Khvostikov, S.V. Sorokina, O.A. Khvostikova, N.S. Potapovich, A.V. Malevskaya, M.V. Nakhimovich, M.Z. Shvarts, *AIP Conf. Proc.*, **2149**, 050007 (2019).
DOI: 10.1063/1.5124192
- [7] В.П. Хвостиков, С.В. Сорокина, О.А. Хвостикова, А.В. Малевская, в сб. *Рос. конф. „Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики“* (Политех-Пресс, СПб., 2021), с. 106. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id21-344
- [8] A. Bhogi, B. Srinivas, P. Papolu, R. Konakanci, K.J. Prakash, Md. Shareefuddin, P. Kistaiah, *J. Indian Chem. Soc.*, **101** (10), 101285 (2024). DOI: 10.1016/j.jics.2024.101285
- [9] В.П. Хвостиков, С.В. Сорокина, О.А. Хвостикова, Р.В. Левин, Б.В. Пушный, Н.Х. Тимошина, В.М. Андреев, *ФТП*, **50** (10), 1358 (2016). [V.P. Khvostikov, S.V. Sorokina, O.A. Khvostikova, R.V. Levin, B.V. Pushnyi, N.K. Timoshina, V.M. Andreev, *Semiconductors*, **50** (10), 1338 (2016).
DOI: 10.1134/S1063782616100146].
- [10] Y. Liu, L. Tang, J. Shao, Y. Tang, J. Li, X. Lv, Y. Yuan, *Appl. Energy*, **361**, 122959 (2024).
DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.122959
- [11] W. Dong, J. Jiang, Q. Peng, Ch. Liu, D. Chu, B. Duan, H. Feng, J. Yang, W. Guo, J. Kong, J. Zhao, *J. Cryst. Growth*, **636**, 127706 (2024). DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2024.127706
- [12] H.-Y. Pan, X. Chen, X.-L. Xia, *Solar Energy*, **274**, 112581 (2024). DOI: 10.1016/j.solener.2024.112581
- [13] А.В. Малевская, Н.Д. Ильинская, Д.А. Малевский, П.В. Покровский, *ФТП*, **56** (3), 376 (2022).
DOI: 10.61011/PJTF.2025.04.59845.20142 [A.V. Malevskaya, N.D. Il'inskaya, D.A. Malevskii, P.V. Pokrovskii, *Semiconductors*, **56**, 18 (2022).
DOI: 10.1134/S1063782622020117].
- [14] В.П. Хвостиков, С.В. Сорокина, Ф.Ю. Солдатенков, Н.Х. Тимошина, *ФТП*, **49** (8), 1104 (2015). [V.P. Khvostikov, S.V. Sorokina, F.Yu. Soldatenkov, N.Kh. Timoshina, *Semiconductors*, **49** (8), 1079 (2015).
DOI: 10.1134/S1063782615080114].