

08.3

Гибкие солнечные элементы на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs с улучшенными массогабаритными характеристиками

© А.С. Голтаев¹, А.А. Воробьев¹, А.М. Можаров¹, А.В. Павлов¹, Д.М. Митин^{1,2}, В.В. Федоров^{1,2}, Ю.С. Бердников¹, И.С. Мухин^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: akbarpym@yandex.ru

Поступило в Редакцию 6 мая 2022 г.

В окончательной редакции 25 июля 2022 г.

Принято к публикации 25 июля 2022 г.

Обсуждаются вопросы создания гибкого солнечного элемента на основе классического гетероперехода GaAs/AlGaAs с использованием жертвенного слоя InAlP для отделения гетероструктуры от ростовой подложки, где в качестве подложки-носителя использована мембрана из полиметилметакрилата. Комбинация данных решений позволила достичь высокого показателя удельной мощности — 750 W/kg.

Ключевые слова: солнечный элемент, GaAs, ELO, гибкая электроника.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.18.53390.19245

Солнечная энергетика является наиболее перспективным направлением развития возобновляемых источников энергии. Гетероструктуры на основе прямозонного GaAs обладают одним из самых высоких показателей эффективности для однопереходных солнечных элементов (СЭ) [1]. При этом тонкие слои полупроводниковых соединений A^{III}B^V обладают механическими свойствами, достаточными для их применения в гибких СЭ, интегрированных в носимую электронику, портативные устройства, беспилотные автомобили и автономные летательные аппараты [2]. Более того, в случае СЭ на основе GaAs рекордные значения коэффициента полезного действия (КПД) были получены именно для гибких СЭ, отделенных от ростовой подложки [3]. Кроме того, недавно были продемонстрированы сверхтонкие и высокоэффективные СЭ на основе GaAs [4].

Требования гибкости и легкости СЭ исключают использование многих традиционных решений, что стимулирует исследования по поиску новых путей реализации прозрачных электродов и поддерживающих слоев, совместимых с гибкими поглощающими гетероструктурами A^{III}B^V. Для создания СЭ, отделенного от ростовой подложки, и его дальнейшей эксплуатации требуется применение гибких носителей, в качестве которых могут выступать различные материалы, например тонкие металлические фольги или органические полимеры. При этом металлические фольги хотя и обладают рядом преимуществ, такими как высокая электро- и теплопроводность, термо- и радиационная стойкость, но имеют высокую плотность, что ведет к увеличению массы конечного устройства.

В настоящей работе представлены результаты моделирования классической конструкции однопереходного СЭ, обеспечивающей максимальную эффективность, а

также результаты синтеза и исследования фотовольтаических характеристик гибкого СЭ на основе отделенной от ростовой подложки гетероструктуры GaAs/AlGaAs. В качестве материала жертвенного слоя для отделения гетероструктуры от ростовой подложки использовался InAlP. В качестве прозрачного гибкого носителя предложена мембрана из полиметилметакрилата (ПММА), обеспечивающая не только необходимую механическую гибкость, но и высокое соотношение вырабатываемая мощность/масса для СЭ.

Для определения оптимального состава слоев отделенного СЭ, обеспечивающего наибольший КПД, проводилось численное моделирование режимов работы элемента, учитывающее поглощение света в полупроводниковой GaAs/AlGaAs-гетероструктуре и разделение носителей заряда в зависимости от состава, толщин и уровней легирования слоев СЭ. Распространение и поглощение света в гетероструктуре рассматривались в приближении волновой оптики, а работа фотоячейки — в рамках полупроводниковой дрейфово-диффузионной модели с учетом статистики Ферми–Дирака для носителей заряда. Рассматривалась классическая геометрия СЭ на основе GaAs/AlGaAs с одним $p-n$ -переходом (см. состав и описание слоев на вставке к рис. 1, *b*). Оптические и полупроводниковые параметры материалов были взяты из работ [5,6]. Оба контакта при моделировании рассматривались как идеальные омические. При этом в модель не включались дополнительные антиотражающие покрытия.

На первом этапе рассматривался транспорт фотогенерируемых носителей через широкозонные барьеры СЭ для определения падающего на них напряжения как функции состава, типа и уровня легирования слоя. Было установлено, что барьер с дырочным типом проводимо-

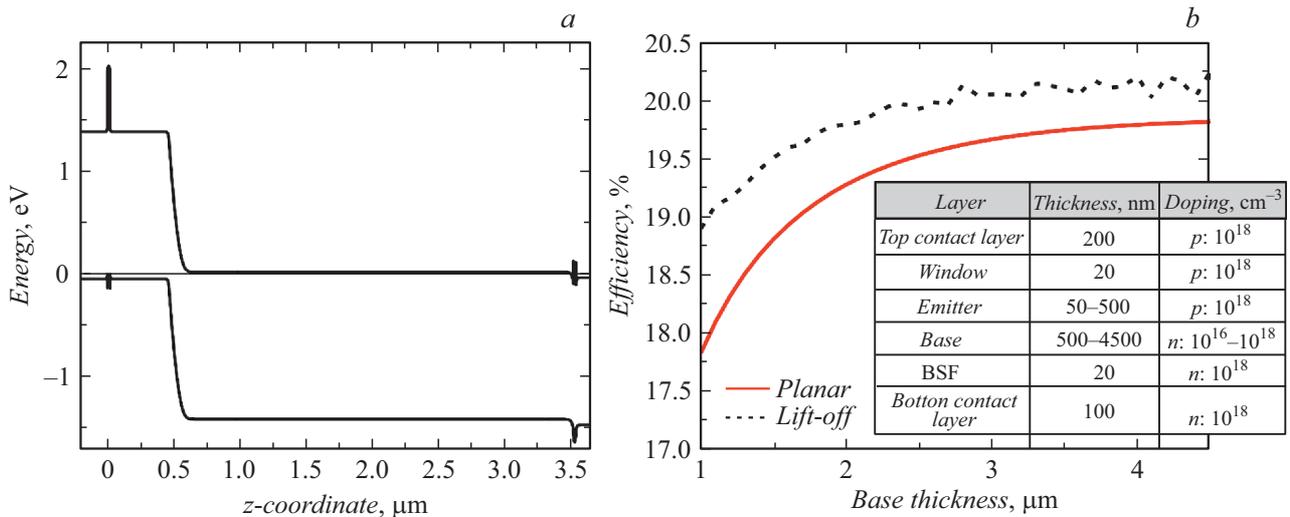


Рис. 1. *a* — зонная диаграмма СЭ с эмиттером толщиной 500 нм и базой толщиной 3 μм. *b* — КПД СЭ до и после отделения от ростовой подложки. На вставке — состав слоев СЭ.

сти обеспечивает протекание фототока без значимых потерь напряжения во всем диапазоне составов и хорошо подходит для формирования широкозонного окна СЭ, в котором необходима минимизация оптических потерь. В свою очередь барьер с электронным типом проводимости демонстрирует значимые потери напряжения для составов по алюминию выше 40%, и для его применения в качестве тыльного потенциального барьера СЭ требуются концентрации легирующей примеси выше $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

На втором этапе проводилось варьирование толщины и уровня легирования базы, а также толщины эмиттерного слоя. Уровень легирования эмиттерного слоя был зафиксирован и составлял 10^{18} cm^{-3} , что является максимальной величиной, при которой не наблюдается существенного уменьшения времени жизни неосновных носителей заряда. Для обоих барьеров толщина и уровень легирования были выбраны равными 20 нм и 10^{18} cm^{-3} соответственно. В качестве широкозонного окна был выбран барьер AlGaAs с дырочным типом проводимости и содержанием алюминия 80%. В слое тыльного потенциального барьера содержание алюминия составляло 20%. Для оценки КПД структуры проводилось численное моделирование режимов работы фотоячейки при напряжении от 0 до 1.2 В с шагом 10 мВ в условиях внешнего освещения со спектром AM1.5G. Вычисление КПД осуществлялось при анализе вольт-амперной характеристики (ВАХ) и поиске напряжения, обеспечивающего максимальную мощность. В результате проведенного моделирования установлено, что оптимальный уровень легирования базы находится в диапазоне $6 \cdot 10^{16}–3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, а толщина эмиттерного слоя составляет 500 нм. На рис. 1, *a* показана зонная диаграмма СЭ с базой толщиной 3 μм. На рис. 1, *b* представлены результаты численного моделирования зависимости эффективности СЭ от толщины базы до и

после отделения от ростовой подложки без антиотражающего покрытия [7]. Как можно видеть, в результате отделения СЭ и формирования металлического контакта на его тыльной стороне наблюдается увеличение эффективности работы фотоячейки на $0.3 \pm 0.1\%$ за счет дополнительного поглощения света, отраженного от тыльного контакта.

Формирование гетероструктур СЭ на основе GaAs и твердых растворов AlGaAs и жертвенного слоя InAlP осуществлялось на установке молекулярно-пучковой эпитаксии Veeco GEN-III. В качестве подложек использовались эпитаксиальные пластины GaAs с ориентацией (001) и диаметром 50 мм, легированные Si до *n*-типа проводимости $n_n \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

Далее методом контактной фотолитографии формировался верхний сетчатый контакт. Методом вакуумного термического испарения осаждались слои Cr и Au толщиной 5 и 150 нм соответственно. Для удаления контактного слоя GaAs проводилось локальное селективное жидкостное травление.

В качестве материала-носителя был использован слой ПММА толщиной 20 μм, который наносился методом центрифугирования на лицевую поверхность элемента с последующей термической обработкой для полимеризации. Травление жертвенного слоя InAlP проводилось в растворе на основе соляной (5%) и ортофосфорной (85%) кислот при комнатной температуре. После отделения тонкопленочной гетероструктуры СЭ формировался низкотемпературный сплошной тыльный контакт *n*-типа, так как использование полимерных носителей ограничивает температуру вжигания контактов. Методом вакуумного термического испарения осаждались слои Pd/Ge/Au толщиной 10, 50, 100 нм соответственно с последующим отжигом при температуре 185°C в течение 1 h [8]. На рис. 2 представлено оптическое



Рис. 2. Оптическое изображение гибкого СЭ на полимерном носителе.

изображение созданного гибкого СЭ на носителе из ПММА площадью 0.3 cm^2 .

На рис. 3, *a* представлены ВАХ СЭ до и после отделения от ростовой подложки, измеренные при освещении стандартным солнечным спектром AM1.5G. Для сравнения также приведена рассчитанная ВАХ модельного СЭ. На рис. 3, *b* показаны спектры внешней квантовой эффективности сформированных СЭ. До отделения СЭ демонстрирует удовлетворительные параметры работы: напряжение холостого хода $V_{oc} = 900 \text{ mV}$, ток короткого замыкания $J_{sc} = 17.7 \text{ mA/cm}^2$ и коэффициент заполнения

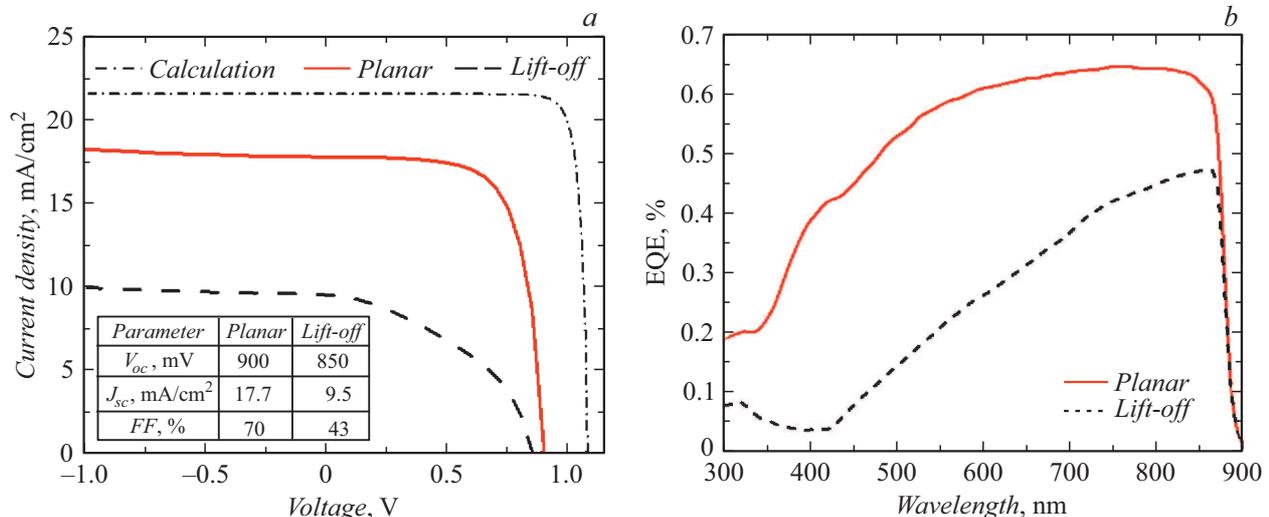


Рис. 3. ВАХ при спектре AM1.5G (*a*) и спектр внешней квантовой эффективности (*b*) для планарного и отделенного образцов СЭ.

ния $FF = 70\%$. Относительно низкие значения тока короткого замыкания и коэффициента заполнения могут быть связаны с образованием овальных дефектов в процессе эпитаксиального синтеза [9]. Спектр внешней квантовой эффективности для данного СЭ характеризуется снижением значения в коротковолновой и средневолновой областях спектра (вплоть до $600\text{--}700 \text{ nm}$), что дополнительно указывает на процессы рекомбинации носителей заряда в эмиттерной области. КПД данного элемента составил 11% . В результате процесса отделения от ростовой подложки отмечается резкое падение тока короткого замыкания и коэффициента заполнения до величин 9.5 mA/cm^2 и 43% соответственно, а также уменьшение величины напряжения холостого хода до 850 mV . Относительно планарного образца наблюдается дополнительное снижение спектральных характеристик в коротковолновой области, что связано с деградацией верхнего широкозонного окна AlGaAs в процессе проведения процедуры отделения, которая усиливает рекомбинацию неосновных носителей заряда на границе с эмиттером.

Рассчитанная удельная мощность (приведенная к массе всего элемента) для отделенного СЭ на подложке-носителе из ПММА толщиной $20 \mu\text{m}$ составила 750 W/kg . Для сравнения носитель, выполненный из алюминиевой фольги той же толщины, имеет значение данного показателя на уровне 461 W/kg [10]. Таким образом, используя органические полимерные носители, можно достичь существенного прироста удельной мощности.

В результате проведенного численного моделирования определены оптимальные параметры слоев отделенного СЭ на основе GaAs, обеспечивающие достижение наибольшего КПД для СЭ с такой конфигурацией без антиотражающего покрытия. Методом молекулярно-пучковой эпитаксии синтезированы гетероструктуры СЭ на основе GaAs и твердых растворов AlGaAs и InAlP. Сформированы прототипы СЭ, при этом в качестве

подложки-носителя выступали тонкие мембраны из оптически прозрачного ПММА. Экспериментально измерены вольт-амперные и спектральные характеристики отделенных и планарных СЭ. Показано, что применение органических полимерных носителей позволяет создавать СЭ с высокой удельной мощностью, что особенно важно при разработке гибких СЭ для беспилотных летательных аппаратов и наземных транспортных средств.

Финансирование работы

Ю.С. Бердников благодарит Российский научный фонд за финансовую поддержку исследований в области численного моделирования (проект № 21-79-00281).

Д.М. Митин благодарит Российский фонд фундаментальных исследований за поддержку исследований в области характеристики электрофизических свойств СЭ (проект 19-38-60008), а также Совет по грантам Президента РФ за поддержку исследований в области эпитаксиального синтеза (МК-3031.2021.1.2).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] N. Ali, R. Ahmed, J. Luo, M. Wang, A. Kalam, A.G. Al-Sehemi, Y. Fu, *Mater. Sci. Semicond. Process.*, **107**, 104810 (2020). DOI: 10.1016/J.MSSP.2019.104810
- [2] M. Reese, S. Glynn, M. Kempe, D. McGott, M. Dabney, T. Barnes, S. Booth, D. Feldman, N. Haegel, *Nature Energy*, **3** (11), 1002 (2018). DOI: 10.1038/s41560-018-0258-1
- [3] M. Green, E. Dunlop, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, N. Kopidakis, X. Hao, *Prog. Photovolt.*, **29** (1), 3 (2021). DOI: 10.1002/PIP.3371
- [4] H.L. Chen, A. Cattoni, R. Lépinau, A.W. Walker, O. Höhn, D. Lackner, G. Siefer, M. Faustini, N. Vandamme, J. Goffard, B. Behaghel, C. Dupuis, N. Bardou, F. Dimroth, S. Collin, *Nature Energy*, **4** (9), 761 (2019). DOI: 10.1038/s41560-019-0434-y
- [5] K. Papatryfonos, T. Angelova, A. Brimont, B. Reid, S. Guldin, P.R. Smith, M. Tang, K. Li, A.J. Seeds, H. Liu, D.R. Selviah, *AIP Adv.*, **11** (2), 025327 (2021). DOI: 10.1063/5.0039631
- [6] S. Adachi, *Properties of group-IV, III-V and II-VI semiconductors* (Wiley, 2005). DOI: 10.1002/0470090340
- [7] J.W. Leem, J.S. Yu, D.H. Jun, J. Heo, W.K. Park, *Solar Energy Mater. Solar Cells*, **127**, 43 (2014). DOI: 10.1016/j.solmat.2014.03.041
- [8] D.M. Mitin, F.Y. Soldatenkov, A.M. Mozharov, A.A. Vasilév, V.V. Neplokh, I.S. Mukhin, *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*, **9** (6), 789 (2018). DOI: 10.17586/2220-8054-2018-9-6-789-792
- [9] M.R. Melloch, *Solar Cells*, **30** (1-4), 313 (1991). DOI: 10.1016/0379-6787(91)90064-v
- [10] М.А. Пуятто, Н.А. Валишева, М.О. Петрушков, В.В. Преображенский, И.Б. Чистохин, Б.Р. Семягин, Е.А. Емельянов, А.В. Васев, А.Ф. Скачков, Г.И. Юрко, И.И. Нестеренко, *ЖТФ*, **89** (7), 1071 (2019). DOI: 10.21883/JTF.2019.07.47802.438-18 [M.A. Putyato, N.A. Valisheva, M.O. Petrushkov, V.V. Preobrazhenskii, I.B. Chistokhin, B.R. Semyagin, E.A. Emel'yanov, A.V. Vasev, A.F. Skachkov, G.I. Yurko, I.I. Nesterenko, *Tech. Phys.*, **64** (7), 1010 (2019). DOI: 10.1134/S106378421907020X].