Увеличение эффективности ввода оптической мощности в AlGaAs/GaAs фотоэлектрических преобразователях лазерного излучения

© А.К. Романчук, А.В. Малевская, Н.А. Калюжный, М.В. Нахимович, М.З. Шварц, В.М. Андреев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: a.romanchuk@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 30 апреля 2025 г.
В окончательной редакции 11 июля 2025 г.
Принята к публикации 15 июля 2025 г.

Исследовано увеличение эффективности ввода оптической мощности в AlGaAs/GaAs фотоэлектрических преобразователях лазерного излучения с использованием призматических покрытий. Основное внимание уделено разработке и оптимизации конструкции, обеспечивающей наименьшее отражение. Показано, что использование призматических покрытий обеспечивает повышение внешней квантовой эффективности образцов.

Ключевые слова: фотоэлектрические преобразователи, призматические покрытия, внешняя квантовая эффективность.

DOI: 10.61011/FTP.2025.04.61251.7971

1. Введение

Фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) лазерного излучения (ЛИ) находят широкое применение во многих областях науки, техники и медицины [1,2]. Для изготовления ФЭП, работающих в диапазоне волн 800–860 нм, используются полупроводниковые соединения AlGaAs/GaAs. Впервые ФЭП на основе данной гетероструктуры были изготовлены под руководством Ж.И. Алфёрова в ФТИ им. Иоффе [3]. Сейчас достигнутые значения кпд для преобразования лазерного излучения на длине волны 809 нм составляют 60 % [4]. Была показана возможность достижения кпд ФЭП ЛИ на основе AlGaAs/GaAs-гетероструктуры 68.9 % на длине волны 809 нм, изготовленных при встраивании серебряного отражателя с использованием технологии „переноса“ гетероструктуры на подложку-носитель [5].

Дальнейшие исследования по увеличению эффективности ФЭП направлены на снижение омических и оптических потерь, повышение мощности преобразуемого излучения, которое возможно при уменьшении шага контактной сетки на его фронтальной поверхности. Однако при таком решении значительно возрастают оптические потери: часть излучения поглощается или отражается токосборными шинами, что сказывается на фототоке и кпд прибора. Снизить оптические потери на ввод излучения возможно формированием пирамидального наклонного профиля токосборных шин с зеркальными боковыми гранями, отражающими излучение в направлении фоточувствительной поверхности ФЭП [6]. Другим решением данной проблемы является формирование призматического покрытия (ПП), в общем случае представляющего собой матрицу из полуцилиндрических полнотелых линейных линз с шириной основания каждой линзы, соответствующей шагу контактной сетки ФЭП [7]. Принцип работы таких линз заключается в перенаправлении световых лучей, падающих на контактную сетку, к фоточувствительной поверхности ФЭП за счет их преломления на выпуклой лицевой поверхности.

Задачей данной работы является снижение омических и оптических потерь путем разработки и изготовления ПП с микроразмерным профилем для ФЭП ЛИ с характерным шагом контактной сетки на фотоприемной поверхности 50 мкм и исследование влияния ПП на характеристики AlGaAs/GaAs-приемников излучения.

2. Гетероструктура AlGaAs/GaAs

Исследования проводились на основе гетероструктуры AlGaAs/GaAs (см. рис. 1), выращенной методом МОС-гидридной эпитаксии на GaAs-подложках p-типа проводимости [8]. Слой p-Al_xGaAs выполняет роль тыльного потенциального барьера. Активная область с гетеропереходом, сформированным базовой p-GaAs-областью и градиентным n-$Al_xGaAs \rightarrow GaAs$ эмиттером, позволяет снизить высоту потенциального барьера, тем самым увеличивая время жизни носителей заряда. Необходимо отметить, что параметры активной области структуры, используемой для изготовления экспериментальных образцов ФЭП, не были оптимальны с точки зрения поглощения фотонов в спектральном диапазоне 800–860 нм. Данные структуры служили в качестве референсных для создания инверсных ФЭП с тыльным отражателем и уменьшенной областью базы, поэтому не могли иметь высокой энергоэффективности. Слой n-Al_xGaAs, с высокой концентрацией алюминия, выполняет функцию стоп-слоя при травлении окна в

Коэффициент отражения для различных АОП на длине волны 800 нм

Материал покрытия	TiO_x	TiO_x+силикон	TiO_x/SiO_2+силикон	TiO_x/SiO_2
Коэффициент отражения R, %	6.79	2.32	5.93	0.9

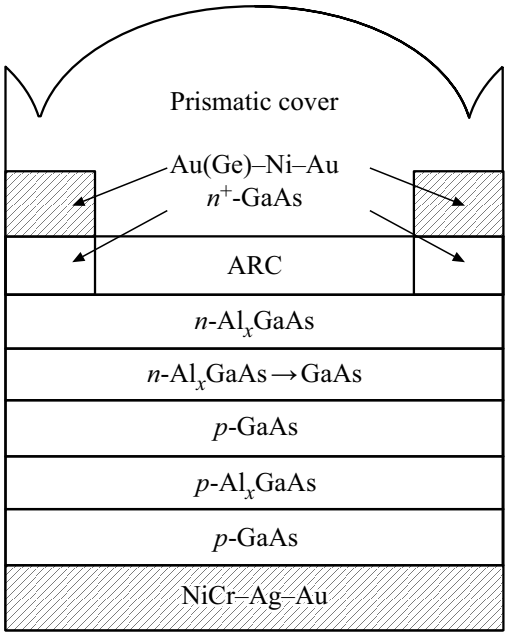

Рис. 1. Схема поперечного разреза ФЭП на основе гетероструктуры AlGaAs/GaAs.

процессе постростовой обработки и способствует снижению сопротивления растекания. Высоколегированный n^+-GaAs-слой необходим для снижения сопротивления при формировании фронтального омического контакта к поверхности ФЭП.

3. Постростовая технология формирования

Постростовые операции формирования ФЭП ЛИ на основе гетероструктуры AlGaAs/GaAs включают в себя следующие этапы [9,10]:

– травление контактного проводящего слоя n^+-GaAs для открытия фоточувствительной области ФЭП;

– формирование антиотражающего покрытия (АОП) методом магнетронного напыления;

– формирование фронтальной контактной сетки к слою полупроводника n-типа проводимости (Au(Ge)-Ni-Au);

– осаждение сплошного тыльного омического контакта к полупроводниковому слою p-типа проводимости (NiCr-Ag-Au);

– электрохимическое „усиление“ фронтального и тыльного омических контактов;

– формирование разделительной мезаструктуры.

Обычно АОП формируется на основе пары слоев TiO_x/SiO_2 [11]. Основа работы лежит в интерференции лучей, отраженных на границах раздела сред воздух–пленка–подложка. Коэффициент преломления материалов должен увеличиваться по мере приближения к подложке.

При использовании ПП на основе оптического силиконового компаунда Wacker 604 (коэффициент преломления $\sim 1.43-1.39$ в диапазоне длин волн 350–2000 нм [12]) следует учитывать интерференцию на границе силикон–пленка. Так как пленка SiO_2 имеет коэффициент преломления ~ 1.45, на границе силикон–SiO_2 будут возникать дополнительные оптические потери. Поэтому в варианте использования ПП на поверхность ФЭП напылялся только слой TiO_x (коэффициент преломления ~ 2.42), что позволило обеспечить максимальное снижение потерь на отражение для целевой длины волны ЛИ (см. таблицу).

С целью снижения сопротивления растекания и увеличения мощности преобразуемого ФЭП излучения на фотоприемной поверхности прибора формируется сетка с малым шагом контактных шин. Потери на затенение фоточувствительной области при ширине шин 6.5 мкм, располагаемых с шагом 50 мкм, составляют $K = 13\,\%$.

4. Метод формирования призматического покрытия

Формирование ПП на основе оптического силикона выполнялось при помощи матриц из арсенида галлия. Перед созданием матриц необходимо провести идентификацию кристаллографических плоскостей с помощью обработки тыльной стороны шлифованной подложки GaAs в составе на основе перекиси водорода и водного раствора аммиака. Характерный профиль поверхности GaAs после обработки представлен на рис. 2, *a*. После выявления плоскостей на фронтальной стороне формируется маска фоторезиста с топологией ФЭП. Для создания анизотропным жидкостным травлением полуцилиндрического профиля необходимо расположить маску на фронтальной поверхности подложки в направлении, перпендикулярном растравленным дефектам. Травление проводилось в составе $K_2Cr_2O_7$:HBr, а полученная матрица представлена на рис. 2, *b*. Возможно изменять параметры матрицы: увеличение времени травления позволяет формировать полуцилиндры с меньшим радиусом кривизны, а изменение ориентации ведет к созданию наклонного профиля.

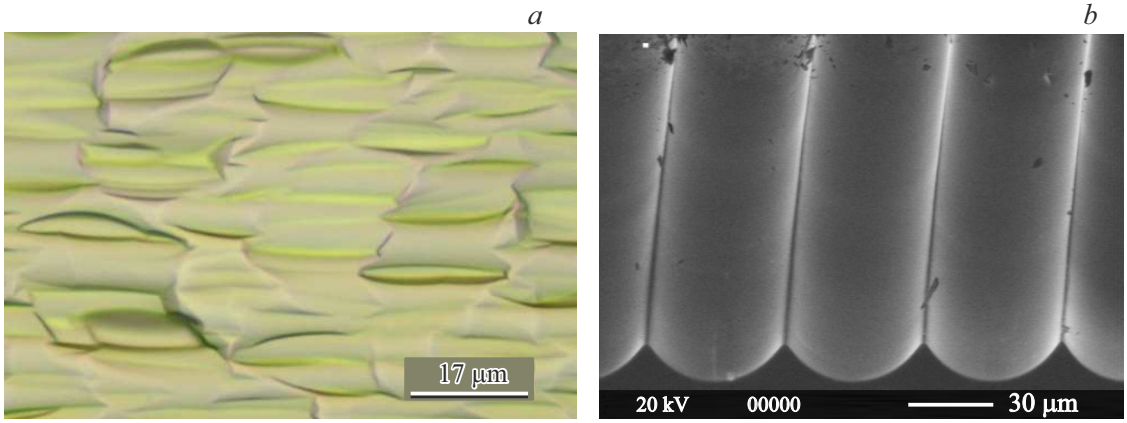

Рис. 2. *a* — фотография (оптический микроскоп) тыльной поверхности GaAs-подложки для выявления кристаллографической ориентации; *b* — изображение (сканирующий электронный микроскоп) скола матрицы GaAs.

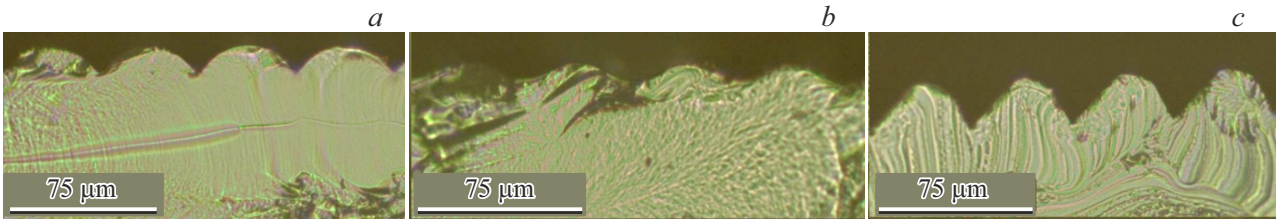

Рис. 3. Используемые профили ПП: *a* — прямой, *b* — пологий, *c* — наклонный.

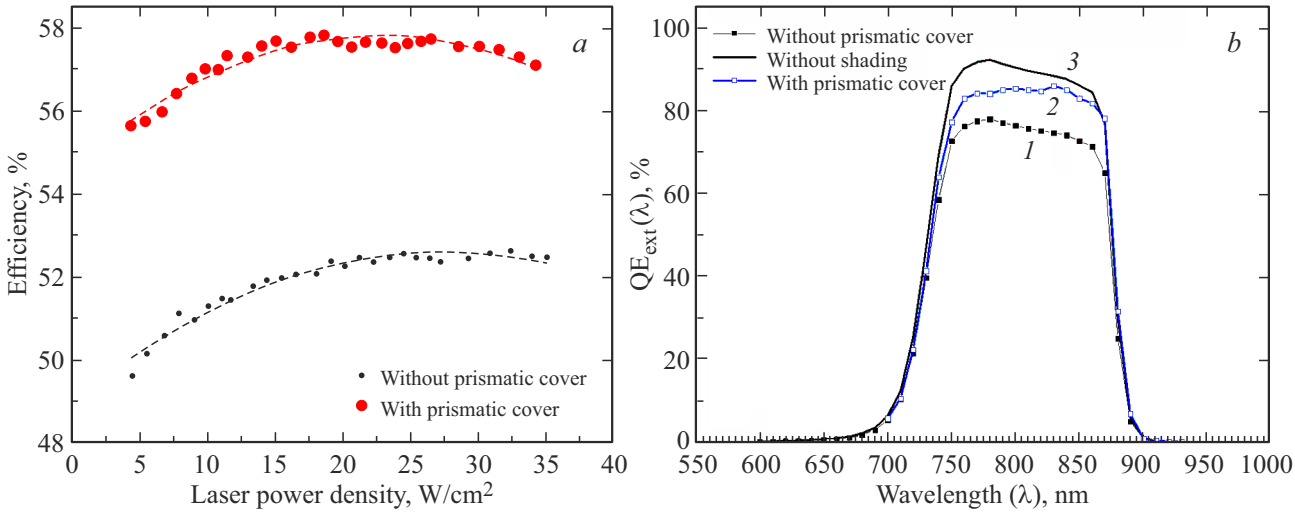

Рис. 4. Характеристики ФЭП: *a* — зависимости кпд от плотности мощности ЛИ ФЭП с ПП и двуслойным АОП, *b* — спектральные зависимости внешней квантовой эффективности исследуемых образцов.

5. Результаты и анализ

Были изготовлены ПП с различным радиусом кривизны преломляющей поверхности линейных линз (рис. 3). Изготовленные ПП устанавливались на поверхности ФЭП, контроль совмещения матрицы цилиндрических линз и контактных полосков выполнялся визуально.

В ходе проводимого исследования измерялась внешняя квантовая эффективность фотоответа ФЭП ЛИ с различными типами ПП. Для ПП типов (*b*) и (*c*) эффекта перенаправления света на фоточувствительную область не наблюдалось: квантовая эффективность была на уровне ФЭП с покрытием на основе пары „TiO_x + планарный силикон“. Это связано с различи-

ями в геометрии призматических структур. Профиль на рис. 3, *b* имеет полку при переходе от одной полуцилиндрической линзы к другой. В результате свет не преломляется, что не позволяет снизить оптические потери. Профиль на рис. 3, *c* обладает асимметричным наклоном граней, из-за чего преломленное излучение отклоняется в сторону, частично падая на область контактных шин. Исходя из полученных данных дальнейшее исследование проводилось с использованием покрытия типа (*a*).

На рис. 4, *a* приведена зависимость кпд для образца с призматическим покрытием и для образца с двуслойным АОП на основе TiO_x/SiO_2. На рис. 4, *b* показана спектральная зависимость внешней квантовой эффективности фотоответа для ФЭП с двуслойным АОП TiO_x/SiO_2 (кривая *1*), образца с однослойным АОП TiO_x и ПП на поверхности (кривая *2*) и расчетная зависимость для образца с отсутствием затенения контактной сеткой (кривая *3*). При этом изменение горизонтальной составляющей внешней квантовой эффективности для образца с призматическим покрытием (кривая *2*) вызвано селективностью просветляющих свойств силикона для различных длин волн.

Достижение расчетных значений внешней квантовой эффективности невозможно из-за потерь на отражение при прохождении границы раздела воздух–силикон. Однако, исходя из проведенных измерений можно говорить об эффективности использования ПП в качестве метода снижения оптических потерь на ввод излучения для ФЭП с высокой плотностью лицевой контактной сетки, в частности с шагом полосков 50 мкм. Как было указано выше, конструкция активной области структур не была рассчитана на полное поглощение подзонного излучения, поэтому ФЭП не обладали высоким кпд [8]. Тем не менее применение ПП позволило заметно увеличить внешнюю квантовую эффективность образца на длине волны 800 нм с 76 до 85 %, что обеспечило рост кпд ФЭП с 52% (стандартное двуслойное АОП) до значений, превышающих 57 % при плотности лазерного излучения > 10 Вт/см^2.

6. Заключение

Исследована и разработана технология формирования силиконовых ПП с использованием матриц GaAs различного профиля, изготовленных методом химического травления. Выявлено влияние профиля ПП на характеристики ФЭП ЛИ. Исследованы комбинации АОП, минимальные значения коэффициента отражения достигнуты при нанесении двуслойного покрытия TiO_x/SiO_2 и TiO_x/силикон.

Формирование ПП в виде матрицы из полуцилиндрических полнотелых линейных линз позволило снизить затенение фоточувствительной поверхности для ФЭП за счет преломления излучения, поступающего на область шин фронтального омического контакта, на фоточувствительную поверхность, тем самым повысив эффективность прибора на абсолютных 5 %.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] C. Algora, I. García, M. Delgado, R. Peña, C. Vázquez, M. Hinojosa, I. Rey-Stolle. Beaming power: Photovoltaic laser power converters for power-by-light, **6** (2), 340 (2022). DOI: 10.1016/2021.11.014

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

[3] V.M. Andreev, V.A. Grilikhes, V.D. Rumyantsev. *Photovoltaic conversion of concentrated sunlight* (Wiley, N.Y., 1997) p. 294.

[4] V.P. Khvostikov, N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, N.S. Potapovich, M.Z. Shvarts, S.A. Sorokina, A. Luque, V.M. Andreev. AIP Conf. Proc., **1616**, 21 (2014).

[5] H. Helmers, E. Lopez, O. Höhn, D. Lackner, J. Schön, M. Schauerte, M. Schachtner, F. Dimroth, A.W. Bett. Phys. Status Solidi RRL, **15** (7), 2100113 (2021). DOI: 10.1002/202100113

[6] A.V. Malevskaya, D.A. Malevski, N.D. Il'Inskaya. J. Phys.: Conf. Ser., **690** (1), 012039 (2016). DOI: 10.1088/1742-6596/690/1/012039

[7] P. García-Linares, P. Voarino, C. Dominguez, O. Dellea, P. Besson, P. Fugier, M. Baudrit. AIP Conf. Proc., **1679** (1), 060001 (2015). DOI: 10.1063/1.4931535

[8] N.A. Kalyuzhnyy, A.V. Malevskaya, S.A. Mintairov, M.A. Mintairov, M.V. Nakhimovich, R.A. Salii, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev. Solar Energy Mater. Solar Cells, **262**, 112251 (2023). DOI: 10.1016/.2023.112551

[9] B.W. Smith, K. Suzuki (eds). *Microlithography: Science and Technology*, 2nd edn (CRC Press, 2007) p. 864. DOI: 10.1201/9781420051537

[10] H.J. Levinson. *Principles of Lithography*, 3rd edn (SPIE Press, Washington, 2010) p. 504.

[11] J. Reuna, A. Hietalahti, A. Aho, R. Isoaho, T. Aho, M. Vuorinen, A. Tukiainen, E. Anttola, M. Guina. ACS Appl. Energy Mater., **5** (5), 5804 (2022). DOI: 10.1021/2C00133

[12] M.Z. Shvarts, V.M. Emelyanov, M.V. Nakhimovich, A.A. Soluyanov. J. Phys.: Conf. Ser., **1400** (6), 066052 (2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1400/6/066052

Редактор Редактор Г.А. Оганесян

Increasing the efficiency of optical power input in AlGaAs/GaAs photovoltaic laser converters

A.K. Romanchuk, A.V. Malevskaya, N.A. Kalyuzhnyy, M.V. Nakhimovich, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev

Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg Russia

Abstract The increase in the efficiency of optical power input in AlGaAs/GaAs photoelectric converters of laser radiation using prismatic coatings is investigated. The primary focus is on the design and optimization of a construction that minimizes reflection. It is demonstrated that the use of prismatic covers enhances the external quantum efficiency of the samples.