

Гибридные каскадные солнечные элементы на основе бондинга материалов $A^{III}B^V$ и кремния

© С.А. Минтаиров, В.М. Емельянов, Н.А. Калюжный, М.В. Нахимович, Р.А. Салий, М.З. Шварц

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

E-mail: mintairov@scell.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 5 мая 2025 г.

В окончательной редакции 24 июня 2025 г.

Принята к публикации 18 сентября 2025 г.

Проведено исследование различных пар $A^{III}B^V$ материалов, с увеличенным содержанием алюминия в фотоактивных слоях широкозонных субэлементов, для формирования структур $(Al)GaInP/(Al)GaAs/Si$ гибридных солнечных элементов. Выполнены расчеты спектральных характеристик внешней квантовой эффективности $(Al)GaInP/(Al)GaAs/Si$ солнечных элементов. Получены прогнозные оценки для КПД солнечных элементов на основе структур, обеспечивающих эффективную работу приборов при преобразовании излучений: космического (AM0, 1 sun) — $GaInP_2/Al_{0.1}Ga_{0.9}As/Si$ (33.5 %) и $(Al_{0.17}Ga_{0.83})InP_2/Al_{0.1}Ga_{0.9}As/Si$ (34.9 %); наземного (AM1.5D, 236 suns) — $GaInP_2/Al_{0.08}Ga_{0.92}As/Si$ (~ 43.1 %) и $(Al_{0.14}Ga_{0.86})InP_2/Al_{0.08}Ga_{0.92}As/Si$ (~ 44.1 %).

Ключевые слова: многопереходный солнечный элемент, МОСГФЭ, КПД, спектральная характеристика, математическое моделирование.

DOI: 10.61011/FTP.2025.06.61567.8022

Во второй половине прошлого столетия благодаря развитию эпитаксиальных технологий, в частности газовой эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ), были созданы солнечные элементы (СЭ) на основе арсенида галлия, что послужило толчком к активным исследованиям фотопреобразователей на основе материалов $A^{III}B^V$. Они имеют высокий потенциал по КПД, хорошую температурную стабильность, радиационную стойкость и возможность создания структур с несколькими р–п-переходами. К настоящему моменту продемонстрированы высокие эффективности преобразования энергии наземного солнечного излучения однопереходными $A^{III}B^V$ СЭ на основе материалов GaAs — 29.1 %, InP — 24.2 %, AlGaAs — 16.6 % и GaInP — 22 % [1].

Первый многопереходный (МП) СЭ на основе тандема GaInP/GaAs был реализован в 1990 г. и имел КПД 27 % (AM1.5D) [2]. В 2005 г. были созданы GaInP/GaAs/Ge трехпереходные СЭ с КПД 39.0 % (AM1.5D) [3]. В настоящее время для наземных условий достигнута самая высокая эффективность преобразования — 47.1 % (AM1.5D, 143 suns) при использовании шестипереходных инвертированных метаморфных СЭ [4]. Для космических условий (спектр AM0) на данный момент наилучшие лабораторные значения КПД составляют: 35.8 % для механически стыкованных пятипереходных СЭ [5] и 33.7 % для инвертированных монокристаллических МП СЭ [6]. Однако в производстве до сих пор доминируют согласованные по параметру кристаллической решетки монокристаллические GaInP/Ga(In)As/Ge трехпереходные СЭ с КПД ~ 40–41 % в наземных условиях и ~ 30–31 % в космосе. Решение задачи дальнейшего увеличения КПД лежит в плоскости новых конструктивных и структурных

исполнений МП СЭ: метаморфные гетероструктуры [7], механическая стыковка СЭ [8], а также технология „бондинга“ пластин [9].

Успешные варианты „бондинга“ двухпереходных широкозонных GaInP/GaAs и GaInP/GaInAsP тандемов с однопереходным Si СЭ были недавно представлены в работах [10,11].

В данной работе проведено исследование различных пар материалов $A^{III}B^V$ широкозонного тандема для создания $(Al)GaInP/(Al)GaAs/Si$ ГСЭ с добавлением алюминия в верхний и нижний субэлементы. Так как в монокристаллической структуре МП СЭ субэлементы соединены последовательно, общий ток структуры будет определяться минимальным из фотогенерированных токов (ФГТ) субэлементов, поэтому оптимальным является случай равенства этих токов. Важно отметить, что спектральная плотность фотонов в солнечном спектре и ширины запрещенных зон материалов субэлементов, определяющих край поглощения, зачастую приводят к ситуации, когда какой-либо из субэлементов необходимо утончить для пропускания части фотонов с энергией больше ширины запрещенной зоны его материала в следующий субэлемент для согласования ФГТ. Проведены расчеты спектральных характеристик внешней квантовой эффективности (ВКЕ) $(Al)GaInP/(Al)GaAs/Si$ ГСЭ и найдены толщины фотоактивных слоев $(Al)GaInP$ и $(Al)GaAs$ субэлементов, обеспечивающие согласование ФГТ, а также проведена оценка КПД таких приборов.

Математическое моделирование спектральных характеристик $(Al)GaInP/(Al)GaAs$ -тандема и Si-субэлемента проводилось по методике, описанной в работе [12]. Как было показано в нашей работе [13], наиболее перспективным для создания высокоэффективных

(Al)GaInP/(Al)GaAs/Si ГСЭ являются гетеропереходные кремниевые СЭ Si-HJT (Silicon HeteroJunction Technology [14]), преобразующие фотоны с длиной волны вплоть до 1200 нм. Спектральная характеристика такого Si СЭ и методика расчета ВКЕ Si-субэлемента GaInP/GaAs/Si ГСЭ представлены в работе [13].

На рис. 1 приведено схематическое изображение структуры верхнего (Al)GaInP/(Al)GaAs-тандемного СЭ. Отметим, что для создания монолитной структуры (Al)GaInP/(Al)GaAs/Si ГСЭ необходимо использование второго туннельного диода (ТД) на границе широкозонного тандема и Si. Однако слои данного ТД не были включены в структуру для расчета, так как слои AlGaAs/GaInP, из которых можно выполнить нижний ТД, не будут поглощать фотоны, преобразуемые в Si-субэlemente. При расчетах считалось падение фотонов на поверхность из полубесконечной среды воздуха, при этом выход фотонов считался в полубесконечную среду кремния. В качестве просветляющего покрытия, уменьшающего отражение от структуры, в расчете принимались диэлектрические слои $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$. При расчетах общие толщины фотоактивных слоев (эмиттер и база) верхнего (Al)GaInP (th_{AGIP}), преобразующих фотоны с длинами волн до 620–670 нм в зависимости от концентрации алюминия, и среднего (Al)GaAs субэлементов (th_{AGA}), преобразующих фотоны с длинами волн до 825–880 нм в зависимости от концентрации алюминия, варьировались таким образом, чтобы обеспечить полное согласование субэлементов по ФГТ в (Al)GaInP/(Al)GaAs/Si ГСЭ.

SiO_2	Anti-reflection coating	80 nm
TiO_2		40 nm
$n\text{-AlInP}_2$	Window	30 nm
$n\text{-(Al}_x\text{Ga}_{1-x})\text{InP}_2$	Emitter	th_{AGA}
$p\text{-(Al}_x\text{Ga}_{1-x})\text{InP}_2$	Base	
$p\text{-(Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7})\text{InP}_2$	Back surface field	50 nm
$p^{++}\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$	Tunnel junction	15 nm
$n^{++}\text{-GaInP}_2$		15 nm
$n\text{-AlInP}_2$	Window	30 nm
$n\text{-GaInP}_2$	Window	100 nm
$n\text{-Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$	Emitter	th_{AGA}
$p\text{-Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$	Base	
$p\text{-GaInP}_2$	Back surface field	100 nm
$p\text{-Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$		100 nm

Рис. 1. Послойная схема структуры верхнего (Al)GaInP/(Al)GaAs-тандема, использованная при расчетах ВКЕ ГСЭ.

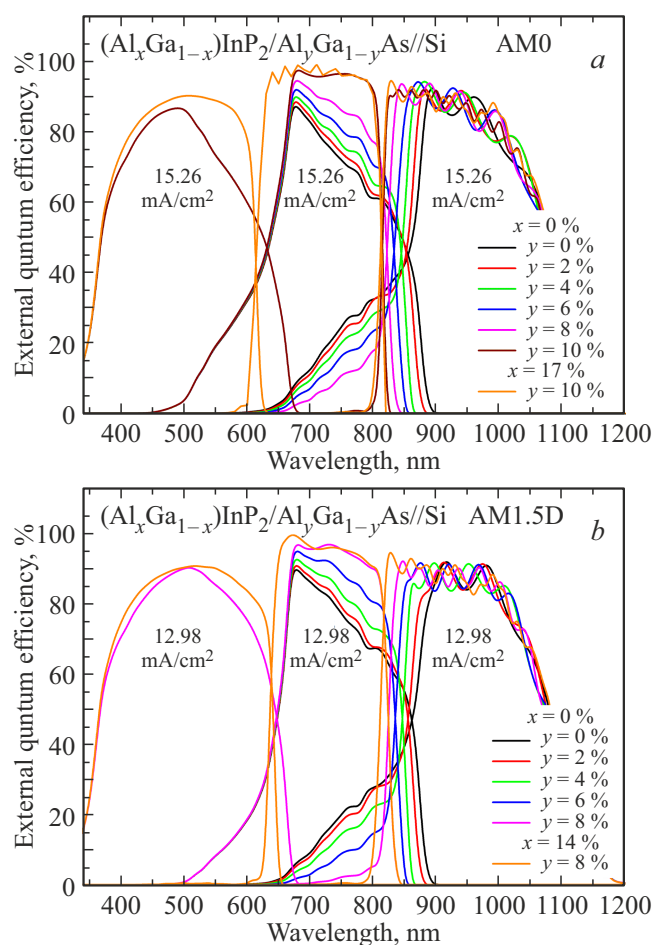


Рис. 2. Расчетные спектральные характеристики ВКЕ для полностью согласованных по ФГТ $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})\text{InP}_2/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{Si}$ ГСЭ: *a* — для космического спектра AM0, *b* — для наземного спектра AM1.5D.

Для космического спектра (AM0) вплоть до концентрации алюминия в (Al)GaAs субэlemente в 10 % плотность ФГТ при согласовании составляет 15.26 мА/см² (рис. 2, *a*), а для прямого наземного спектра (AM1.5D) вплоть до концентрации алюминия в (Al)GaAs субэlemente в 8 % — 12.98 мА/см² (рис. 2, *b*). Как отмечалось ранее, при расчетах ВКЕ толщины фотоактивных слоев субэлементов варьировались до получения согласования ФРГ, и для случая GaInP/GaAs-структуры широкозонного тандема согласование ФГТ для спектра AM0 удалось добиться при толщинах верхнего и среднего субэлементов 340 и 770 нм соответственно (рис. 3). Проходя через атмосферу, солнечный спектр лишается значительной части коротковолновых фотонов, поэтому для согласования субэлементов под наземный спектр требуется заметное увеличение толщин фотоактивных слоев верхнего субэlementa — 540 нм и, как следствие, большая суммарная толщина фотоактивных слоев среднего субэlementa — 900 нм (рис. 3). При этом для обоих вариантов преобразуемых световых потоков

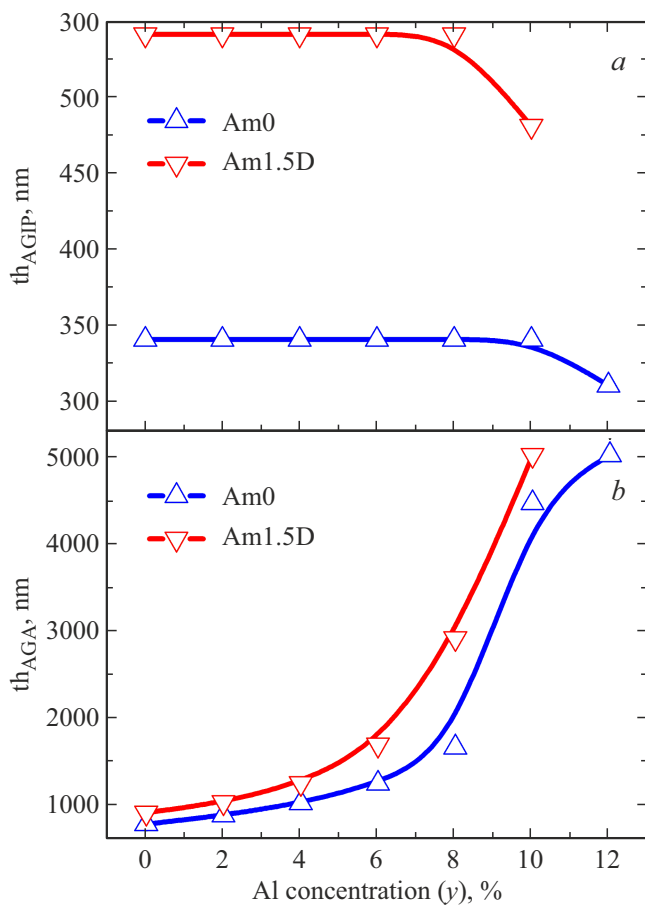


Рис. 3. Зависимости толщин фотоактивных слоев: *a* — верхнего (GaInP)-субэлемента, *b* — среднего (AlGaAs)-субэлемента GaInP₂/AlGaAs//Si ГСЭ, при которых обеспечивается полное согласование ФГТ для спектров AM0 (синие линии) и AM1.5D (красные линии), от концентрации алюминия в слоях AlGaAs.

(AM0 и AM1.5D) спектры ВКЕ AlGaAs-субэлементов отличны от нуля в диапазоне fotocувствительности AlGaInP-субэлемента (450–680 нм), что характеризует прохождение части фотонов, которые возможно энергетически преобразовать в верхнем субэlemente, в слой среднего субэлемента. Аналогичным образом развивается ситуация и для фотонов спектрального диапазона 600–880 нм, которые частично следует „пропустить“ (за счет подбора толщины слоев) в нижний субэлемент (рис. 2). Такое перераспределение фотонов между субэлементами ГСЭ необходимо, как отмечалось ранее, для согласования ФГТ. Таким образом, очевидно, существует возможность повышения КПД ГСЭ за счет увеличения значения ширины запрещенной зоны каждого из субэлементов верхнего тандема. Фотоны при этом будут перераспределяться между субэлементами, не влияя на ФГТ, а генерируемое ГСЭ напряжение увеличится.

Введение алюминия в фотоактивные слои среднего (AlGaAs) субэлемента приводит к сдвигу края его поглощения в коротковолновую область и прохождению большего количества фотонов с длиной волны > 900 нм

в нижний (Si) субэлемент (рис. 2). При этом ФГТ субэлементов не уменьшается вплоть до концентрации алюминия в слоях AlGaAs 10% для спектра AM0 (рис. 4, *a*) и вплоть до 8% для спектра AM1.5D (рис. 4, *a*). Толщину фотоактивных слоев среднего субэлемента следует увеличивать одновременно с повышением концентрации алюминия, ввиду того что необходимо обеспечить полное поглощение длинноволновых фотонов (рис. 3). Дальнейшее увеличение концентрации алюминия приводит к падению ФГТ ГСЭ (рис. 4, *a*) из-за невозможности согласования ФГТ субэлементов, так как в кремний начинает проходить слишком большое количество фотонов, и ФГТ нижнего субэлемента становится большим, чем у верхнего и среднего субэлементов. Как следствие, для согласования ФГТ в широкозонном тандеме для содержания алюминия 12 и 10% для спектров AM0 и AM1.5D соответственно толщину фотоактивных слоев верхнего субэлемента следует уменьшить (рис. 3).

Аналогичные расчеты были проведены для верхнего AlGaInP-субэлемента в тандеме с AlGaAs-субэлементом, концентрация алюминия в котором составляла 10% для спектра AM0 и 8% для AM1.5D. Предельная концентрация алюминия в слоях AlGaInP, при ко-

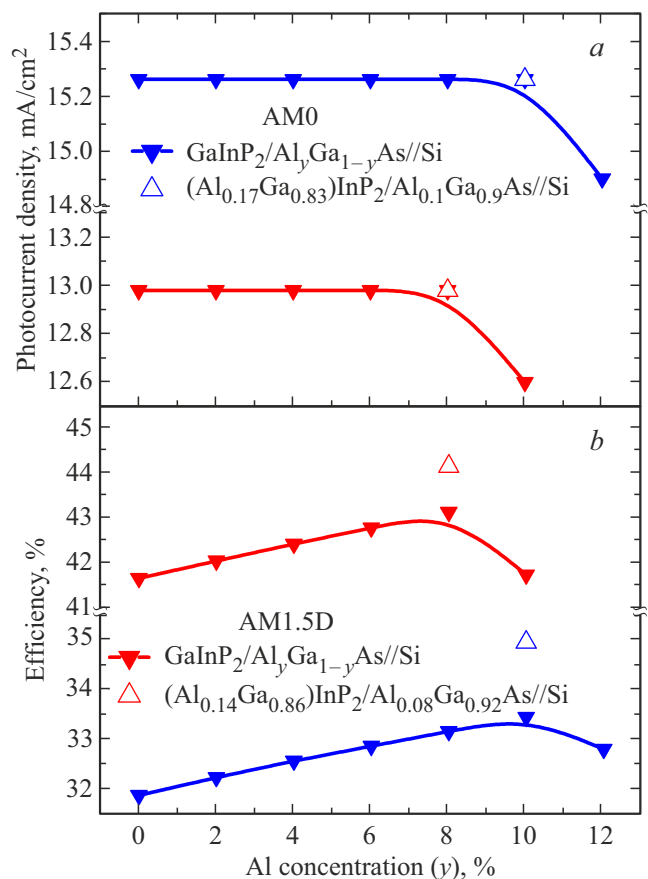


Рис. 4. Зависимости ФГТ (*a*) и КПД (*b*) (Al_xGa_{1-x})InP₂/Al_yGa_{1-y}As//Si ГСЭ для спектров AM0 (синие линии и символы) и AM1.5D (красные линии и символы) от концентрации алюминия в слоях AlGaAs.

торой возможно согласование ФГТ субэлементов составила 17 % для спектра AM0 (рис. 2, а, оранжевые линии) и 14 % для спектра AM1.5D (рис. 2, б, оранжевые линии). Таким образом, были определены оптимальные конструкции ГСЭ для космического и наземного спектров: $(\text{Al}_{0.17}\text{Ga}_{0.83})\text{InP}_2/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{Si}$ при $\text{th}_{\text{AGIP}} = 1950$ нм и $\text{th}_{\text{AGA}} = 4350$ нм (AM0) и $(\text{Al}_{0.14}\text{Ga}_{0.86})\text{InP}_2/\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{As}/\text{Si}$ при $\text{th}_{\text{AGIP}} = 2050$ нм и $\text{th}_{\text{AGA}} = 2900$ нм (AM1.5D).

Оценка КПД предложенных конструкций проводилась по методике, описанной в нашей предыдущей работе [13]. Она основана на том, что КПД СЭ пропорционален произведению ФГТ и напряжению холостого хода (V_{oc}). В качестве реперных образцов были взяты трехпереходные $\text{GaInP}/\text{Ga}(\text{In})\text{As}/\text{Ge}$ СЭ: $V_{\text{oc}} = 2.69$ В, ФГТ = 16.75 мА/см², КПД 29.4 % (AM0, 1 sun) [13] и $V_{\text{oc}} = 3.09$ В, ФГТ = 14.3 мА/см², КПД 39.0 % (AM1.5D, 236 suns) [3]. Для оценки КПД использовались значения ФГТ, полученные из расчетов (рис. 2), а напряжение оценивалось следующим образом: замена Ge на Si добавляет 0.5 В (V_{oc} для кремния составляет 0.75 В, для германия — 0.25 В), увеличение ширины запрещенной зоны фотоактивных слоев верхнего тандема за счет замены материалов $\text{GaInP}/\text{Ga}(\text{In})\text{As}$ на GaInP/GaAs обеспечивает дополнительную прибавку напряжения на 40 мВ [13], а прибавка напряжения за счет введения алюминия равна разнице ширины запрещенной зоны.

Проведенные расчеты (рис. 4, б) позволяют прогнозировать КПД $\text{GaInP}_2/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{Si}$ ГСЭ на уровне ~ 33.5 % (AM0, 1 sun), $\text{GaInP}_2/\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{As}/\text{Si}$ ГСЭ ~ 43.1 % (AM1.5D, 236 suns), $(\text{Al}_{0.17}\text{Ga}_{0.83})\text{InP}_2/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{Si}$ ~ 34.9 % (AM0, 1 sun), и $(\text{Al}_{0.14}\text{Ga}_{0.86})\text{InP}_2/\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{As}/\text{Si}$ ~ 44.1 % (AM1.5D, 236 suns).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M.A. Green, E.D. Dunlop, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, N. Kopidakis, X. Hao. *Progr. Photovolt.*, **28**, 629 (2020). DOI: 10.1002/pip.3303
- [2] J.M. Olson, S.R. Kurtz, A.E. Kibbler. *Appl. Phys. Lett.*, **56**, 623 (1990). DOI: 10.1063/1.102717
- [3] R.R. King, D.C. Law, C.M. Fetzer, R.A. Sherif, K.M. Edmondson, S. Kurtz, G.S. Kinsey, H.L. Cotal, D.D. Krut, J.H. Ermer, N.H. Karam. *Proc. 20th EUPVSEC 2005*, p. 118.
- [4] J.F. Geisz, R.M. France, K.L. Schulte, M.A. Steiner, A.N. Norman, H.L. Guthrey, M. Young, T. Song, T. Moriarty. *Nature Energy*, **5**, 326 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0598-5>
- [5] X. Li, G. Li, H. Lu, W. Zhang. *J. Semicond.*, **42** (12), 122701 (2021). DOI: 10.1088/1674-4926/42/12/122701
- [6] P. Patel, D. Aiken, D. Chumney, A. Cornfeld, Y. Lin, C. Mackos, M. Stan. *IEEE 38th Photovoltaic Specialists Conf. (PVSC) Part 2*, Austin, TX, USA, 2012, 1. DOI: 10.1109/PVSC-Vol2.2012.6656717

- [7] J.F. Geisz, S. Kurtz, M.W. Wanlass, J.S. Ward, A. Duda, D.J. Friedman, J.M. Olson, W.E. McMahon, T.E. Moriarty, J.T. Kiehl. *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 023502 (2007). DOI: 10.1063/1.2753729
- [8] Y.C. Kao, H.M. Chou, S.C. Hsu, A. Lin, C.C. Lin, Z.H. Shih, C.L. Chang, H.F. Hong, R.H. Hong. *Sci. Rep.*, **9** (1), 4308 (2019). DOI: 10.1038/s41598-019-40727-y
- [9] F. Dimroth, M. Grave, P. Beutel, U. Fiedeler, C. Karcher, T.N.D. Tibbitts, E. Oliva, G. Siefert, M. Schachtner, A. Wekkelil, A.W. Bettl, R. Krause, M. Piccin, N. Blanc, C. Drazek, E. Guiot, B. Ghyselen, T. Salvétat, A. Tauzin, T. Signamarcheix, A. Dobrich, T. Hannappel, K. Schwarzburg. *Progr. Photovolt.: Res. Appl.*, **22** (3), 277 (2014). DOI: 10.1002/pip.2475
- [10] P. Schygulla, R. Müller, D. Lackner, O. Höhn, H. Hauser, B. Bläsi, F. Predan, J. Benick, M. Hermle, S. Glunz, F. Dimroth. *Progr. Photovolt.: Res. Appl.*, **30**, 869 (2022). DOI: 10.1002/pip.3503
- [11] P. Schygulla, R. Müller, O. Höhn, M. Schachner, D. Chojniak, A. Cordaro, S. Tabernig, B. Blasi, A. Polman, G. Siefert, D. Lackner, D. Frank. *Progr. Photovolt.: Res. Appl.*, **33** (1), 100 (2025). DOI: 10.1002/pip.3769
- [12] С.А. Минтаиров, В.М. Андреев, В.М. Емельянов, Н.А. Калужный, Н.К. Тимошина, М.З. Шварц, В.М. Лантратов. *ФТП*, **44** (8), 1118 (2010).
- [13] С.А. Минтаиров, В.М. Емельянов, Н.А. Калужный, М.В. Нахимович, В.В. Олейник, Р.А. Салий, А.Ф. Скачков, Л.Н. Скачкова, М.З. Шварц. *Письма ЖТФ*, **51** (13), 40 (2025).
- [14] H. Lin, M. Yang, X. Ru, G. Wang, S. Yin, F. Peng, C. Hong, M. Qu, J. Lu, L. Fang, C. Han, P. Procel, O. Isabella, P. Gao, Z. Li, X. Xu. *Nature Energy*, **8**, 789 (2023). DOI: 10.1038/s41560-023-01255-2

Редактор Г.А. Оганесян

Hybrid multijunction solar cells based on bonding of A^{III}B^V and silicon materials

S.A. Mintairov, V.M. Emelyanov, N.A. Kalyuzhnyy, M.V. Nakhimovich, R.A. Salii, M.Z. Shvarts

Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract A study of various pairs of A^{III}B^V materials with an increased aluminum content in the photoactive layers of wide-bandgap subcells to form the structures of (Al)GaInP/(Al)GaAs/Si hybrid solar cells have been carried out. Calculations of the spectral characteristics of the external quantum efficiency of (Al)GaInP/(Al)GaAs/Si solar cells have been made in order to ensure the matching of photogenerated currents of the subcells. Predictive estimates were obtained for the efficiency of solar cells based on the proposed structures that ensure the efficient operation of devices when converting spectra: space (AM0, 1 sun) — $\text{GaInP}_2/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{Si}$ (33.5 %) and $(\text{Al}_{0.17}\text{Ga}_{0.83})\text{InP}_2/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{Si}$ (34.9 %); terrestrial (AM1.5D, 236 suns) — $\text{GaInP}_2/\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{As}/\text{Si}$ (~ 43.1 %) and $(\text{Al}_{0.14}\text{Ga}_{0.86})\text{InP}_2/\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{As}/\text{Si}$ (~ 44.1 %).