

07

Моделирование КПД гибридных каскадных солнечных элементов на основе бондинга AlGaInP/AlGaAs широкозонного тандема и кремния

© С.А. Минтаиров, В.М. Емельянов-Гирс, Н.А. Калужный, М.В. Нахимович, Р.А. Салий, М.З. Шварц

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: mintairov@scell.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 24 апреля 2026 г.

В окончательной редакции 3 июня 2026 г.

Принято к публикации 9 июня 2026 г.

Проведено исследование различных пар материалов A^3B^5 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 с целью обеспечения согласования фотогенерированных токов субэлементов. Получены прогнозные оценки для КПД солнечных элементов на основе структур, обеспечивающих эффективную работу приборов при преобразовании излучений: космического (AM0, 1 sun) — GaInP₂/Al_{0.1}Ga_{0.9}As/Si (33.5 %) и (Al_{0.17}Ga_{0.83})InP₂/Al_{0.1}Ga_{0.9}As/Si (34.9 %); наземного (AM1.5D, 236 suns) — GaInP₂/Al_{0.08}Ga_{0.92}As/Si (~ 43.1 %) и (Al_{0.14}Ga_{0.86})InP₂/Al_{0.08}Ga_{0.92}As/Si (~ 44.1 %).

Ключевые слова: многопереходный солнечный элемент, газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений, КПД, спектральная характеристика, математическое моделирование.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.19.63590.20744

Рассмотрим развитие и современное состояние фотоэлектрических преобразователей на основе соединений A^3B^5 . Во второй половине XX века прогресс в области эпитаксиальных методик позволил создать солнечные элементы (СЭ) на базе GaAs. Прежде всего это стало возможным благодаря развитию газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. Это дало старт масштабным разработкам фотопреобразователей на основе материалов группы A^3B^5 . Данные полупроводники отличаются высокой теоретической эффективностью преобразования, стабильностью характеристик при нагреве, устойчивостью к радиации и позволяют формировать каскадные структуры из нескольких p – n -переходов. На текущий момент для однопереходных СЭ достигнуты следующие показатели КПД: GaAs — 29.1 %, InP — 24.2 %, GaInP — 22 %, AlGaAs — 16.6 % [1].

Развитие многопереходных каскадных структур началось в 1990 г. с тандема GaInP/GaAs, показавшего эффективность преобразования 27 % (AM1.5D) [2]. К 2005 г. трехпереходные элементы на базе GaInP/GaAs/Ge достигли отметки 39.0 % [3]. К настоящему моменту на монокристаллических шестипереходных инвертированных метаморфных структурах, выращиваемых в одном эпитаксиальном процессе, продемонстрирована эффективность преобразования наземного солнечного спектра 47.1 % (AM1.5D, 143 suns) [4]. Для космического применения (спектр AM0) на данный момент лидируют пятипереходные СЭ с механической стыковкой (КПД 36.0 %) [5] и инвертированные монокристаллические структуры (КПД 33.7 %) [6].

Несмотря на эти рекорды, в массовом производстве преобладают трехпереходные монокристаллические системы на базе GaInP/Ga(In)As/Ge, согласованные по параметрам решетки. Их эффективность составляет около 40–41 % на Земле и 30–31 % в условиях космоса. Дальнейший рост КПД многопереходных СЭ связан с внедрением инновационных архитектур и технологий: использование метаморфных структур [7], применение механического соединения (стыковки) элементов [8], внедрение технологии прямого срачивания („бондинга“) полупроводниковых пластин [9].

Примером успешной реализации последнего метода является интеграция широкозонных тандемов GaInP/GaAs и GaInP/GaInAsP с кремниевым фотоэлементом, описанная в последних исследованиях [10,11]. Кроме того, актуальный рекорд для наземных многопереходных СЭ (спектр AM1.5D) получен посредством бондинга GaInP/AlGaAs СЭ, выращенного на подложке GaAs, и GaInAsP/GaInAs СЭ, выращенного на подложке InP. Такой четырехпереходный GaInP/AlGaAs//GaInAsP/GaInAs СЭ продемонстрировал КПД 47.6 % [12].

В настоящей работе проведено исследование различных пар материалов A^3B^5 широкозонного тандема для создания (Al)GaInP/(Al)GaAs/Si гибридных солнечных элементов (ГСЭ) с добавлением алюминия в верхний и нижний субэлементы. Проведены расчеты спектральных характеристик внешней квантовой эффективности (Al)GaInP/(Al)GaAs/Si ГСЭ с целью обеспечения согласования фотогенерированных токов (ФГТ) субэлементов и оценка КПД таких приборов.

SiO ₂	<i>Anti-reflection coating</i>	80 nm
TiO ₂		40 nm
<i>n</i> -AlInP ₂	<i>Window</i>	30 nm
<i>n</i> -(Al _x Ga _{1-x})InP ₂	<i>Emitter</i>	th _{AGIP}
<i>p</i> -(Al _x Ga _{1-x})InP ₂	<i>Base</i>	
<i>p</i> -(Al _{0.3} Ga _{0.7})InP ₂	<i>Back surface field</i>	50 nm
<i>p</i> ⁺⁺ -Al _{0.4} Ga _{0.6} As	<i>Tunnel junction</i>	15 nm
<i>n</i> ⁺⁺ -GaInP ₂		15 nm
<i>n</i> -AlInP ₂	<i>Window</i>	30 nm
<i>n</i> -GaInP ₂	<i>Window</i>	100 nm
<i>n</i> -Al _y Ga _{1-y} As	<i>Emitter</i>	th _{AGA}
<i>p</i> -Al _y Ga _{1-y} As	<i>Base</i>	
<i>p</i> -GaInP ₂	<i>Back surface field</i>	100 nm
<i>p</i> -Al _{0.3} Ga _{0.7} As		100 nm

Рис. 1. Послойная схема структуры верхнего тандема (Al)GaInP/(Al)GaAs, использованная при расчетах внешней квантовой эффективности ГСЭ. Цветной вариант рисунков представлен в электронной версии статьи.

Математическое моделирование спектральных характеристик тандема (Al)GaInP/(Al)GaAs и Si-субэлемента проводилось по методике, описанной в [13]. Как было показано в нашей работе [14], наиболее перспективными для создания высокоэффективных (Al)GaInP/(Al)GaAs//Si ГСЭ являются гетеропереходные кремневые СЭ Si-HJT (Silicon Heterojunction Technology [15]), преобразующие фотоны с длиной волны вплоть до 1200 nm. Спектральная характеристика такого кремневого СЭ и методика расчета внешней квантовой эффективности Si-субэлемента GaInP/GaAs//Si ГСЭ представлены в [14].

На рис. 1 приведено схематическое изображение структуры верхнего (Al)GaInP/(Al)GaAs тандемного СЭ. В расчетах считалось падение фотонов на поверхность из полубесконечной среды воздуха, при этом считался выход фотонов в полубесконечную среду кремния. В качестве просветляющего покрытия, уменьшающего отражение от структуры, использовались диэлектрические слои TiO₂/SiO₂. Общие толщины фотоактивных слоев (эмиттер и база) верхнего (Al)GaInP (th_{AGIP}) и среднего (Al)GaAs субэлементов (th_{AGA}) варьировались таким образом, чтобы обеспечить полное согласование субэлементов по ФГТ в (Al)GaInP/(Al)GaAs//Si ГСЭ.

Для космического спектра (AM0) такое согласование достигается при плотности ФГТ 15.26 mA/cm² (рис. 2, *a*), а для прямого наземного спектра (AM1.5D) — при 12.98 mA/cm² (рис. 2, *b*). В случае использования структуры GaInP/GaAs для широкозонного тандема (рис. 2, *a*, черные линии) согласование ФГТ для спектра

AM0 обеспечивается при толщинах верхнего и среднего субэлементов 340 nm (рис. 3, *a*) и 770 nm (рис. 3, *b*) соответственно. Проходя через атмосферу, солнечный спектр лишается значительной части коротковолновых фотонов, поэтому для согласования субэлементов под наземный спектр (рис. 2, *b*, черные линии) требуется заметное увеличение толщин фотоактивных слоев верхнего субэлемента — 540 nm (рис. 3, *a*); как следствие, требуется большая суммарная толщина фотоактивных слоев среднего субэлемента — 900 nm (рис. 3, *b*). При этом для обоих вариантов преобразуемых световых потоков (AM0 и AM1.5D) необходимо обеспечить прохождение заметной части фотонов с длиной волны в диапазоне 450 – 670 nm, которые возможно энергетически (в соответствии с шириной запрещенной зоны полупроводникового материала) преобразовать в верхнем субэlemente, в слой среднего субэлемента. Аналогичным образом развивается ситуация и для фотонов спектрального диапазона 600–900 nm, которые частично следует „пропустить“ (за счет подбора толщины слоев) в нижний субэлемент (рис. 2). 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 субэlementами, 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

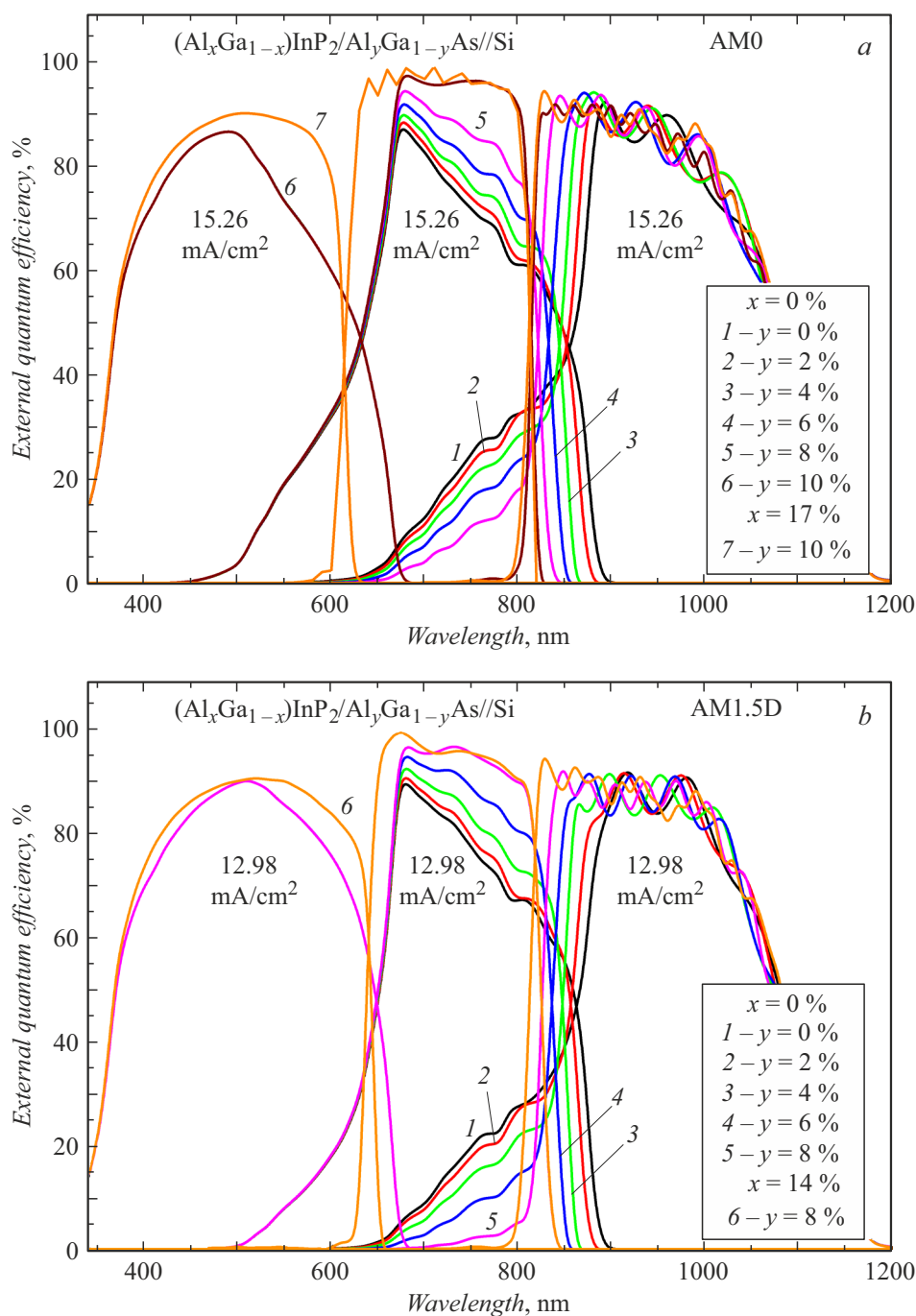


Рис. 2. Расчетные спектральные характеристики внешней квантовой эффективности для полностью согласованных по ФГТ $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})\text{InP}_2/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{Si}$ ГСЭ. *a* — для космического спектра AM0, *b* — для наземного спектра AM1.5D.

большого количества фотонов с длиной волны более 900 nm в нижний (Si) субэлемент (рис. 2). При этом общий фототок ГСЭ не изменяется до определенной концентрации алюминия в AlGaAs, так как происходит всего лишь перераспределение фотонов между AlGaAs- и Si-субэлементами. Поэтому общий ФГТ и ФГТ субэлементов остаются постоянными вплоть до концентрации алюминия в слоях AlGaAs 10 % для спектра AM0 и вплоть до 8 % для спектра AM1.5D (рис. 4, *a*). По этой

же причине нет необходимости изменять толщину верхнего GaInP-субэлемента в этих диапазонах концентрации алюминия (рис. 3, *a*). При этом толщину фотоактивных слоев среднего субэлемента следует увеличивать одновременно с повышением концентрации алюминия ввиду длинноволнового сдвига края фоточувствительности и необходимости поглощения большего количества длинноволновых фотонов (рис. 3, *b*). Важно отметить, что увеличение толщины фотоактивных слоев может

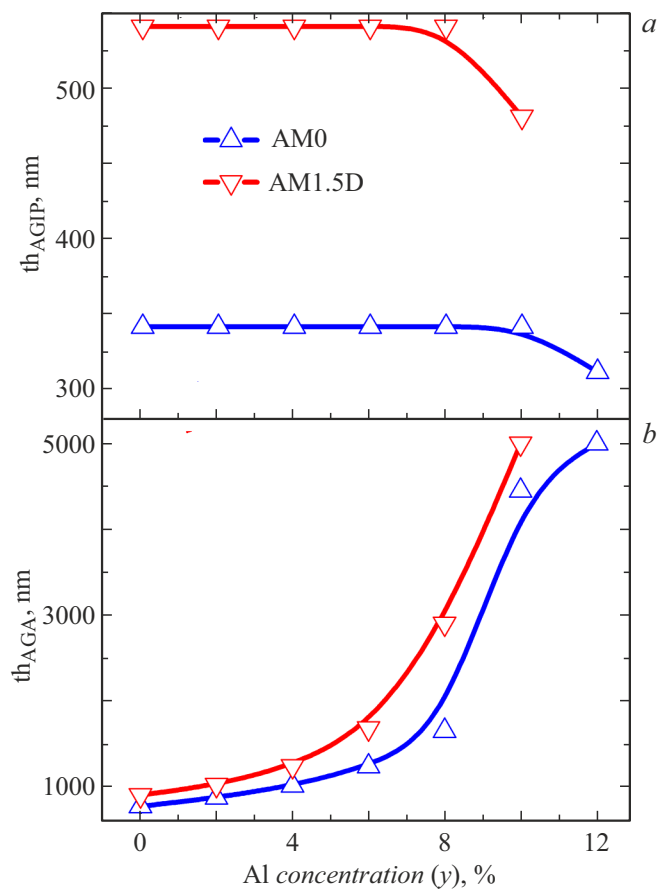


Рис. 3. Зависимости толщин фотоактивных слоев (*a* — верхнего (GaInP) субэлемента, *b* — среднего (AlGaAs) субэлемента GaInP₂/AlGaAs//Si ГСЭ), при которых обеспечивается полное согласование ФГТ для спектров AM0 (синие линии и символы) и AM1.5D (красные линии и символы), от концентрации алюминия в слоях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

негативно сказываться на радиационной стойкости ГСЭ в условиях космоса. Этот фактор необходимо учитывать при проектировании ГСЭ космического назначения. 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 при содержании алюминия 12 и 10% для спектров AM0 и AM1.5D соответственно толщину фотоактивных слоев верхнего субэлемента следует уменьшить (рис. 3).

Подобные расчеты были проведены также для верхнего субэлемента с добавлением алюминия в случае использования среднего субэлемента на основе Al_{0.1}Ga_{0.9}As для спектра AM0 и на основе Al_{0.08}Ga_{0.92}As для спектра AM1.5D. Предельная концентрация алюминия в слоях AlGaInP, при которой возможно согласование ФГТ субэлементов, составила

17% для спектра AM0 (рис. 2, *a*, оранжевые линии) и 14% для спектра AM1.5D (рис. 2, *b*, оранжевые линии). Таким образом, были определены оптимальные конструкции ГСЭ для космического и наземного спектров: (Al_{0.17}Ga_{0.83})InP₂/Al_{0.1}Ga_{0.9}As//Si (AM0) и (Al_{0.14}Ga_{0.86})InP₂/Al_{0.08}Ga_{0.92}As//Si (AM1.5D).

Оценка КПД предложенных конструкций проводилась по методике, описанной в нашей предыдущей работе [14]. Она основана на том, что КПД СЭ прямо пропорционален произведению ФГТ, фактора заполнения вольт-амперной характеристики (FF) и напряжения холостого хода (V_{oc}). В качестве реперных образцов были взяты трехпереходные GaInP/Ga(In)As/Ge СЭ: $V_{oc} = 2.69$ В, ФГТ 16.75 мА/см², КПД 29.4% (AM0, 1 sun) [14] и $V_{oc} = 3.09$ В, ФГТ 14.3 мА/см², КПД 39.0% (AM1.5D, 236 suns) [3]. Для оценки КПД использовались значения ФГТ, полученные из расчетов (рис. 4, *a*), 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 GaInP/Ga(In)As на GaInP/GaAs обеспечивает дополнительную прибавку напряжения на 40 мВ [14], а прибавка напряжения за счет введения алюминия

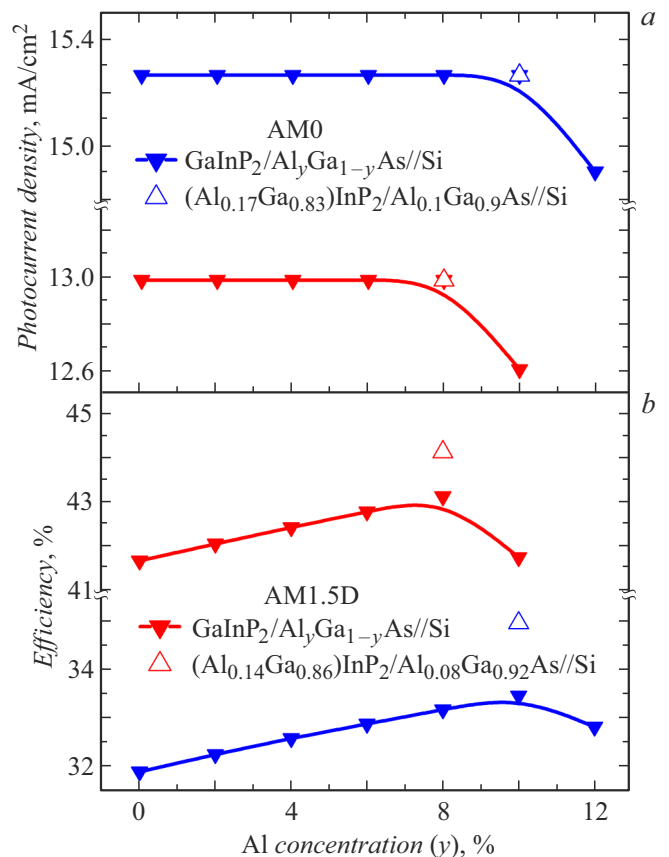


Рис. 4. Зависимости ФГТ (*a*) и КПД (*b*) (Al_xGa_{1-x})InP₂/Al_yGa_{1-y}As//Si ГСЭ для спектров AM0 (синие линии и символы) и AM1.5D (красные линии и символы) от концентрации алюминия в слоях AlGaAs.

равна разнице ширин запрещенной зоны. Таким образом, прогнозируемое значение V_{oc} (Al)GaInP/(Al)GaAs//Si ГСЭ варьировалось от 3.24 V (GaInP/GaAs//Si) до 3.52 V ((Al_{0.17}Ga_{0.83})InP₂/Al_{0.1}Ga_{0.9}As//Si) для спектра AM0 и от 3.63 V (GaInP/GaAs//Si) до 3.85 V ((Al_{0.14}Ga_{0.86})InP₂/Al_{0.08}Ga_{0.92}As//Si) для спектра AM1.5D. При расчетах FF считался неизменным (как у реперных образцов), что скорее давало оценку КПД снизу, так как обычно и уменьшение ФГТ, и увеличение V_{oc} приводят к возрастанию FF .

Проведенные расчеты (рис. 4, b) позволяют прогнозировать КПД GaInP₂/Al_{0.1}Ga_{0.9}As//Si ГСЭ на уровне $\sim 33.5\%$ (AM0, 1 sun), GaInP₂/Al_{0.08}Ga_{0.92}As//Si ГСЭ $\sim 43.1\%$ (AM1.5D, 236 suns), (Al_{0.17}Ga_{0.83})InP₂/Al_{0.1}Ga_{0.9}As//Si $\sim 34.9\%$ (AM0, 1 sun) и (Al_{0.14}Ga_{0.86})InP₂/Al_{0.08}Ga_{0.92}As//Si $\sim 44.1\%$ (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, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, **28** (7), 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, in *20th Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf. and Exhibition* (Barcelona, Spain, 2005), p. 118.
- [4] J.F. Geisz, R.M. France, K.L. Schulte, M.A. Steiner, A.G. Norman, H.L. Guthrey, M.R. Young, T. Song, T. Moriarty, *Nat. Energy*, **5**, 326 (2020). DOI: 10.1038/s41560-020-0598-5
- [5] W. Zhang, G. Li, H. Lu, X. Li, R. Lei, Q. Yang, M. Zhang, G. Xu, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, **33** (10), 1068 (2025). DOI: 10.1002/pip.70010
- [6] P. Patel, D. Aiken, D. Chumney, A. Cornfeld, Y. Lin, C. Mackos, M. Stan, in *2012 IEEE 38th Photovoltaic Specialists Conf. (PVSC)* (IEEE, 2012), part 2, p. 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. Horng, *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. Tibbits, E. Oliva, G. Siefert, M. Schachtner, A. Wekkeli, A.W. Bett, R. Krause, M. Piccin, N. Blanc, C. Drazek, E. Guiot, B. Ghyselen, T. Salvetat, A. Tauzin, T. Signamarcheix, A. Dobrich, T. Hannappel, K. Schwarzburg, *Prog. 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.W. Glunz, F. Dimroth, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, **30** (8), 869 (2022). DOI: 10.1002/pip.3503
- [11] P. Schygulla, R. Müller, O. Höhn, M. Schachtner, D. Chojniak, A. Cordaro, S. Tabernig, B. Bläsi, A. Polman, G. Siefert, D. Lackner, F. Dimroth, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, **33** (1), 100 (2025). DOI: 10.1002/pip.3769
- [12] O. Höhn, P. Schygulla, M. Klitzke, D. Lackner, J. Schön, E. Oliva, M. Schachtner, G. Siefert, H. Helmers, F. Dimroth, in *2024 IEEE 52nd Photovoltaic Specialist Conf. (PVSC)* (IEEE, 2024), p. 0117. DOI: 10.1109/PVSC57443.2024.10749407
- [13] С.А. Минтаиров, В.М. Андреев, В.М. Емельянов, Н.А. Калюжный, Н.К. Тимошина, М.З. Шварц, В.М. Лантратов, *ФТП*, **44** (8), 1118 (2010). [S.A. Mintairov, V.M. Andreev, V.M. Emelyanov, N.A. Kalyuzhnyy, N.K. Timoshina, M.Z. Shvarts, V.M. Lantratov, *Semiconductors*, **44** (8), 1084 (2010). DOI: 10.1134/S1063782610080233]
- [14] С.А. Минтаиров, В.М. Емельянов, Н.А. Калюжный, М.В. Нахимович, В.В. Олейник, Р.А. Салий, А.Ф. Скачков, Л.Н. Скачкова, М.З. Шварц, *Письма в ЖТФ*, **51** (13), 40 (2025). DOI: 10.61011/PJTF.2025.13.60703.20295 [S.A. Mintairov, V.M. Emelyanov, N.A. Kalyuzhnyy, M.V. Nakhimovich, V.V. Oleynik, R.A. Salii, A.F. Skachkov, L.N. Skachkova, M.Z. Shvarts, *Tech. Phys. Lett.*, **51** (7), 37 (2025). DOI: 10.61011/TPL.2025.07.61428.20295]
- [15] 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, *Nat. Energy*, **8**, 789 (2023). DOI: 10.1038/s41560-023-01255-2