

УДК 629.7.064.5

EDN: QSXAUT DOI: 10.31429/vestnik-22-3-51-55

Получение и исследование одно- и двухпереходных моделей рабочих переходов трёхкаскадных солнечных элементов

К. С. Дубинина^{1,2,3}✉, Л. Н. Скачкова¹

¹ АО «Сатурн», ул. Солнечная, 6, Краснодар, 350072, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия

³ Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, 149, Краснодар, 350040, Россия

✉ Дубинина Кристина Сергеевна; ORCID 0009-0004-7135-4030; e-mail: DubininaKk@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрен метод исследования отдельных субэлементов в многокаскадном солнечном элементе. Получены одно- и двухпереходные солнечные элементы с рабочими переходами, соответствующими переходам трёхкаскадного солнечного элемента со структурой GaInP/GaAs/Ge, выращенного методом МОС-гидридной эпитаксии. Измерены вольтамперные характеристики, а также спектральные характеристики внешней квантовой эффективности. Выяснено, что спектральная чувствительность перехода GaAs для двухкаскадного перехода в коротковолновой области оказывается выше по сравнению с трёхкаскадным СЭ. Явление, выявленное в результате анализа полученных данных, требует дальнейшего исследования.

Ключевые слова: многокаскадный солнечный элемент, МОС-гидридная эпитаксия, вольтамперная характеристика, внешняя квантовая эффективность, плотность тока короткого замыкания.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Цитирование: Дубинина К. С., Скачкова Л. Н. Получение и исследование одно- и двухпереходных моделей рабочих переходов трёхкаскадных солнечных элементов // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2025. Т. 22, № 3. С. 51–55. EDN: QSXAUT. DOI: 10.31429/vestnik-22-3-51-55

Поступила 29 мая 2025 г. После доработки 12 июля 2025 г. Принято 12 августа 2025 г. Публикация 22 сентября 2025 г.

Авторы внесли одинаковый вклад в подготовку рукописи. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Автор(ы), 2025. Статья открытого доступа, распространяется по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Obtaining And Studying One- and Two-Junction Models of Three-Stage Solar Cell Work Transitions

K. S. Dubinina^{1,2,3}✉, L. N. Skachkova¹

¹ Saturn JSC, Solnechnaya str., 6, Krasnodar, 350072, Russia

² Ioffe Institute, Politekhnikeskaya st., 26, St. Petersburg, 194021, Russia

³ Kuban State University, Stavropolskaya St., 149, Krasnodar, 350040, Russia

✉ Kristina S. Dubinina; ORCID 0009-0004-7135-4030; e-mail: DubininaKk@yandex.ru

Abstract. A method for studying individual subcells in a multi-junction solar cell is considered. Single- and double-junction solar cells with operating junctions corresponding to those of a triple-junction solar cell with a GaInP/GaAs/Ge structure grown by the MOCVD method have been obtained. The current-voltage characteristics, as well as the spectral characteristics of the external quantum efficiency, were measured. It was found that the spectral sensitivity of the GaAs junction for a two-junction solar cell in the shortwave region is higher than for a three-junction solar cell. The phenomenon revealed as a result of the analysis of the obtained data requires further investigation.

Keywords: multi-junction solar cell, metalorganic vapour-phase epitaxy, current-voltage characteristic, external quantum efficiency, short-circuit current density.

Funding. The study did not have sponsorship.

Cite as: Dubinina, K. S., Skachkova, L. N., Obtaining and studying one- and two-junction models of three-stage solar cell work transitions. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2025, vol. 22, no. 3, pp. 51–55. DOI: 10.31429/vestnik-22-3-51-55

Received 29 May 2025. Revised 12 July 2025. Accepted 12 August 2025. Published 22 September 2025.

The authors contributed equally. The authors declare no competing interests.

© The Author(s), 2025. The article is open access, distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\) license](#).

Введение

Солнечное излучение на сегодняшний день является основным источником энергии летательных космических аппаратов (КА).

Базовыми компонентами современных систем электропитания (СЭП) КА выступают трёхкаскадные солнечные элементы на основе твёрдых растворов A^3B^5 . Повышение их коэффициента полезного действия (КПД) и улучшение устойчивости к воздействию факторов космического пространства (ФКП) представляют собой приоритетные задачи в области космической энергетики. Решение данных задач позволит разрабатывать и создавать КА с расширенным функционалом и увеличенным сроком активного существования (САС) [1].

На данный момент КПД трёхкаскадных солнечных элементов $GaInP/GaAs/Ge$ на основе твёрдых растворов A^3B^5 с согласованной кристаллической решёткой может достигать 30 % (при освещённости 1367 Вт/м^2 и стандартном спектре AM0). Такие солнечные элементы представляют структуру, включающую три последовательно соединённых p-n-перехода, электрическая развязка между которыми осуществляется при помощи встречно включённых туннельных диодов. Каждый каскад характеризуется своей шириной запрещённой зоны и отвечает за преобразование энергии в определённом спектральном диапазоне солнечного излучения [2, 3].

Для СЭ с градиентным метаморфным буфером эффективность может достигать 32 % (при освещённости 1367 Вт/м^2 и стандартном спектре AM0) [4].

Структуры многопереходных СЭ получают методом МОС-гидридной газофазной эпитаксии, последовательно осаждая десятки различных согласованных по параметрам кристаллической решётки слоёв на подложку Ge. Для повышения значений КПД и приближения его к теоретическому пределу выполняют моделирование и оптимизацию конструкции СЭ, выявляют физические причины, снижающие эффективность преобразования солнечной энергии [5].

Увеличение эффективности многокаскадных СЭ в условиях эксплуатации достигается за счёт оптимизации их структурных параметров. В частности, для повышения радиационной стойкости трёхкаскадных СЭ уменьшается толщина среднего каскада, поскольку именно в нём наблюдается повышенное накопление дефектов под действием протонной и электронной составляющих космического излучения [6]. Для компенсации снижения плотности тока в среднем переходе в структуру трёхкаскадного СЭ вводится распределённый брэгговский отражатель, способствующий улучшению оптических характеристик и выравниванию токовых параметров каскадов [7].

Ещё одним методом повышения эффективности многопереходных СЭ является дальнейшее увеличение количества каскадов. При этом трудность при изготовлении эпитаксиальных структур с числом переходов более трёх заключается в необходимости подбора материалов с сопоставимыми значениями кристаллической решётки для обеспечения минимизации дефектов и сохранения высокого качества кристаллической структуры [8]. Кроме того, важным аспектом является возможность исследования каждого из переходов в отдельности.

1. Исследование отдельных переходов многокаскадного СЭ

Одной из трудностей исследования и оптимизации многопереходной монокристаллической структуры является последовательное включение переходов, что делает затруднительным получение вольтамперных характеристик для каждого перехода в отдельности. Однако только исследование каждого перехода в отдельности позволит более эффективно усовершенствовать структуру многопереходного СЭ, улучшить согласование субэлементов по плотности тока короткого замыкания. Одним из путей решения данной проблемы является получение однокаскадных и двухкаскадных СЭ, имитирующих отдельные переходы в трёхкаскадном СЭ.

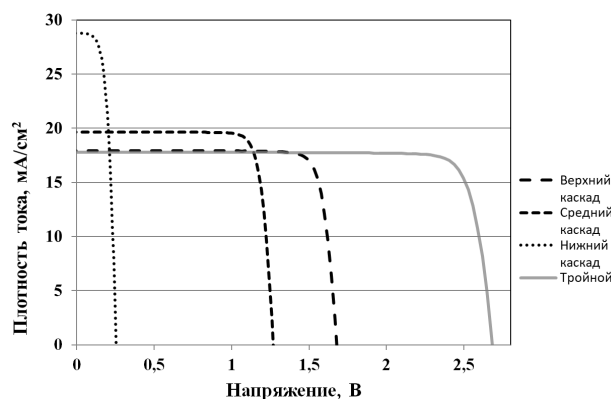


Рис. 1. Графики измеренных вольт-амперных характеристик

Fig. 1. Graphs of measured volt-ampere characteristics

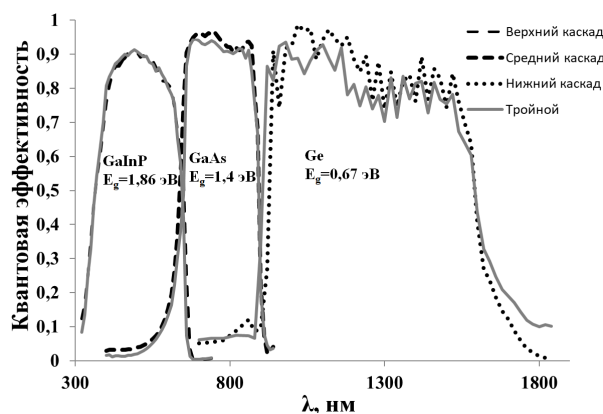


Рис. 2. Спектральные зависимости внешней квантовой эффективности

Fig. 2. Spectral dependences of external quantum efficiency

С данной целью были получены образцы однокаскадных СЭ с германиевым переходом и двухкаскадных СЭ со структурами GaInP/Ge и GaAs/Ge, выращенных на основе соединений A^3B^5 методом МОС-гидридной газофазной эпитаксии на германиевой подложке. Эпитаксиальный рост осуществлялся на подложках Ge р-типа в атмосфере сверхчистого водорода с содержанием посторонних примесей меньше 1 ppb при температуре 700 °С и давлении в индуктивно нагреваемом реакторе 50 мбар. В качестве прекурсоров III группы использовались TMGa, TMIn, TMAI, в качестве прекурсоров V группы выступали AsH₃ и PH₃.

Для выращенных образцов были измерены вольт-амперные характеристики под имитатором солнечного излучения при спектре AM0, облученности 1367 ± 7 Вт/м² и температуре 28 °С. Были определены электрические параметры, характеризующие работу СЭ: напряжение холостого хода, ток короткого замыкания, мощность, напряжение и ток в точке максимальной мощности, эффективность. На рис. 1 показаны вольт-амперные характеристики, соответствующие отдельным каскадам в многокаскадном СЭ. Для сравнения приведена ВАХ монокристаллического трёхкаскадного СЭ.

Также было проведено измерение спектральных характеристик внешней квантовой эффективности рабочих переходов двухкаскадного и однокаскадного СЭ. На рис. 2 показаны полученные зависимости. Кроме того, для сравнения приведена спектральная характеристика внешней квантовой эффективности трёхкаскадного СЭ.

Из полученных данных видно, что параметры однокаскадных и двухкаскадных СЭ хорошо совпадают с параметрами соответствующих переходов в трёхкаскадном СЭ. Спектральные

Таблица 1. Расчётные значения плотностей токов средних каскадов в коротковолновом диапазоне

Table 1. Calculated values of current densities of middle stages in the shortwave range

Тип СЭ	J_{GaAs} , мА/см ² (400–700 нм)
Двухкаскадный	6,250
Трёхкаскадный	5,463

Таблица 2. Расчётные значения плотностей токов короткого замыкания отдельных каскадов

Table 2. Calculated values of short-circuit current densities of individual cascades

Тип СЭ	J_{GaInP} , мА/см ²	J_{GaAs} , мА/см ²	J_{Ge} , мА/см ²
Однокаскадный/двухкаскадный	17,790	19,607	28,127
Трёхкаскадный	17,592	18,509	28,242

характеристики внешней квантовой эффективности позволяют произвести расчёт плотности тока короткого замыкания для каждого перехода в отдельности согласно формуле

$$J_{sc} = e \int_0^{\infty} EQE(\lambda) \Phi_{inc}(\lambda) d\lambda. \quad (1.1)$$

Здесь, J_{sc} — плотность тока короткого замыкания перехода, $EQE(\lambda)$ — внешний квантовый выход данного субэлемента, $\Phi_{inc}(\lambda)$ — поток излучения, падающий на солнечный элемент, λ — длина волны падающего фотона, e — элементарный заряд [9, 10].

В табл. 2 показаны полученные плотности тока для однокаскадных и двухкаскадных СЭ, а также в качестве референсных значений приведены плотности токов для каждого перехода в трёхкаскадном СЭ.

Из табл. 2 видно, что плотность тока короткого замыкания трёхкаскадного СЭ ограничивается верхним переходом. Плотность тока короткого замыкания двухкаскадного СЭ, с рабочим переходом соответствующим верхнему переходу в трёхкаскадном СЭ, выполненному на основе GaInP, также является минимальной. Кроме того, суммарное напряжение холостого хода двухкаскадных СЭ и однокаскадного СЭ (за вычетом напряжений, соответствующих германиевым переходам двухкаскадных СЭ) соответствует напряжению холостого хода трёхкаскадного СЭ, что позволяет использовать данный метод для исследования отдельных переходов в трёхкаскадном СЭ.

Необходимо отметить, что спектральная чувствительность перехода GaAs для двухкаскадного СЭ в коротковолновой области оказывается выше по сравнению с трёхкаскадным СЭ. Предположительно, данное явление связано с тем, что в структуре двухкаскадного СЭ все слои, лежащие выше широкозонного окна перехода GaAs, легируются донорной примесью (Si) и становятся частью эмиттера среднего перехода. Это можно показать, рассчитав плотность тока среднего перехода в коротковолновой области по формуле (1.1) в диапазоне от 400 до 700 нм (область наложения спектральных характеристик верхнего и среднего переходов). Соответствующие расчёты приведены в табл. 1.

Следовательно, большая чувствительность в коротковолновой области является следствием большего поглощения в эмиттере перехода GaAs, что следует учитывать при выращивании и исследовании среднего перехода.

Заключение

В работе рассмотрен метод исследования ВАХ и спектральных характеристик внешней квантовой эффективности для отдельных переходов многокаскадных солнечных элементов путём использования одно- и двухпереходных солнечных элементов. Установлено, что электрические параметры данных элементов хорошо согласуются с отдельными переходами в трёхкаскадном солнечном элементе. Обнаружено, что спектральная чувствительность перехода GaAs для

двухкаскадного СЭ оказывается выше в коротковолновой области по сравнению с переходом GaAs в трёхкаскадном СЭ в связи с увеличением толщины эмиттера.

Литература [References]

1. Скачков, А.Ф., Нестеренко, И.И., Скачкова, Л.Н., Кулевой, Т.В., Столбунов, В.С., Влияние облучения потоками протонов на электрические параметры трехкаскадного солнечного элемента GaInP/GaAs/Ge. *Материалы всерос. научно-тех. конф. «Радиационная стойкость электронных систем “Стойкость-2019”*», 2019, № 22, с. 47–48. [Skachkov, A.F., Nesterenko, I.I., Kulevov, T.V., Stolbunov, V.S., The effect of radiation by proton fluxes on the electrical parameters of a GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cell. *Materialy vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Radiatsionnaya stoikost elektronnykh sistem ‘Stoikost-2019’” = Proc. of the All-Russian Scientific-Technical Conf. “Radiation Resistance of Electronic Systems ‘Resistance-2019’*”, 2019, no. 22, pp. 47–48. (in Russian)]
2. Philips, S.P., Dimroth, F., Bett, A.W., High-efficiency III–V multijunction solar cells. *Practical handbook of photovoltaics*, 2013, pp. 417–440. DOI: [10.1016/b978-0-12-385934-1.00013-1](https://doi.org/10.1016/b978-0-12-385934-1.00013-1)
3. Kawabata, R.M.S., Costa, E.W., Pinto, L.D., Jakomin, Pires, R.M.P., Micha, D.N., Souza, P.L., III-V Solar Cells. *Journal of integrated circuits and systems*, 2022, no. 2, pp.1–10. DOI: [10.29292/jics.v17i2.618](https://doi.org/10.29292/jics.v17i2.618)
4. Geisz, J.F., Kurtz, S.R., Wanlass, M.W., Ward, J.S., Duda, A., Friedman, D.J., Olson, J.M., McMahon, W.E., Moriarty, T.E., Kiehl, J.T., Romero, M.J., Norman, A.G., Jones, K.M., Inverted GaInP/(In)GaAs/InGaAs Triple-junction solar cells with low-stress metamorphic bottom junctions. *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2008, pp. 1–5. DOI: [10.1109/PVSC.2008.4922452](https://doi.org/10.1109/PVSC.2008.4922452)
5. Богатов, Н.М., Нестеренко, И.И., Скачков А.Ф., О проблемах создания четырёхкаскадных солнечных элементов с согласованной кристаллической решёткой. *Экологический вестник научных центров Черноморского экологического сотрудничества*, 2017, №4, с. 74–80. [Bogatov, N.M., Nesterenko, I.I., Skachkov A.F., On the problems of creating four cascade solar cells with a consistent crystal lattice. *Ekologicheskiy vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva = Ecological Bulletin of Scientific Centers of the Black Sea Environmental Cooperation*, 2017, no. 4, pp. 74–80. (in Russian)] EDN: ZXPYNT
6. Дубинина, К.С., Скачкова, Л.Н., Олейник, В.В., Скачков, А.Ф., О результатах испытаний трёхкаскадных солнечных элементов GaInP/GaAs/Ge, изготовленных на германиевой подложке отечественного производства, на воздействие потоками протонов с энергией 20 МэВ. *Тезисы докладов 26-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем “Стойкость-2023”*», 2023, № 26, с. 27–28. [Dubinina, K.S., Skachkova, L.N., Oleynik, V.V., Skachkov, A.F., On the test results of triple-junction GaInP/GaAs/Ge solar cells made on a domestic germanium substrate for exposure to proton fluxes with an energy of 20 MeV. *Tezisy докладov 26-y Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Radiatsionnaya stoikost’ elektronnykh sistem ‘Stoikost’-2023’” = Proc. of the 26th All-Russian Scientific and Technical Conf. “Radiation Resistance of Electronic Systems ‘Resistance-2023’*”, 2023, no. 26, pp. 27–28. (in Russian)]
7. Skachkov, A.F., Optimization of the structure of a GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cell with an $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ integrated bragg reflector. *Avtometriya*, 2014, no.4, pp. 122–126. DOI: [10.3103/S8756699014040165](https://doi.org/10.3103/S8756699014040165)
8. Скачков, А.Ф., Нестеренко, И.И., О разработке четырехкаскадных солнечных элементов с согласованной кристаллической решеткой. *Материалы молодежной конф. «Новые материалы и технологии в ракетно-космической и авиационной технике»*, 2016, №13, с. 178–181. [Skachkov, A.F., Nesterenko, I.I., On the development of four-junction solar cells with a matched crystal lattice. *Materialy molodozhnoy konferentsii “Novye materialy i tehnologii v raketno-kosmicheskoy i aviatsionnoy tekhnike” = Proc. of the youth conference “New materials and technologies in rocket, space and aviation engineering”*, 2016, no. 13, pp. 178–181. (in Russian)]
9. Olson, J.M., Friedman, D.J., Kurtz, S., High-efficiency III–V multijunction solar cells. *Handbook of photovoltaic science and engineering*, 2003, pp. 359–411. DOI: [10.1016/B978-0-12-385934-1.00013-1](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385934-1.00013-1)
10. Скачкова, Л.Н., Дубинина, К.С., Нестеренко, А.В., Малышева Н.Г., О методах анализа электрических параметров солнечных элементов. *Сборник тезисов V научно-технической конференции «Космическая энергетика 2024»*, 2024, № 5, с. 33–35. [Skachkova, L.N., Dubinina K. S., Nesterenko, A.V., Malysheva, N.G., About the methods of analyzing the electrical parameters of solar cells. *Sbornik tezisov V nayshno-tehnicheskoy konferentsii “Kosmicheskaya energetika 2024” = Collection of abstracts of the V scientific and technical conference “Space Energy 2024”*, 2024, no. 5, pp. 33–35. (in Russian)]