

УДК 629.7.064.56

EDN: MSVOER DOI: 10.31429/vestnik-23-2-77-84

Создание эталонного солнечного элемента для датчика контроля условий измерений: оптимизация двухслойного просветляющего покрытия

К. С. Дубинина [✉], Л. Н. Скачкова, А. В. Нестеренко

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

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

Аннотация. Предложен метод создания эталонного солнечного (СЭ) элемента для датчика контроля условий измерений на основе трёхкаскадного СЭ. Целью данной работы является получение эталонного СЭ с первоначальной согласованной по плотностям токов верхнего и среднего каскадов структурой GaInP/GaAs/Ge. Путём оптимизации толщин слоёв двухслойного просветляющего покрытия были получены семь образцов, для каждого из которых были измерены спектры отражения, а также спектральные характеристики внешней квантовой эффективности. Были определены толщины слоёв просветляющего покрытия TiO₂/Al₂O₃, при которых СЭ удовлетворяет требованиям, предъявляемым к эталонным СЭ на основе трёхкаскадных структур. Выявлено влияние на характеристики СЭ толщин слоёв TiO₂ и Al₂O₃.

Ключевые слова: многопереходный солнечный элемент, эталонный солнечный элемент, датчик контроля условий измерений, просветляющее покрытие.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Цитирование: Дубинина К. С., Скачкова Л. Н., Нестеренко А. В. Создание эталонного солнечного элемента для датчика контроля условий измерений: оптимизация двухслойного просветляющего покрытия // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2026. Т. 23, № 2. С. 77–84. EDN: MSVOER. DOI: 10.31429/vestnik-23-2-77-84

Поступила 20 марта 2026 г. После доработки 25 мая 2026 г. Принято 1 июня 2026 г. Публикация 24 июня 2026 г.

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

© Автор(ы), 2026. Статья открытого доступа, распространяется по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Creation of a Reference Solar Cell for a Sensor Monitoring Measurement Conditions: Optimization of a Two-Layer Antireflection Coating

К. S. Dubinina [✉], L. N. Skachkova, A. V. Nesterenko

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

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

Abstract. A method for creating a reference solar cell (SC) for a sensor for monitoring measurement conditions based on a triple-junction SC is proposed. The purpose of this work is to obtain a reference SC with an initial GaInP/GaAs/Ge structure consistent with the current densities of the upper and middle junctions. By optimizing the thicknesses of the layers of the two-layer antireflection coating, seven samples were obtained, for each of which the reflection spectra were measured, as well as the spectral characteristics of the external quantum efficiency. The thicknesses of the TiO₂/Al₂O₃ antireflection coating layers were determined, at which the SC meets the requirements for reference SC based on triple-junction structure. The influence of TiO₂ and Al₂O₃ layer thicknesses on the SC characteristics has been revealed.

Keywords: multi-junction solar cell, reference solar cell, sensor for monitoring measurement conditions, antireflection coating.

Funding. The study did not have sponsorship.

Cite as: Dubinina, K. S., Skachkova, L. N., Nesterenko, A. V., Creation of a reference solar cell for a sensor monitoring measurement conditions: optimization of a two-layer antireflection coating. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2026, vol. 23, no. 2, pp. 77–84. DOI: 10.31429/vestnik-23-2-77-84

Received 20 March 2026. Revised 25 May 2026. Accepted 1 June 2026. Published 24 June 2026.

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

© The Author(s), 2026. The article is open access, distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) license.

Введение

Наибольшей эффективностью в совокупности с радиационной стойкостью обладают многопереходные солнечные элементы (СЭ) на основе твёрдых растворов A^3B^5 со структурой GaInP/GaAs/Ge. Данная структура выращивается при помощи газофазной эпитаксии при использовании металлоорганических соединений [1].

Многокаскадные высокоэффективные СЭ представляют собой многослойные структуры, состоящие из десятков согласованных по параметрам кристаллической решётки слоёв разной толщины, осаждённых на подложку Ge [2]. Отмечается, что эффективность трёхкаскадных СЭ с согласованной структурой GaInP/GaAs/Ge достигает 30 % (при освещённости 1367 Вт/м² и стандартном спектре АМ0) [3].

При этом в современных условиях продолжают повышаться требования к эффективности и срокам активного существования космических аппаратов, оснащённых солнечными батареями на основе многопереходных СЭ [4].

Увеличение радиационной стойкости трёхкаскадных СЭ достигается путём уменьшения толщины среднего каскада (так как в нём накапливается большее количество дефектов при облучении высокоэнергетичными частицами) и встраивания в структуру распределённого брэгговского отражателя для компенсации уменьшения тока за счёт меньшей толщины среднего перехода.

Основными подходами к увеличению эффективности многокаскадных СЭ космического назначения является увеличение количества каскадов в многопереходных СЭ, внедрение в структуру СЭ квантовых точек [2]. Внедрение в структуру GaInP/GaAs/Ge квантовых ям на основе InGaAs позволяет увеличить КПД, а также радиационную стойкость СЭ [5]. Ещё одним подходом к увеличению эффективности многопереходных СЭ является использование метаморфного буфера, который позволяет избежать необходимости подбора материалов с одинаковыми постоянными кристаллических решёток для каждого перехода [6]. Данные методы на сегодняшний день активно исследуются [7].

1. Имитаторы солнечного излучения и эталонные солнечные элементы

Для измерения вольтамперных характеристик и определения эффективности СЭ в лабораторных условиях используются имитаторы солнечного излучения (ИСИ) различных конструкций. При выполнении измерений вольтамперных характеристик (ВАХ) СЭ космического назначения к спектру ИСИ предъявляются высокие требования: спектр должен соответствовать стандартному спектру АМ0. Данный спектр предусматривает соответствие облучённости, создаваемой в рабочей области ИСИ, солнечной постоянной (1367 Вт/м²).

Для обеспечения высокой точности измерений ИСИ должен как можно более точно воспроизводить стандартные параметры солнечного излучения. Поэтому требования предъявляются к плотности потока, спектральному и угловому распределению энергии, однородности и стабильности потока излучения, который воспроизводится ИСИ.

ИСИ делятся на три класса: А, В и С, в зависимости от спектрального несоответствия, равномерности излучения и стабильности во времени. Под спектральным несоответствием понимается количественная характеристика расхождения между спектральным распределением энергетической освещённости ИСИ и эталонного спектра естественного солнечного излучения [8].

Для настройки энергетической освещённости в рабочей зоне имитаторов солнечного излучения используются эталонные солнечные элементы, прошедшие градуировку [9].

В случае использования в качестве эталонных солнечных элементов трёхкаскадных СЭ важным аспектом является соотношение плотностей токов отдельных каскадов. Важно учесть, что даже при использовании ИСИ, воспроизводящего спектр класса А+, могут сохраняться значительные эффекты спектрального несоответствия [10].

А поскольку эталонный солнечный элемент чувствителен к спектральному составу излучения, что приводит к вариациям тока короткого замыкания и внешней квантовой эффективности, необходимо подобрать такое соотношение плотностей токов каскадов в многопереходном

эталонном СЭ, чтобы минимизировать зависимость тока от спектральных вариаций имитаторов солнечного излучения [11].

Таким образом, для достижения воспроизводимости результатов испытаний фотоэлектрических преобразователей необходимо обеспечить максимальную идентичность показаний эталонных солнечных элементов, используемых при настройке источников солнечного излучения ИСИ.

В работе [12] рассматриваются результаты межлабораторного исследования, заключавшегося в калибровке эталонных солнечных элементов в девяти аккредитованных лабораториях, для чего использовались ИСИ различных конструкций, а также прямое солнечное излучение.

Полученные данные демонстрируют хорошую сходимость результатов измерения ВАХ и спектральных характеристик эталонных солнечных элементов, что подтверждает высокую воспроизводимость методик калибровки при использовании элементов с корректной спектральной зависимостью внешней квантовой эффективности [12].

В качестве эталонных СЭ для настройки ИСИ, на которых производятся измерения электрофизических параметров многопереходных СЭ, применяются, как правило, трёхкаскадные СЭ, из которых изготавливаются датчики контроля условий измерений (ДКУИ).

Для изготовления ДКУИ должен использоваться СЭ, плотность тока короткого замыкания которого будет ограничиваться верхним каскадом. Данное условие является важным по следующим причинам.

Как правило, плотность тока короткого замыкания трёхкаскадного СЭ либо ограничивается плотностью тока верхнего перехода, либо плотности токов верхнего и среднего переходов практически равны (структура согласована). В первом случае ограничение плотности тока верхним переходом осуществляется с целью увеличения радиационной стойкости СЭ, так как средний переход быстрее деградирует под действием высокоэнергетичных частиц. Поэтому при настройке ИСИ очень важно контролировать мощность излучения в коротковолновом диапазоне.

Во втором случае изготовление структуры с равными плотностями токов верхнего и среднего каскадов обосновывается тем, что многопереходный СЭ может функционировать в оптимальном режиме только тогда, когда плотности токов всех переходов согласованы [13]. Для такой структуры будет наблюдаться явление люминесцентной связи.

Под люминесцентной связью понимают генерацию дополнительного наведённого тока в узкозонном субэлементе под действием вторичного рекомбинационного излучения в широкозонном субэлементе многопереходного СЭ. О данном эффекте упоминается в работе [14]. Оценка величины тока, индуцированного люминесценцией, может быть произведена с помощью формулы

$$V_{pn} = \frac{2kT}{q} \ln \frac{\sqrt{J_{0r}^2 + 4J_{0r}(J_{pn} + J_{0r} + J_{0d})} - J_{0r}}{2J_{0d}}. \quad (1.1)$$

При наличии освещения $J_{pn} = J_g - J$; $J_g = J_{gE} + J_{gL}$, где J_{gE} — фототок, J_{gL} — ток, индуцированный люминесценцией, J — ток во внешней цепи.

Следовательно, при использовании трёхкаскадных эталонных СЭ для изготовления ДКУИ необходимо, чтобы данные эталонные СЭ были универсальны и подходили для имитаторов разных конструкций и спектров, следовательно, необходимо, чтобы у эталонного трёхкаскадного СЭ плотность тока короткого замыкания ограничивалась верхним каскадом.

В обоих случаях (для СЭ с согласованной структурой и для СЭ с запасом по плотности тока короткого замыкания среднего перехода) правильно настроенная коротковолновая область спектра обеспечит правильное измерение плотности тока короткого замыкания СЭ, так как повышение облучённости в области коротких длин волн приведёт к увеличению плотности тока короткого замыкания.

Согласно нормативному документу ГОСТ Р МЭК 60904-2-2013 для эталонных солнечных приборов не устанавливается определённый срок эксплуатации. Эталонный прибор считается годным до тех пор, пока калибровочное значение тока короткого замыкания данного прибора

не изменилось более чем на 5 % по сравнению с его первоначальной величиной. Рекомендуется проводить калибровку эталонных элементов один раз в год.

Кроме того не допускается наличие дефектов на корпусе и защитном стекле эталонного датчика, а также на самом солнечном элементе, которые могут отрицательно повлиять на его функционирование. Однако производители эталонных датчиков указывают в технической документации гарантийный срок для каждого типа датчика, который может достигать 20 лет.

2. Изготовление ДКУИ

В данной работе предложен способ создания эталонного солнечного элемента (ДКУИ) с исходной сбалансированной по плотностям токов верхнего и среднего каскадов структурой GaInP/GaAs/Ge.

Как уже было сказано, для изготовления ДКУИ необходимо, чтобы плотность тока короткого замыкания ограничивалась верхним каскадом. В противном случае в зависимости от спектра ИСИ ограничивать плотность тока короткого замыкания СЭ может как верхний, так и средний субэлемент (в случае, если их плотности токов близки).

Для изготовления ДКУИ с вышеуказанными характеристиками была поставлена следующая цель: добиться отношения плотностей токов короткого замыкания верхнего перехода к среднему $\leq 0,95$ для исходной сбалансированной по плотностям токов верхнего и среднего каскадов структурой GaInP/GaAs/Ge.

Данная цель может быть достигнута двумя способами: 1) путём подбора толщин просветляющего покрытия увеличить отражение в области чувствительности верхнего перехода, не изменяя отражение в области чувствительности среднего перехода; 2) путём подбора толщин просветляющего покрытия увеличить отражение в области чувствительности верхнего перехода в большей степени, чем в области чувствительности среднего перехода так, что плотность тока верхнего перехода будет меньше, чем плотность тока среднего перехода.

Метод варьирования толщин слоёв представляет собой эффективный инструмент проектирования многослойных оптических покрытий для СЭ с заданными спектральными характеристиками. В работе продемонстрирована его применимость для синтеза оптимального двухслойного антиотражающего покрытия, интегрируемого в конструкцию многокаскадных СЭ [15].

Для трёхкаскадных солнечных элементов со структурой GaInP/GaAs/Ge применяется двухслойное антиотражающее (просветляющее) покрытие $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. Показатели преломления слоёв просветляющего покрытия должны составлять: $n = 2,58$ (при 640 нм) для TiO_2 и $n = 1,77$ для Al_2O_3 (при 640 нм).

На рис. 1 приведён график зависимости внешней квантовой эффективности СЭ с исходной сбалансированной по плотностям токов структурой от длины волны падающего излучения (образец 1). Плотность тока короткого замыкания каждого из переходов можно рассчитать, используя формулу

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

Здесь J_{sc} — плотность тока короткого замыкания перехода, $EQE(\lambda)$ — внешняя квантовая эффективность данного субэлемента, $\Phi_{inc}(\lambda)$ — падающий поток излучения, λ — длина волны падающего излучения, e — элементарный заряд [3].

Для получения первого образца взяты следующие толщины слоёв просветляющего покрытия: $d_{\text{TiO}_2} = 45$ нм; $d_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 70$ нм. Плотности токов верхнего и среднего переходов представлены в табл. 1.

Отношение $J_{\text{GaInP}}/J_{\text{GaAs}}$ для образца 1 равняется 0,998.

С целью уменьшения отношения $J_{\text{GaInP}}/J_{\text{GaAs}}$ для исходной сбалансированной по плотностям токов верхнего и среднего каскадов структурой GaInP/GaAs/Ge сначала производилось изменение толщины слоя Al_2O_3 с сохранением толщины TiO_2 , а затем изменение толщины слоя TiO_2 с сохранением толщины слоя Al_2O_3 .



Рис. 1. Внешняя квантовая эффективность исходной сбалансированной по плотностям токов верхнего и среднего переходов структурой

Fig. 1. External quantum efficiency of the original structure balanced by the current densities of the upper and middle junctions

Сначала было произведено напыление антиотражающего покрытия с разной толщиной слоя Al_2O_3 для трёх образцов. В табл. 2 приведены рассчитанные по формуле (1.1) плотности токов верхнего и среднего каскадов, а также их отношения.

Как видно из табл. 2, плотности токов убывают с уменьшением толщины слоя Al_2O_3 , а отношения плотностей токов растут.

На рис. 2 приведены спектры отражения, а на рис. 3 — спектральные характеристики внешней квантовой эффективности для образцов 1 и 4.

Из рис. 2 и 3 видно, что увеличение толщины слоя Al_2O_3 приводит к увеличению отражения как в области чувствительности верхнего, так и в области чувствительности среднего перехода.

Затем производилось напыление двухслойного антиотражающего покрытия на образцы 5, 6 и 7 с разными толщинами слоя TiO_2 с сохранением толщины Al_2O_3 . В табл. 3 приведены рассчитанные по формуле (1.1) плотности токов верхнего и среднего каскадов и их отношения для образцов 5, 6 и 7.

Таблица 1. Расчётные значения плотностей токов короткого замыкания для верхнего и среднего каскадов образца 1

Table 1. Calculated values of short-circuit current densities for the upper and middle cascades of sample 1

Верхний переход (GaInP)	$J_{GaInP} = 17,844 \text{ mA/cm}^2$
Средний переход (GaAs)	$J_{GaAs} = 17,880 \text{ mA/cm}^2$

Таблица 2. Расчётные значения плотностей токов и их отношений для образцов 2, 3 и 4

Table 2. Calculated values of current densities and their ratios for samples 2, 3 and 4

№ образца	Толщина, нм		$J_{GaInP}, \text{ mA/cm}^2$	$J_{GaAs}, \text{ mA/cm}^2$	J_{GaInP}/J_{GaAs}
	TiO_2	Al_2O_3			
2	45	60	17,866	17,832	1,002
3	45	40	17,077	16,648	1,026
4	45	30	16,745	16,011	1,046

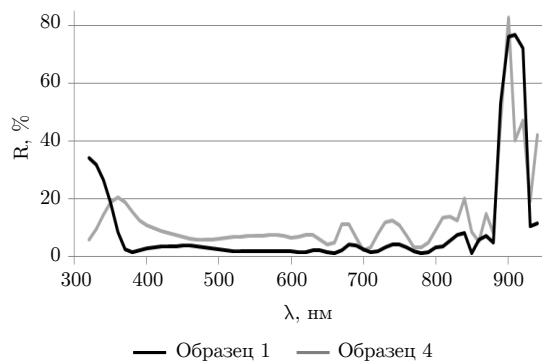


Рис. 2. Спектры отражения образцов 1 и 4
Fig. 2. Reflectance spectra of samples 1 and 4

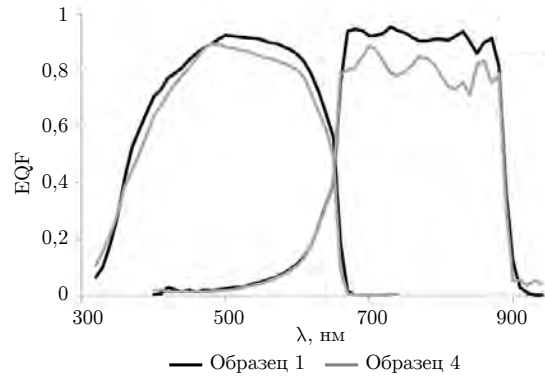


Рис. 3. Спектральные характеристики внешней квантовой эффективности образцов 1 и 4
Fig. 3. Spectral characteristics of external quantum efficiency of samples 1 and 4

Таблица 3. Расчётные значения плотностей токов и их отношений для образцов 5, 6 и 7

Table 3. Calculated values of current densities and their ratios for samples 5, 6 and 7

№ образца	Толщина, нм		J_{GaInP} , мА/см ²	J_{GaAs} , мА/см ²	$J_{\text{GaInP}}/J_{\text{GaAs}}$
	TiO ₂	Al ₂ O ₃			
5	30	70	17,300	17,896	0,967
6	20	70	16,900	17,455	0,968
7	10	70	16,622	17,895	0,929

Из табл. 3 видна тенденция к уменьшению плотности тока верхнего каскада с уменьшением толщины слоя TiO₂.

На рис. 4 приведены спектры отражения, а на рис. 5 — спектральные характеристики внешней квантовой эффективности для образцов 1 и 7.

Из рис. 4 и 5 видно, что увеличение толщины слоя TiO₂ приводит к увеличению отражения в области чувствительности верхнего перехода; отражение в области чувствительности среднего перехода остаётся практически неизменным, что приводит, как следует из табл. 2, к уменьшению отношения $J_{\text{GaInP}}/J_{\text{GaAs}}$.

Из табл. 2 также следует, что образец 7 удовлетворяет требованию: $J_{\text{GaInP}}/J_{\text{GaAs}} \leq 0,95$.

Заключение

В работе рассмотрен способ создания эталонного солнечного элемента для изготовления ДКУИ с исходной сбалансированной по плотностям токов верхнего и среднего каскадов структурой GaInP/GaAs/Ge путём варьирования толщин отдельных слоёв двухслойного просветляющего покрытия TiO₂/Al₂O₃. Установлено, что уменьшение толщины слоя Al₂O₃ приводит к увеличению отражения в области чувствительности верхнего и среднего переходов, а уменьшение толщины слоя TiO₂ приводит к увеличению отражения в области чувствительности верхнего перехода, оставляя отражение в области чувствительности среднего перехода практически неизменным. Надо ожидать, что при увеличении толщин будут наблюдаться обратные эффекты. Увеличение отражения в области чувствительности верхнего перехода позволило получить нужную спектральную характеристику внешней квантовой эффективности и целевое отношение плотностей токов верхнего и среднего каскадов для эталонного СЭ, предназначенного для изготовления ДКУИ.

При изготовлении трёхкаскадного эталонного солнечного элемента (СЭ) необходимо соблюдать следующие регламентированные параметры. Отношение плотностей токов короткого

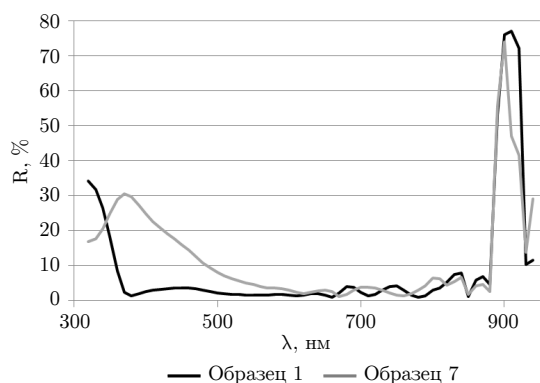


Рис. 4. Спектры отражения образцов 1 и 7
 Fig. 4. Reflectance spectra of samples 1 and 7

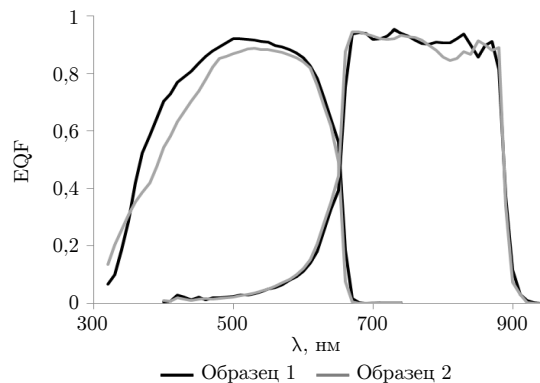


Рис. 5. Спектральные характеристики внешней квантовой эффективности образцов 1 и 7
 Fig. 5. Spectral characteristics of the external quantum efficiency of samples 1 and 7

замыкания верхнего и среднего каскадов ($J_{\text{верх}}/J_{\text{сред}}$) не должно превышать 0,95. Спектральная чувствительность эталонного СЭ должна быть идентична спектральной чувствительности тестируемых солнечных элементов, параметры которых измеряются с использованием источника солнечного излучения (ИСИ), откалиброванного с применением данного датчика.

Литература [References]

1. Емельянов, В.М., Минтаиров, С.А., Калюжный, Н.А., Лантратов, В.М., Внешний квантовый выход фотоответа каскадных солнечных элементов. *Научно-технические ведомости СПбГПУ*, 2009, № 2, с. 14–23. [Yemelyanov, V.M., Mintairov, S.A., Kalyuzhny, N.A., Lantratov, V.M., External quantum photoresponse output of cascade solar cells. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU = Scientific and technical bulletins of the Saint Petersburg Polytechnic University*, no. 2, pp. 14–23. (in Russian)]
2. Богатов, Н.М., Нестеренко, И.И., Скачков А.Ф., О проблемах создания четырёхкаскадных солнечных элементов с согласованной кристаллической решёткой. *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического 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 the Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2017, no. 4, pp. 74–80. (in Russian)]
3. 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, № 3, с. 51–55. [Dubinina, K.S., Skachkova, L.N., Obtaining and studying single- and double-junction models of triple-junction solar cells work transitions. *Ekologicheskiy vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva = Ecological Bulletin of the Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2025, no. 3, pp. 51–55. (in Russian)] DOI: [10.31429/vestnik-22-3-51-55](https://doi.org/10.31429/vestnik-22-3-51-55)
4. 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. *Радиационная стойкость электронных систем «Стоикость-2023»: Тезисы докладов 26-й Всероссийской научно-технической конференции*, 2023, № 26, с. 27–28. [Dubinina, K.S., Skachkova, L.N., Oleinik, 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. *Radiatsionnaya stoikost elektronnykh sistem "Stoikost-2023": materialy vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*, 2023, no. 26, pp. 27–28. (in Russian)]
5. Freundlich, A., Alemu, A., Multi quantum well multijunction solar cell for space applications. *Physica Status Solidi (C)*, 2005, no. 8, pp. 2978–2981. DOI: [10.1002/pssc.200460720](https://doi.org/10.1002/pssc.200460720)

6. 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, no. 33, pp. 1–5. DOI: [10.1109/PVSC.2008.4922452](https://doi.org/10.1109/PVSC.2008.4922452)
7. Алфёров, Ж.И., История и будущее полупроводниковых гетероструктур. *Физика и техника полупроводников*, 1998, № 26, с. 3–18. [Alferov, J.I., History and future of semiconductor heterostructures. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Physics and technology of semiconductors*, 1998, no. 26, pp. 3–18. (in Russian)]
8. Karmalawi, A.M., Characterization, traceability, and uncertainty estimation of reference solar panel module measurements using pulsed solar simulators and reference solar cells. *АСТА ИМЕКО*, 2023, iss. 3, pp. 1–9. DOI: [10.21014/actaimeko.v12i3.1525](https://doi.org/10.21014/actaimeko.v12i3.1525)
9. Колтун, М.М., *Оптика и метрология солнечных элементов*. Москва, Наука, 1985. [Koltun, M.M., *Optics and metrology of solar cells*. Moscow, Nauka, 1985. (in Russian)]
10. Vosylius, Z., Antonovic, D., Novickovas, A., Gaubas, E., Tamosiunas, V., Rational selection of light sources for LED-based solar simulators. *Solar Energy*, 2023, vol. 265, pp. 1–11. DOI: [10.1016/j.solener.2023.112064](https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112064)
11. Reichmuth, S.K., Siefer, G., Schachtner, M., Mühleis, M., Hohl-Ebinger, J., Glunz, S.W., Measurement Uncertainties in I–V Calibration of Multi-junction Solar Cells for Different Solar Simulators and Reference Devices. *Journal of Photovoltaics*, 2020, vol. 10, iss. 4, pp. 1076–1083. DOI: [10.1109/JPHOTOV.2020.2989144](https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2020.2989144)
12. Eghbali, A., Karh, P., Ikonen, E., Kroger, I., Results of an interlaboratory comparison of adapted reference solar cells among nine metrological institutes. *Results in Engineering*, 2026, vol. 30, pp. 1–13. DOI: [10.1016/j.rineng.2026.110740](https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.110740)
13. Olson, J.M., Friedman, D.J., Kurtz, S., High-efficiency III–V multijunction solar cells. In Luque, A., Hegedus S. (eds), *Handbook of photovoltaic science and engineering*, 2003, pp. 359–411. DOI: [10.1002/0470014008.ch9](https://doi.org/10.1002/0470014008.ch9)
14. Минтаиров, М.А., Евстропов, В.В., Минтаиров, С.А., Тимошина, Н.Х., Шварц, М.З., Калюжный, Н.А., Оценка потенциальной эффективности многопереходного солнечного элемента при предельном балансе фотогенерированных токов. *Физика и техника полупроводников*, 2015, № 49, с. 682–687. [Mintairov, M.A., Evstropov, V.V., Mintairov, S.A., Timoshina, N.H., Schwartz, M.Z., Kalyuzhny, N.A., Evaluation of the potential efficiency of a multipass solar cell with a limiting balance of photogenerated currents. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Physics and technology of semiconductors*, 2015, no. 49, pp. 682–687. (in Russian)]
15. Guojiao, H., Garcia, I., Rey-Stolle, I., High-Low Refractive Index Stacks for Broadband Antireflection Coatings for Multijunction Solar Cells. *Solar Energy*, 2021, vol. 217, pp. 29–39. DOI: [10.1016/J.SOLENER.2021.01.060](https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2021.01.060)