

УДК 621.315.592

Настройка спектра имитатора излучения при исследовании радиационной стойкости многопереходных солнечных элементов

© М.З. Шварц, Д.Ю. Березанов, В.Р. Ларионов, С.А. Левина, Д.А. Малевский,
А.Е. Маричев, М.В. Нахимович, П.В. Покровский

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия
E-mail: shvarts@scell.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 5 мая 2026 г.

В окончательной редакции 8 июля 2026 г.

Принята к публикации 14 июля 2026 г.

Представлены результаты подбора (настройки) параметров излучения солнечного имитатора и последующего использования выбранных световых режимов при обеспечении экспериментов по исследованию радиационной стойкости трехпереходных солнечных элементов на основе согласованных и рассогласованных (метаморфных) гетероструктур в системе материалов $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}/\text{Ga}_y\text{In}_{1-y}\text{As}/\text{Ge}$.

Ключевые слова: трехпереходный солнечный элемент, импульсный имитатор солнечного излучения, спектральная зависимость фоточувствительности, метаморфная гетероструктура, радиационная стойкость.

DOI: 10.61011/FTP.2026.07.63943.9723

1. Введение

Задача повышения эффективности современных $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ многопереходных солнечных элементов (Solar Cell — SC) обеспечивается увеличением количества фотоактивных p – n -переходов (субэлементов), формируемых на основе материалов различного элементного состава и кристаллического совершенства. Для космических фотоэлектрических панелей используются трехпереходные (triple-junction — 3J) SC на основе согласованных и рассогласованных (метаморфных) структур в системе материалов $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}/\text{Ga}_y\text{In}_{1-y}\text{As}/\text{Ge}$ [1,2]. В зависимости от энергетических задач, решаемых фотоэлектрической панелью, выбор того или иного типа гетероструктуры будет определяться целевыми показателями по генерируемому току или напряжению. Так, например, вариант SC типа $\text{Ga}_{0.47-0.44}\text{In}_{0.53-0.56}\text{P}/\text{Ga}_{0.94-0.92}\text{In}_{0.06-0.08}\text{As}/\text{Ge}$ с субэлементами на основе метаморфных (рассогласованных по параметру решетки — Lattice MisMatched structure — LMM) полупроводниковых материалов будет обеспечивать больший (на $\sim 8\%$) фототок и меньшее (на $\sim 5\%$) напряжение в сравнении с более распространенной конструкцией на основе изопериодической (согласованной по параметру решетки — Lattice Matched structure — LM) $\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}/\text{Ga}_{0.99}\text{In}_{0.01}\text{As}/\text{Ge}$ -гетероструктурой [2].

Если рассматривать проблему токового рассогласования между субэлементами в обсуждаемых 3J SC, то в парах субэлементов „верхний (top)/средний (mid)“ и „верхний (top)/нижний (bot)“ могут наблюдаться следующие соотношения для фототоков (J): LM SC [$J_{\text{top}}/J_{\text{mid}} = 0.96$, $J_{\text{top}}/J_{\text{bot}} = 0.76$] и LMM SC [$J_{\text{top}}/J_{\text{mid}} = 1.01$, $J_{\text{top}}/J_{\text{bot}} = 0.86$] соответственно. При

радиационном повреждении структур в условиях космического полета уровень токового рассогласования будет меняться, устанавливая новые значения для обсуждаемых отношений фототоков.

Известно, что „искусственно“ устанавливать определенный уровень токового рассогласования и(или) влиять на величины $J_{\text{top}}/J_{\text{mid}}$ и $J_{\text{top}}/J_{\text{bot}}$ можно излучением солнечного имитатора, меняя спектральный состав его светового потока. Очевидно, что достоверность оценок радиационной деградации, получаемых при длительных наземных испытаниях, в значительной степени будет определяться именно качеством моделируемого солнечным имитатором излучения.

Ранее для управления токовым дисбалансом был предложен спектрметрический подход, активно используемый для анализа поведения выходных фотоэлектрических характеристик 3J SC и оценки потенциально достижимых значений КПД [3]. Прецизионно варьируя спектр излучения многоканального (1-Sun) имитатора производился перевод SC из состояния токового ограничения со стороны верхнего субэлемента в режим ограничения средним субэлементом и т.д. при неизменной сумме их фототоков.

Аналогичная возможность варьирования спектра излучения имеется и в импульсных имитаторах за счет изменения напряжения на ксеноновой лампе-вспышке: по мере роста рабочего напряжения „сине-красное отношение“ в спектре излучения смещается в сторону увеличения доли „синего“ света на фоне сглаживания ксеноновых пиков [4]. „Усилить“ данный эффект возможно в варианте оптически связанных источников излучения, как продемонстрировано в работах [5,6].

В представляемой работе демонстрируется эффективность использования оптически связанных импульсных

источников излучения при выполнении измерений фотоэлектрических характеристик SC, подвергаемых радиационному облучению. Обосновываются критерии выбора спектра излучения применительно к формированию условий для начального (до облучения) тестирования 3J SC на основе согласованной и метаморфной структур и при сопровождении всего цикла их радиационных испытаний. Показана значимость достижения токового согласования для субэлементов за счет изменения спектра излучения имитатора и последующего использования найденного светового „спектрального“ баланса на весь период радиационных испытаний.

2. Экспериментальное оборудование

Рассматриваемый импульсный имитатор солнечного излучения (ИИСИ) имеет электронную схему питания и управления источниками излучения, а также систему регистрации вольт-амперных характеристик (ВАХ) SC, аналогичную изложенной в работах [5,6].

Основным преимуществом используемого ИИСИ является увеличенное до 1050 В максимальное напряжение источника питания ламп (определяется конструкцией блока питания импульсных ламп). Повышение рабочего напряжения и соответствующее этому увеличение мощности излучения ламп позволило, с одной стороны, улучшить точность спектральной подгонки (подстраивания) моделируемого излучения к стандартным (референсным) данным для космического солнечного спектра AM0 (air mass zero) (прежде всего за счет перехода в рабочие режимы с высоким напряжением). С другой — расширить диапазон спектральных вариаций, обеспечив тем самым возможность тонкой подстройки токового баланса (или дисбаланса) для субэлементов исследуемых 3J SC. Успешность моделирования спектров обусловлена использованием специализированных корректирующих интерференционных светофильтров.

При классификации ИИСИ, имеющих опцию вариации облученности в рабочей области за счет изменения расстояния от осветителя до плоскости расположения образца, наибольшее внимание уделяется следующему набору параметров: спектральное соответствие, стабильность излучения, воспроизводимость облученности от импульса к импульсу, равномерность облученности по рабочей области заданного размера. Также следует отслеживать вариации спектрального состава излучения в период светового импульса. Спектральный состав излучения регистрировался высокоскоростным спектрометрическим комплексом на основе трех блоков для диапазонов длин волн 250–1000, 820–1640, 1500–2120 нм. Оптическая светоприемная головка включала нейтральный диффузор, формирующий однородный световой поток на входной апертуре многоканального оптоволоконного жгута, и высокоскоростной оптический затвор (скорость срабатывания не хуже 0.3 мс). Оптические волокна жгута разделяются

на три линии, направляя излучение на вход спектрометрических блоков. Согласование временных интервалов светового импульса и состояния затвора „открыто“ (минимальное время нахождения затвора в этом состоянии — 1 мс) позволяет оценивать спектр ИИСИ за период плоской части светового импульса длительностью ~ 1.2 мс, т.е. за интервал времени, за который производится запись ВАХ SC.

3. Результаты

Динамика изменения спектральных композиций при формировании потока космического AM0 излучения по мере увеличения напряжения на источнике питания ламп показана на рис. 1, а, а оценивание спектрального несоответствия — на рис. 1, б. Для применяемого спектрально-корректирующего комплекта (комбинация „белого“ стекла JB320 и специализированного интерференционного фильтра [6]) наилучшее приближение к эталонному спектру AM0 достигается при напряжении на источнике питания ламп 800–850 В. Следует отметить, что для всех спектральных поддиапазонов, рекомендованных для оценивания, несоответствие спектру AM0 находится в пределах $\pm 10\%$, что значительно превышает требования действующих стандартов [7,8].

Воспроизводимость облученности от импульса к импульсу для ИИСИ была изучена ранее в работе [6], где показана вариативность интегральной облученности в допустимых пределах $\pm 1\%$ [9] при неизменных настройках ИИСИ (напряжение на источнике питания ламп, длительности импульса, интервал записи ВАХ).

Неравномерность распределения облученности определялась расстоянием осветитель–„плоскость испытаний“. При облученности, эквивалентной одной солнечной постоянной, это расстояние превышало 2 м, что в пределах области ≥ 150 мм в диаметре соответствовало вариациям по освещенности в пределах 2%.

При долгосрочных испытаниях солнечных элементов (СЭ), таких как деградация фотоэлектрических параметров при радиационном воздействии, стабильность параметров ИИСИ играет важную роль. Соответствие характеристик имитатора требуемым стандартам в течение длительного периода времени подтверждается регулярными проверками с использованием контрольных фотоприемников и спектрометра, калибруемого по фоточувствительности относительно рабочего эталона единиц спектральной плотности энергетической освещенности (лампа FEL 1000).

Основным техническим преимуществом используемого ИИСИ является достаточно тонкая перестройка спектра, благодаря которой можно менять токовый баланс для субэлементов 3J SC и выбирать условия для измерений по критерию максимального соответствия коэффициента спектрального рассогласования (М-фактора) единице [10]. Пример изменения значений плотностей

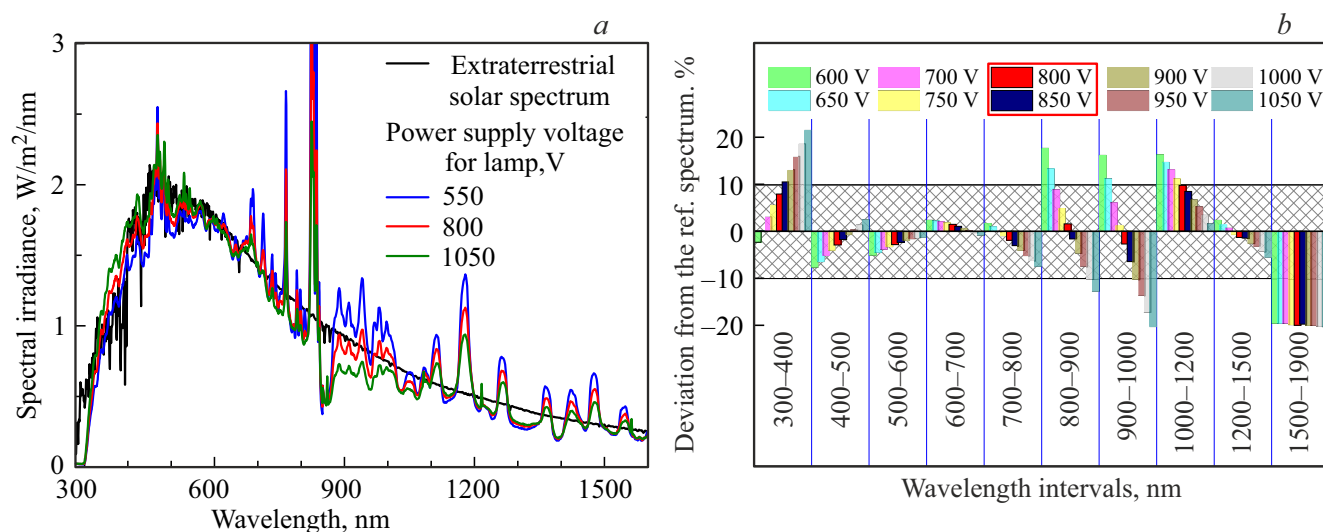


Рис. 1. Настройка спектра АМ0 ИИСИ: *a* — настройка спектральной освещенности в сравнении с эталонным солнечным спектром АМ0; *b* — соответствие моделируемого спектра требованиям [7]. Допустимые отклонения $\pm 10\%$ обозначены заштрихованной областью.

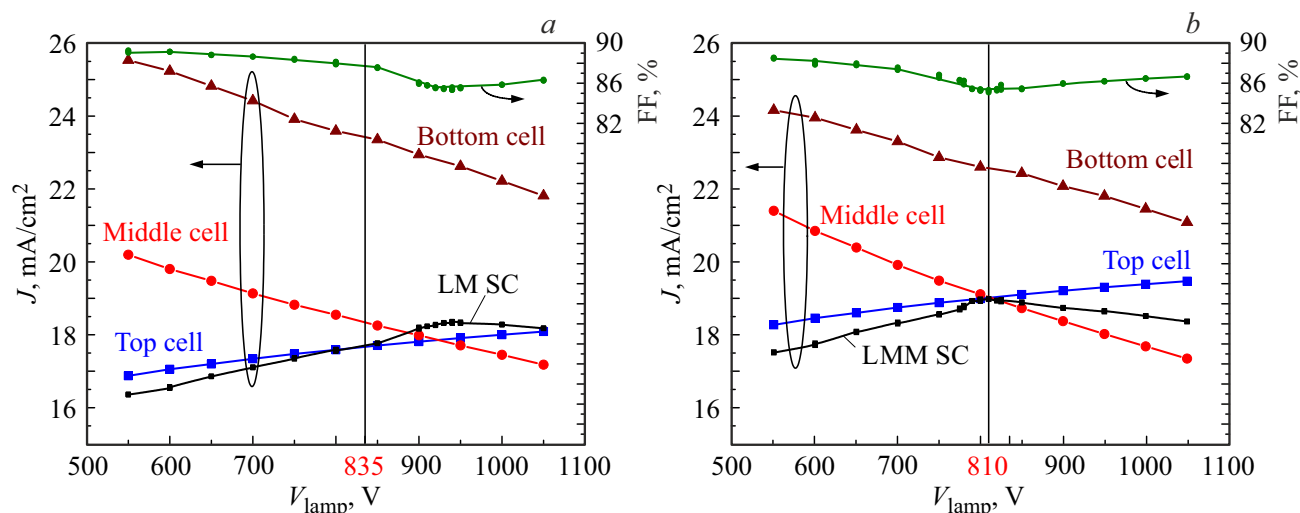


Рис. 2. Динамика изменения значений плотностей фототоков (J) для субэлементов и коэффициента заполнения ВХ (FF) космических 3J SC при повышении напряжения на источнике питания ИИСИ. Вертикальными линиями обозначены целевые значения напряжения на лампах ИИСИ, при которых устанавливаются требуемые значения фототоков каждого из субэлементов 3J SC, определенные для стандартного спектрального распределения солнечного излучения АМ0: *a* — $\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}/\text{Ga}_{0.99}\text{In}_{0.01}\text{As}/\text{Ge}$ LM SC; *b* — $\text{Ga}_{0.47-0.44}\text{In}_{0.53-0.56}\text{P}/\text{Ga}_{0.94-0.92}\text{In}_{0.06-0.08}\text{As}/\text{Ge}$ LMM SC.

фототоков субэлементов космических 3J SC, выполненных в конфигурациях $\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}/\text{Ga}_{0.99}\text{In}_{0.01}\text{As}/\text{Ge}$ LM и $\text{Ga}_{0.47-0.44}\text{In}_{0.53-0.56}\text{P}/\text{Ga}_{0.94-0.92}\text{In}_{0.06-0.08}\text{As}/\text{Ge}$ LMM, представлен на рис. 2. Для исследуемых LM и LMM 3J SC требуемые значения фототоков каждого из субэлементов (определенные для стандартного спектрального распределения солнечного излучения АМ0 на основании данных по измерениям спектральных зависимостей фоточувствительности) достигаются в режимах моделирования солнечного излучения при напряжениях на лампах ИИСИ 835 В и 810 В соответственно. Именно эти

режимы работы ИИСИ и были выбраны для проведения долгосрочных радиационных испытаний 3J SC.

Прецизионность управления спектральным балансом излучения имитатора подтверждается тем фактом, что каждый из исследуемых 3J SC может быть переведен в режим токового согласования в паре субэлементов „верхний (top)/средний (mid)“ (пересечение соответствующих токовых линий на рис. 2). Одновременно такому режиму будет соответствовать минимум коэффициента заполнения (fill factor — FF) ВХ SC (см. рис. 2, зависимость для FF).

Очевидно, что несколько иной исходный токовый дисбаланс (определяется по данным спектральных измерений внешней квантовой эффективности для субэлементов SC) потребует установки и иного напряжения питания для импульсных ламп. Используемый источник с диапазоном регулировок по напряжению от 500 до 1050 В в совокупности с применяемыми светофильтрами позволит при необходимости формировать и иные требуемые показатели по спектральному распределению в световом потоке. Так, при проведении радиационных испытаний открывается возможность „переводить“ 3J SC в режим токового баланса для субэлементов в паре „top/mid“ на уже новом уровне с учетом деградации фототоков, проверяя тем самым общую динамику изменения контролируемых фотоэлектрических параметров.

4. Заключение

Представлены результаты управления спектром излучения при моделировании параметров светового потока АМ0 на импульсном имитаторе с оптически взаимодействующими импульсными лампами. Наряду с высоким качеством воспроизведения спектра космического излучения (спектральное несоответствие не хуже $\pm 10\%$ для диапазона длин волн 300–1800 нм, Class А по [7]) показана возможность „прецизионной“ подстройки спектра излучения ИИСИ для обеспечения требуемого токового баланса в 3J SC на основе двух вариантов гетероструктур: $\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}/\text{Ga}_{0.99}\text{In}_{0.01}\text{As}/\text{Ge}$ LM и $\text{Ga}_{0.47-0.44}\text{In}_{0.53-0.56}\text{P}/\text{Ga}_{0.94-0.92}\text{In}_{0.06-0.08}\text{As}/\text{Ge}$ LMM. Продемонстрирована гибкость в подстройке спектра излучения ИИСИ, что в полной мере отвечает требованиям стабильного поддержания режимов тестирования при выполнении долгосрочных радиационных испытаний солнечных элементов космического назначения.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] C.M. Fetzer, R.R. King, P.C. Colter, K.M. Edmondson, D.C. Law, A.P. Stavrides, H. Yoon, J.H. Ermer, M.J. Romero, N.H. Karam. *J. Cryst. Growth*, **261** (2–3), 341 (2004). <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2003.11.026>
- [2] M.A. Mejía Escobar, C. Algora. *Joule*, **9** (11), 102194 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.joule.2025.102194>
- [3] M. Meusel, R. Adelhelm, F. Dimroth, A.W. Bett, W. Warta. *Progr. in PV: Res. & Appl.*, **10** (4), 243 (2002). <https://doi.org/10.1002/pip.407>
- [4] J. Kiehl, K. Emery, A. Andreas. *Proc. 19th Euro. PV Sol. Energy Conf. and Exhibition* (Paris, France, 5BV.2.11, 2004).
- [5] M.Z. Shvarts, E.D. Filimonov, S.A. Kozhukhovskaia, M.A. Mintairov, N.K. Timoshina, V.M. Andreev. *AIP Conf. Proc.*, **1881**, 040006 (2017). <https://doi.org/10.1063/1.5001428>
- [6] M.Z. Shvarts, V.R. Larionov, D.A. Malevskiy, M.V. Nakhimovich, P.V. Pokrovskiy. *AIP Conf. Proc.*, **2550**, 020010 (2022). <https://doi.org/10.1063/5.0099036>
- [7] ISO 15387:2005: Space systems — Single-junction solar cells — Measurements and calibration procedures (Published 2005, confirmed in 2021).
- [8] ECSS-E-ST-20-08C Rev 1 (2012) Space Engineering Photovoltaic assemblies and components (ECSS Secretariat ESA-ESTEC Requirements & Standards Division, 2012).
- [9] K. Emery. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, ed. by A. Luque and S. Hegedus (John Wiley & Sons, 2003) Chap. 16.
- [10] IEC 60904-9:2020, Edition 3.0 Photovoltaic devices — Part 9: Classification of solar simulator characteristics.

Редактор Г.А. Оганесян

Sunlight simulator spectrum tailoring at investigation of multi-junction solar cells radiation hardness

M.Z. Shvarts, D.Y. Berezanov,
V.R. Larionov, S.A. Levina, D.A. Malevskiy,
M.V. Nakhimovich, P.V. Pokrovskiy

Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The results of searching (tuning) the radiation parameters of a solar simulator are presented and the subsequent use of preset light modes to study the radiation resistance of three-junction solar cells based on lattice matched and mismatched (metamorphic) heterostructures in the $\text{GaIn}_{1-x}\text{P}/\text{GaIn}_{1-y}\text{As}/\text{Ge}$ material system are discussed.