



Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 629.7.064.56

ОПТИМИЗАЦИЯ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ: НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

¹Ячков И.В., ²Егоров А.Ю., ³Сапаров И.И., ⁴Хлебников М.Д.

«Научно-производственное объединение имени Семёна Алексеевича Лавочкина», Химки, Россия (141402, г. Химки, Ленинградская ул., 24), e-mail: ¹IvanIachkov113@gmail.com, ²Artyueg@gmail.com, ³ilnaral98@mail.ru, ⁴moscov.99@mail.ru

Данная статья обсуждает важность и вызовы, связанные с повышением электрических характеристик солнечных элементов, используемых в космических миссиях. Будут рассмотрены технологические новшества, концепции геометрии элементов, применение новых материалов, а также системы управления энергией и мониторинга. В рамках этой статьи будут проанализированы основные проблемы, с которыми сталкиваются солнечные элементы в космосе. Рассматриваются разнообразные технические решения, инновации и методы оптимизации, направленные на улучшение электрических характеристик, долговечности и эффективности солнечных элементов и солнечных батарей космического назначения.

Ключевые слова: Солнечные элементы, космические аппараты, солнечные батареи, электрические характеристики, технические решения, оптимизация, повышение эффективности, долговечность, управление энергией, мониторинг, космические миссии, надежность, ВАХ, ток короткого замыкания.

OPTIMIZATION OF SOLAR PANELS FOR SPACECRAFT: NEW MATERIALS AND TECHNOLOGIES

¹Yachkov I.V., ²Egorov A.Yu., ³Saparov I.I., ⁴Khlebnikov M.D.

“Research and Production Association named after Semyon Alekseevich Lavochkin”, Khimki, Russia (141402, Khimki, Leningradskaya str., 24), e-mail: ¹IvanIachkov113@gmail.com, ²Artyueg@gmail.com, ³ilnaral98@mail.ru, ⁴moscov.99@mail.ru

This article discusses the importance and challenges associated with enhancing the electrical characteristics of solar elements utilized in space missions. Technological innovations, geometry concepts of the elements, the application of new materials, as well as energy management and monitoring systems, will be examined. Within this article, the primary issues faced by solar elements in space will be analyzed. Various technical solutions, innovations, and optimization methods aimed at improving the electrical characteristics, durability, and efficiency of solar elements and solar arrays intended for space applications are considered.

Keywords: Solar elements, spacecraft, solar arrays, electrical characteristics, technical solutions, optimization, efficiency enhancement, durability, energy management, monitoring, space missions, reliability, IV curve, short-circuit current.

Солнечные батареи играют ключевую роль в обеспечении энергии космических аппаратов и спутников. Их надежная и эффективная работа в условиях космоса имеет решающее значение для функционирования космических миссий и обеспечения стабильности энергетического снабжения. Однако, в процессе эксплуатации в космосе, солнечные элементы

подвержены различным факторам, которые могут негативно влиять на их электрические характеристики и, следовательно, на производство энергии.

В условиях космоса солнечные элементы подвергаются ряду уникальных вызовов и проблем, которые оказывают непосредственное влияние на их электрические характеристики и долговечность, такие как солнечное излучение, радиационные пояса, температурные колебания и микрометеориты. С целью увеличения эффективности и продолжительности службы солнечных элементов необходимо разработать системы, способные повысить электрические характеристики элементов и солнечных батарей (СБ) в процессе эксплуатации в космосе.

1. Радиационные факторы:

Радиационное воздействие в космосе оказывает сильное влияние на солнечные элементы, гораздо большее, чем ближе к Земле, где их защищает магнитосфера. Даже в условиях околоземного пространства космическая радиация, включая солнечное излучение и частицы в радиационных поясах, может вызывать деградацию материалов, используемых в солнечных батареях.

Электроны с энергией от 0,2 до 1,0 МэВ и протоны с энергией от 4 до 40 МэВ оказывают наиболее отрицательное воздействие, создавая дополнительные точки рекомбинации в материалах фотоэлементов. Это приводит к снижению эффективности и выходной мощности этих материалов. Уменьшение тока в длинноволновой области приводит к увеличению тока насыщения и уменьшению фотоэлектрического напряжения. В результате, вместе с уменьшением выходной мощности, это вызывает падение напряжения. Это критично для работоспособности солнечных батарей, используемых в режиме постоянного напряжения (Рисунок 1) [1].

Исследования деградации солнечных батарей на спутниках, летающих на низких орбитах, показывают, что протоны радиационных поясов приводят к значительной деградации. Это подтверждается наблюдениями на спутниках "Телстар1", "Телстар2", и "NEOS A1", где радиация составила до 3,5% за определенный период полета. Наблюдается также сильная деградация фотоприемников из лития на спутнике NTS-1. Важно отметить, что некоторые фотоприемники с неглубоким переходом также испытывают сильную деградацию, но их абсолютная мощность остается выше обычных фотоприемников, 47 - 50 мВт против 39,1 мВт соответственно.

2. Температурные условия:

Космос характеризуется экстремальными температурными колебаниями, где солнечные элементы подвергаются значительным изменениям температуры от экстремального холода в тени до высоких температур при попадании под прямое солнечное излучение. Эти колебания могут вызывать термические напряжения, в последствии чего концентрация носителей заряда, связанная с энергией запрещенной зоны и энергией носителей, увеличивается при повышении температуры. Для кремниевых приборов чувствительность к температуре составляет 2,2 мВ/°С, но это влияние уменьшается при повышении напряжения. При протекании идеального тока эффективность линейно уменьшается с увеличением температуры до ~200 °С для кремния и до -300 °С для арсенида галлия. В случае рекомбинационного тока КПД при 20 °С ниже на ~25%. Так же с ростом температуры наблюдается линейное снижение эффективности. БС. (Рисунок 2).

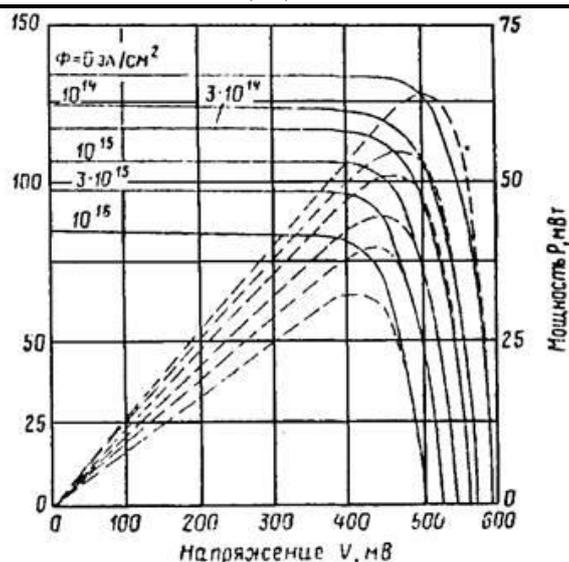


Рисунок 1 - Влияние электронного облучения с энергией 1 МэВ на ВАХ кремниевых ФП

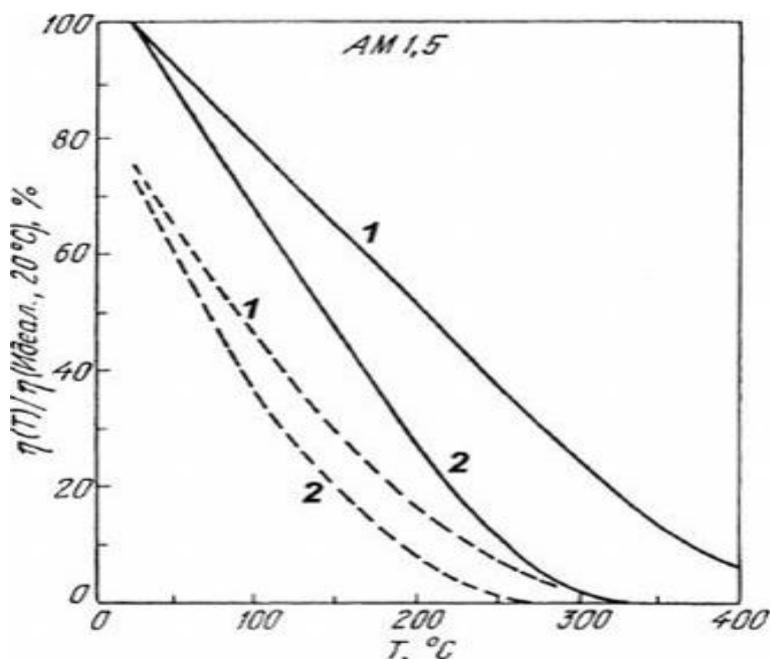


Рисунок 2 - Нормированные значения КПД для СБ на кремнии и арсениде галлия

При низких температурах возникают проблемы с производительностью элементов. Уменьшение подвижности носителей заряда из-за их рассеяния заряженными примесями ведет к уменьшению диффузионной длины неосновных носителей и, как следствие, снижению тока короткого замыкания. Также не исключено изменение сопротивления контактов. В кремниевых солнечных элементах частично решают эту проблему, используя алюминиевое покрытие на тыльной стороне [2].

3. Микрометеориты и космический мусор:

В космосе солнечные панели также подвержены ударным нагрузкам от микрометеоритов и обломков космического мусора, что может привести к повреждениям поверхности и ухудшению электрических свойств элементов [3].

4. Длительность службы и деградация:

Долговечность солнечных батарей ограничена временем их службы в космосе. В процессе эксплуатации происходит постепенная деградация, связанная с выходом из строя отдельных солнечных ячеек или ухудшением электрических характеристик всей системы в целом как описано выше [4].

5. Эффективность и максимизация энергии:

Важной проблемой является повышение эффективности солнечных батарей и максимизация получаемой энергии при ограниченном пространстве солнечных элементов на космических аппаратах.

Решение данных проблем требует разработки новых технологий, инноваций в материалах, улучшения формы солнечных элементов, а также создания систем управления и мониторинга, способных адаптироваться к переменным условиям космической среды и обеспечивать стабильность работы солнечных батарей на протяжении всей их службы в космосе.

Технические решения и инновации, направленные на улучшение электрических характеристик солнечных элементов для космического применения, охватывают широкий спектр технологий, материалов и методов оптимизации.

Разработка новых материалов для солнечных элементов играет важную роль в улучшении их эффективности. Использование полупроводниковых материалов с высокой степенью преобразования солнечной энергии, таких как гибридные перовскитные или тонкие пленочные солнечные элементы, позволяет увеличить выходную мощность БС. Так же разработка новых материалов для защиты БС в космосе включает многослойные покрытия, наноматериалы, солнечные фильтры, гибридные покрытия и тонкопленочные материалы. Они обеспечивают улучшенную защиту от солнечного излучения, а также позволяют обеспечить оптимальные рабочие температурные режимы, сохраняя максимальную энергоэффективность и срок службы.

К примеру, самая мощная солнечная батарея на Международной космической станции (МКС) имеет мощность 248 кВт и состоит из четырех модулей по 62 кВт каждый. Площадь это БС составляет 2400 м². Каждый модуль включает две солнечные батареи весом 1062 кг. Замена кремниевых фотоэлементов на фотоэлементы с арсенидом-галлием может увеличить общую мощность батареи до 1296 кВт при удельной массе 6.6 кг/кВт и удельной мощности 540 Вт/м². Это открывает перспективы для создания солнечного буксира мощностью до 1 МВт. Удельная мощность на отдельных аппаратах за рубежом достигается 5000 Вт/кг за счет тонкопленочных гетероструктурных ФЭП, которые клеят на корпус малого КА [5].

Стоит отметить что, Российские учёные создали прочное и прозрачное покрытие для защиты солнечных батарей и оптики космических аппаратов от микрометеоритов и космического мусора. Новый материал из тантала, кремния и азота превосходит известные защитные покрытия: его скорость роста в 2–7 раз выше, а стойкость к абразивным частицам — в 1,5–5 раз больше. Он способен выдерживать температуры до 1200° и обладает прозрачностью на уровне 80–90% для широкого спектра электромагнитных волн [6]. В совокупности с новой разработкой Российских ученых, открывается перспектива более широкого использования гибридных перовскитных солнечных элементов. Это решение позволит повысить надежность, уменьшит массу и увеличить энергоэффективность.

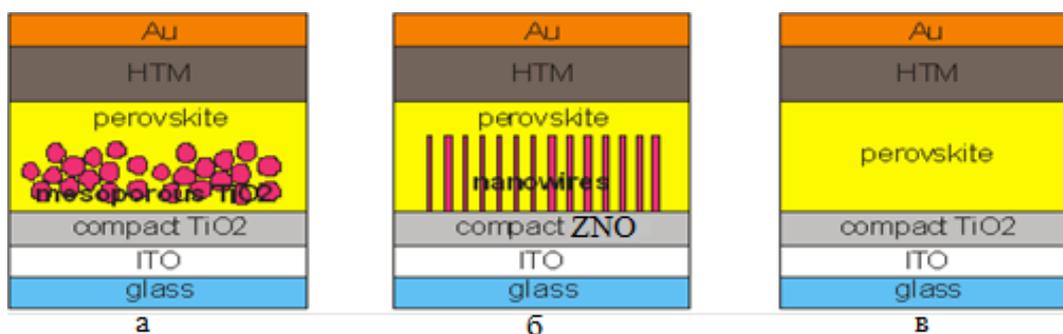


Рисунок 3а,б,в – структура перовскитных солнечных элементов

На рисунке 3 схематично изображены три типа солнечных батарей на основе перовскита. В первом случае (рисунок 3а) в качестве дополнительного электрода используется мезопористый оксид титана. Такая конструкция позволяет добиться высокой скорости преобразования солнечной энергии в постоянный электрический ток [7]. Однако, заполнение таких мезопористых структур перовскитом очень сложна и в последствии дорога. Согласно второму варианту (рисунок 3б) в качестве пористой структуры используются нанотрубки из оксида цинка. Благодаря их вертикальной структуре скорость перехода и рекомбинации электронов выше. В свою очередь такое решение позволяет уменьшить размеры пластин при сохранении той же эффективности. Так же солнечные батареи на основе перовскитов способны выдавать неплохие показатели энергоэффективности, даже когда представляют собой обычную планарную структуру (Рисунок 3в) [8]. Переходный узел, НТМ — hole transport material (материал, который служит основой для переноса дырок). Перовскиты обладают высокой проводимостью порядка $10^{-3} \text{ см} \cdot \text{см}^3$, которая требует большой слой НТМ, чтобы избежать сквозных отверстий. Однако высокая стоимость его производства требует альтернатив, таких как полупроводники р-типа: NiO, CuCsN, CuI, CsSnI3. Они обеспечивают хорошую оптическую прозрачность и высокое качество пленки перовскита. В качестве электрода используется оксид индия олова (ITO), с высокой пропускной способностью света. Альтернативой ITO может служить олово легированное фтором (FTO), Compact TiO2 (пористый диоксид титана) повышающего эффективность процесса поглощения. Все слои рекомендуется (кроме слоя перовскита) наносить последовательно золь-гель методом. К основным преимуществам перед другими методами (спрей-пиролиз, осаждение из газовой фазы, магнетронное распыление и др.) можно отнести нанесение почти на любую форму, проще контролировать уровень легирования, а также он не требует сложной аппаратуры.

Усовершенствование геометрии солнечных батарей также играет важную роль в повышении их производительности. Разработка более эффективной геометрии солнечных элементов может повысить захват солнечного излучения и увеличить производительность. Многие инженерные решения, такие как многокаскадные системы (позволяют настраивать БС на различные спектры света), специальные углы наклона солнечных панелей для максимизации экспозиции к солнечному свету, способствуют улучшению электрических характеристик. Разработка систем управления энергией для солнечных элементов позволяет максимизировать выходную энергию и улучшить их адаптивность к переменным условиям в

космосе. Это включает в себя разработку максимальной точки мощности и алгоритмов максимизации эффективности работы солнечных батарей. Использование метода отслеживания максимальной точки мощности позволит солнечным батареям работать на оптимальной точке максимальной мощности, что повышает эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую.

Эти технические решения и инновации направлены на повышение эффективности, долговечности и надежности солнечных элементов для космических миссий. Интеграция этих технологий позволяет создавать более продвинутые системы солнечной энергии, обеспечивая более эффективную и долговечную работу космических аппаратов и спутников.

Космические миссии предоставляют много примеров успешной реализации методов улучшения электрических характеристик солнечных элементов. Рассмотрим несколько из них:

1. Миссия «Juno» (NASA, Юпитер):

Аппарат «Juno», исследующий планету Юпитер, оснащен солнечными батареями, которые были спроектированы для работы в экстремальных условиях. Для этого использовались современные технологии производства и новые материалы, которые позволили улучшить электрические характеристики солнечных элементов, обеспечивая эффективную работу аппарата даже на большом удалении от Солнца.

2. Миссия «Mars Rover» (NASA):

Рoverы, исследующие поверхность Марса, такие как «Opportunity» и «Curiosity», также использовали солнечные батареи для получения энергии. Уникальные методы ориентации солнечных панелей и технологии максимальной точки мощности были реализованы для максимизации эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую.

3. «Международная космическая станция» (МКС):

Солнечные панели на МКС претерпели эволюцию с течением времени. Применение новых материалов и технологий управления энергией позволило увеличить производство электроэнергии, обеспечивая жизненно важные функции станции и эксперименты на борту.

Эти примеры демонстрируют, как технические решения, методы улучшения дизайна, материалов и управления энергией позволяют значительно повысить эффективность и долговечность солнечных элементов в космических условиях, обеспечивая энергию для различных космических миссий и аппаратов.

В заключение, исследования и разработки в области повышения электрических характеристик солнечных элементов для космического применения являются ключевым направлением в современной космической инженерии. Эксплуатация солнечных батарей в условиях космоса представляет значительные технические вызовы, такие как радиационное воздействие, температурные колебания и воздействие микрометеоритов, которые могут негативно повлиять на эффективность и надежность этих систем.

Новые материалы, инновационные решения, использование нанотехнологий и развитие систем управления энергией представляют собой потенциальные пути для улучшения электрических характеристик солнечных элементов. Эксперименты и исследования в этих областях позволяют совершенствовать технологии солнечной энергии, делая их более эффективными, надежными и адаптивными к условиям космоса. Большие перспективы имеют перовскитные солнечные элементы в совокупности с новейшими Российскими разработками в области защитных покрытий.

Благодаря непрерывным исследованиям и инновациям, космическая индустрия будет продолжать совершенствоваться солнечные элементы, обеспечивая стабильное энергетическое обеспечение для космических миссий и способствуя развитию космической науки и технологий в целом.

Список литературы

1. Влияние космической радиации на солнечные батареи искусственных спутников Земли и способы защиты [Электронный ресурс] URL: <https://kazedu.com/referat/96608>. - (дата обращения: 23.11.2023)
2. Влияние температуры и радиации на КПД солнечного элемента [Электронный ресурс] URL: https://ozlib.com/848063/tehnika/vliyanie_temperatury_radiatsii_solnechnogo_elementa. - (дата обращения: 23.11.2023)
3. П.С. Гончаров, М.В. Житный, А.Л. Копейка, А.М. Денисов Результаты моделирования ударного воздействия малоразмерных частиц на солнечные элементы космического аппарата // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2022 — С. 1 – 12.
4. Деградация оптических параметров ФП [Электронный ресурс] URL: https://studbooks.net/1818192/matematika_himiya_fizika/degradatsiya_opticheskikh_parametrov. - (дата обращения: 23.11.2023)
5. В.М Мельников, И.Н. Матюшенко, Н.А. Чернова, Б.Н. Харлов Проблемы создания в космосе крупногабаритных конструкций // Труды МАИ. — 2014 — С. 7.
6. Российские космические аппараты станут надёжнее [Электронный ресурс] URL: <https://www.meteo vesti.ru/news/1693628511900-rossiyskie-kosmicheskie-apparaty-stanut-nadyozhnee> . - (дата обращения: 23.11.2023)
7. S. D. Stranks, G. E. Eperon, G. Granchini, C. Menelaou., Electron-hole diffusion lengths exceeding 1 micrometer in an organometal trihalide perovskite absorber, — Science, 2013 — p.341 7.
8. J. H. Qiu, Y. C. Qiu, K. Y. Yan., All-solid-state hybrid solar cells based on a new organometal halide perovskite sensitizer, — Nanoscale, 2013

References

1. The Influence of Space Radiation on the Solar Panels of Earth's Artificial Satellites and Protection Methods [Online resource] URL: <https://kazedu.com/referat/96608>. - (accessed: 23.11.2023)

2. Influence of Temperature and Radiation on the Efficiency of Solar Cells [Online resource] URL:
https://ozlib.com/848063/tehnika/vliyanie_temperatury_radiatsii_solnechnogo_elementa. - (accessed: 23.11.2023)
 3. P.S. Goncharov, M.V. Zhitny, A.L. Kopeika, A.M. Denisov Modeling Results of Impact on Small Particle Solar Elements of a Spacecraft // Proceedings of Tula State University. Technical Sciences. — 2022 — P. 1 – 12.
 4. Degradation of Optical Parameters of Photovoltaic Elements [Online resource] URL:
https://studbooks.net/1818192/matematika_himiya_fizika/degradatsiya_opticheskikh_parametrov. - (accessed: 23.11.2023)
 5. V.M. Melnikov, I.N. Matyushenko, N.A. Chernova, B.N. Kharlov Issues in Creating Large-Scale Structures in Space // Proceedings of Moscow Aviation Institute. — 2014 — P. 7.
 6. Russian Spacecraft Will Become More Reliable [Online resource] URL:
<https://www.meteo Vesti.ru/news/1693628511900-rossiyskie-kosmicheskie-apparaty-stanut-nadyozhnee> . - (accessed: 23.11.2023)
 7. S. D. Stranks, G. E. Eperon, G. Granchini, C. Menelaou., Electron-hole diffusion lengths exceeding 1 micrometer in an organometal trihalide perovskite absorber, — Science, 2013 — p.341 7.
 8. J. H. Qiu, Y. C. Qiu, K. Y. Yan., All-solid-state hybrid solar cells based on a new organometal halide perovskite sensitizer, — Nanoscale, 2013
-