

Секция 2

Физико-математические науки

Научная статья
УДК 535.016
ББК 22.343
ГРНТИ 29.31.21
ВАК 01.04.05
PACS 73.50.Pz
OCIS 040.5350
MSC 00A79

Полупрозрачные солнечные элементы

К. К. Алтунин ¹

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», 432071,
Ульяновск, Россия*

Поступила в редакцию 10 января 2023 года
После переработки 12 января 2023 года
Опубликована 10 марта 2023 года

Аннотация. Рассмотрены физические свойства полупрозрачных солнечных элементов. В результате анализа зависимости силы фототока кремниевого солнечного элемента со штатным интерференционным просветлением подтверждён факт сильной угловой зависимости интерференционных просветляющих покрытий от угла падения внешнего излучения. В результате анализа зависимости силы фототока кремниевого солнечного элемента с нанокompозитным просветляющим покрытием получена слабая угловая зависимость оптического пропускания нанокompозитных просветляющих покрытий от угла падения внешнего излучения, что играет важную роль в солнечной энергетике в решении проблемы увеличения эффективности солнечных установок.

Ключевые слова: солнечные элементы, солнечные панели, солнечная энергия, кремний, арсенид галлия, приёмник солнечной энергии, фотоэлектрические технологии, технологии концентрирования солнечной энергии, концентрирующие фотоэлектрические системы, интенсивность солнечного излучения

¹E-mail: kostya_altunin@mail.ru

Введение

Физический процесс преобразования солнечной энергии в электрическую энергию является важной научно-технической проблемой, связанной с перспективным направлением энергетики будущего.

В настоящее время интенсивно развиваются технологии создания солнечных панелей на основе кремния, арсенида галлия, а также тройных соединений или более сложных соединений и нанокompозитов.

Актуальность солнечной энергетики постоянно растёт, потому что солнечная энергия является экологически чистой. Вторая причина актуальности использования солнечной энергии заключается в её ресурсоёмкости.

В процессе прохождения коротковолнового солнечного излучения через атмосферу различают следующие виды взаимодействий: поглощение в виде перехода энергии излучения в тепло, возбуждения молекул, с последующим излучением света большой угол; рассеяние в виде изменения направления распространения света в зависимости от угла; отражение, которое не зависит от угла, в среднем около 30% интенсивности космического солнечного излучения отражается обратно в космическое пространство, а большую часть излучения отражают облака, меньшую часть излучения отражают снег и лед на поверхности земли. Таким образом, установкой приёмника солнечной энергии необходимо определить, какое количество энергии требуется собрать, как предлагается использовать собранную энергию. Тогда можно рассчитать размер приёмника.

Обзор научных работ по солнечным панелям

В настоящее время солнечная энергетика как альтернативный возобновляемый ресурс энергии развивается быстрыми темпами. Солнечный свет, возможно, является самым распространенным чистым источником энергии, который способен обеспечить постоянный и устойчивый экономический рост с минимальным пагубным воздействием на окружающую среду. Солнечные элементы из кристаллического кремния постоянно повышают эффективность и снижают стоимость изготовления за последние 40 лет [1–4], а в некоторых местах в мире по текущим ценам они способны производить электричество от солнечного света при сопоставимой стоимости электроэнергии, вырабатываемой из ископаемого топлива [5]. Основные автономные профессиональные приложения находятся для солнечной энергетики в транспортном, телекоммуникационном и нефтяном секторах. Генерация солнечной энергии предлагает аналогичные преимущества в сельских населённых пунктах, не использующих энергосистему, где она может заменить дорогие – и часто опасные – источники энергии, такие как керосин и дизельное топливо. Автономные сельские приложения в принципе охватывают всё, для чего удалённому сообществу может потребоваться электричество.

Фотоэлектрические технологии в их наиболее распространенной форме основаны на полупроводниковых устройствах, которые непосредственно преобразуют оптическую энергию от солнечного света в электрическую энергию. Ключевыми физическими шагами для типичного солнечного элемента с *p-n*-переходом являются оптическое поглощение, посредством которого избыточные электронные и дырочные носители заряда генерируются внутри устройства и разделяются встроенным потенциалом перехода, за которым следует перенос электронов и дырок к их соответствующим контактам. При подключении к резистивной нагрузке фотоэлектрическое напряжение и фототок, генерируемые солнечным элементом, рассеивают мощность, величина которой зависит от эффективности преобразования солнечной энергии солнечного элемента и интенсивности падающего солнечного излучения. Очевидная простота солнечного элемента в сочетании с огромным избытком чистых, возобновляемых и относительно негеополи-

тических ресурсов солнечной энергии, доступных нашей планете (приблизительно 89000 тераватт на поверхности Земли), в течение многих лет вызывали интерес к фотоэлектрическим технологиям. С начала 2000-х годов этот импульс был особенно сильным в условиях растущей глобальной индустриализации и её влияния на доступ к традиционным ископаемым видам топлива и их использование.

История и развитие технологии солнечных элементов были замечательными благодаря огромному прогрессу в эффективности преобразования солнечной энергии и широте материалов, используемых в фотоэлектрической технике. Никогда ещё время не было так важно, как сейчас, чтобы этот чистый и богатый источник энергии стал главным, если не доминирующим компонентом энергетического ресурса человечества. В работе [6] представлен исторический обзор с первых дней фотоэлектрических исследований и разработок до наших дней, когда была широко продемонстрирована эффективность, превышающая 40%, кремниевые фотоэлектрические системы дали характеристики, близкие к теоретическим границам для этой материальной системы, поликристаллических тонких плёнок на недорогих подложках находятся на пути к экономической жизнеспособности, и физика на основе наноструктур адаптируется для использования в новых поколениях фотоэлектрических технологий.

Энергия солнца создаётся реакцией ядерного синтеза водорода и гелия, которая происходит внутри Солнца на несколько миллионов градусов [7]. Разница в массе, возникающая в этом процессе, преобразуется в энергию. Поскольку Солнце находится в радиационном равновесии с холодной Вселенной, это, главным образом, определяется температурой его поверхности. Солнечная энергия, которая достигает поверхности земли, определяется соотношением диаметров Солнца и Земли и их расстоянием друг от друга. Как погодные, так и погодные условия оказывают большое влияние на состав излучения. Рассеянный свет содержит большую долю синего излучения. В лаборатории и при производстве солнечных элементов имитаторы Солнца очень близко аппроксимируют этот спектр, используя свет от ксеноновой лампы сверхвысокого давления через различные фильтры.

Концентрация солнечной энергии, также известная как солнечная тепловая электрическая энергия, представляет собой класс солнечных технологий, использующих концентрирующие солнечные коллекторы для фокусирования прямого компонента солнечного света на приёмнике, где солнечная энергия поглощается и нагревает рабочую жидкость, которая приводит в движение двигатель или электрогенератор, производящий электроэнергию. В концентрирующейся солнечной энергетической системе солнечное тепло заменяет сжигание ископаемого топлива, такого как уголь и природный газ, в обычной системе выработки электроэнергии коммунального масштаба для производства электроэнергии. Технологии концентрирования солнечной энергии являются тепловыми системами и не включают в себя концентрирующие фотоэлектрические системы.

Технологии концентрирования солнечной энергии включают в себя две основные архитектуры: системы точечного и линейного фокусирования. Различные типы концентраторов используются для каждого типа системы: силовые башни и тарелки, которые являются системами точечной фокусировки; и параболические желоба и линейные системы Френеля являются системами линейного фокуса. Каждая система производства электроэнергии имеет свой уникальный набор характеристик, включая коэффициент концентрации (способность концентрировать солнечный свет), рабочую жидкость, совместимость цикла питания, рабочую температуру и стоимость.

Одной из основных характеристик концентрирующих солнечных энергетических систем является способность интегрировать экономичное накопление тепловой энергии в виде расплавленных натриево-калиевых нитратных солей. В то время как концентри-

рующие солнечные энергетические системы без накопителя тепловой энергии обладают «тепловой инерцией», которая позволяет им работать через скромные переходные процессы в облаках, добавление накопителя тепловой энергии к системе увеличивает диспетчеризацию электричества и стоимость электричества, произведённого для коммунального предприятия.

В статье [8] рассматриваются устройство и применение в архитектуре солнечных батарей и панелей, а также классифицируются фотогальванические модули по методике изготовления, структуре, видам, уровню коэффициента полезного действия.

В работах [9, 10] описана конструкция солнечной теплофотоэлектрической кровельной солнечной панели, предназначенной для электрогенерации и теплогенерации, а также представлены результаты испытаний фотоэлектрических кровельных панелей планарной и концентраторной конструкций. Для улучшения охлаждения солнечных элементов и съёма тепловой энергии разработаны методики для проектирования и оптимизации солнечных теплофотоэлектрических модулей, которые позволяют создавать такие модули, визуализировать тепловые процессы, происходящие в них и делать выводы о целесообразности той или иной конструкции. В качестве реализации разработанных методик предложена конструкция солнечной теплофотоэлектрической кровельной панели, которая наряду со строительно-защитной функций позволяет потребителю получать электричество и тепловую энергию. В статье [10] рассматривается процесс изготовления и результаты испытаний солнечной фотоэлектрической кровельной панели планарной и концентраторной конструкции. Рассматриваемые солнечные кровельные панели изготавливаются по технологиям ламинирования и капсулирования двухкомпонентным полисилоксановым компаундом. В качестве результатов испытаний приведены физико-энергетические характеристики разработанных кровельных панелей. Для увеличения эффективности солнечных элементов представлена конструкция солнечной теплофотоэлектрической черепицы.

В статье [11] рассматриваются достоинства и недостатки готовых модульных навесных и полунавесных термопанелей и солнечных панелей, обеспечивающих энергоэффективность фасадных систем. Отмечается, что находящиеся внутри панелей высокотехнологичные и лёгкие термопрофили повышают сопротивление теплопередачи.

В статье [12] описаны экспериментальные исследования эффективности солнечных панелей в качестве дополнительной экранной защиты служебного модуля Международной космической станции, произведена оценка баллистического предела существующей экранной защиты служебного модуля при дополнительном экранировании солнечной панелью, которая даёт основание провести корректировку методики пересчёта баллистических зависимостей с учётом экранирования солнечными панелями служебного модуля в гиперзвуковой области в части увеличения максимального баллистического предела в 1.5 раза.

В статье [13] описана разработка методики по определению минимальной температуры воздуха внутри помещения при дежурном режиме отопления в случае использования в окнах теплоотражающих экранов с применением многофункциональных энергоэффективных ставень с солнечной батареей.

Разработка энергосберегающей системы отопления солнечными жидкостными панелями, позволяющее в летнее время уменьшить расход энергоресурсов на подогрев до 5-10% общего расхода, описана в статье [14].

Разработка конструкции системы отопления и электроснабжения солнечными жидкостными панелями описана в работе [15].

В статье [16] рассматриваются солнечные панели как энергоэффективная замена обычных окон.

В статье [17] рассматривается два способа повышения эффективности солнечных

батарей — это оптимизация положения панелей и концентрирование световых лучей на солнечную панель. Оптимизация положения панелей, то есть непрерывное слежение за Солнцем в течение суток требует постоянного перпендикулярного положения панелей к солнечным лучам. Второй способ повышения эффективности солнечных батарей основан на установке солнечной панели с оптическими системами, то есть увеличения плотности энергии падающих солнечных излучений с помощью концентраторов.

В процессе модернизации энергоэффективных технологий привычные солнечные панели в скором времени может заменить солнечная черепица. Несмотря на очевидные преимущества, черепица ещё не обладает должной конкурентоспособностью и используется редко. В работе [18] представлено сравнение обычных солнечных панелей с черепицей, рассмотрена возможность их применения в климатических условиях южной части России.

В статье [19] представлен обзор основных проблем солнечной электроэнергетики и разработок в области альтернативной энергетики.

В течение почти шестидесяти лет солнечная энергия для космических применений основывалась на неорганических фотоэлектрических системах, развивающихся от солнечных элементов, изготовленных из одного кристаллического кремния, до тройных соединений на основе сплавов германия и соединений $A^{III}B^V$. Класс фотовольтаических элементов на основе органических веществ, который варьируется от полностью органических до гибридных перовскитов, имеет потенциал стать прорывной технологией в космических применениях благодаря уникальной комбинации привлекательных внутренних свойств (например, запись высокой удельной мощности, настраиваемого окна поглощения) и возможности обработки.

Почти каждому искусственному устройству требуется энергия, чаще всего в виде электричества. Эта потребность движется вместе с устройством, когда выходим за пределы Земли. Чтобы обеспечить более длительный срок службы и снизить нагрузку, спутники на солнечной энергии были введены в конце пятидесятых годов, вскоре после общемирового объявления об успешном преобразовании солнечной энергии [20]. Таким образом, фотовольтаика позволила получить поистине возобновляемую и бесконечно избыточную энергию, стоимость которой определяется только первоначальными инвестициями для производства солнечных панелей и, когда это предусмотрено как источник энергии для космических аппаратов, их вывод из орбиты. Стоимость последнего быстро возрастает с массой объекта, приносимого в космос, что является ключом к потенциальным преимуществам ультратонких солнечных элементов. По этой причине уже с 1960-х годов космическая промышленность рассматривала внедрение тонкоплёночных солнечных элементов CuS_2 , CdS и $CdTe$ на всё более энергоёмких коммуникационных спутниках, но в конечном итоге оставалась ориентированной на более надёжном кремнии [21].

В статье [22] сообщается о результатах исследования фотоэмиссии и оптических исследованиях образцов аморфного кремния, тщательно подготовленных для минимизации влияния дефектов. Кривые выхода фотоэмиссии и распределения энергии были получены от 5.5 до 11.7 эВ, а данные отражательной способности были измерены от 0.4 до 11.8 эВ. Оптические константы были определены с помощью анализа Крамерса-Кронига. Не найдено никаких свидетельств того, что волновой вектор \mathbf{k} обеспечивает значительное квантовое число в аморфном кремнии.

Тем не менее, уже в области аэрокосмической отрасли [23] и для органических и гибридных полупроводников [24, 25] удельная мощность (Вт/кг) была предложена как действительная цифра в качестве достойной оценки технологий фотовольтаики для космических полётов. В связи с этим органические солнечные элементы и гибридные органически-неорганические перовскитные солнечные элементы, называемые вме-

сте как гибридные и органические фотовольтаики, значительно превосходят их неорганические аналоги [24–26]. Они представляют собой две новые отрасли технологий фотовольтаики, которые увидели рост в течение последнего десятилетия (последние несколько лет в случае перовскитных солнечных элементов) благодаря их потенциально очень низким издержкам производства. Высокое поглощение фотоактивных слоёв в гибридных и органических фотовольтаиках позволяет эффективно собирать свет в пределах нескольких сотен нанометров материала, что приводит к толщине на один-два порядка ниже, чем у неорганических тонких фотоэлектрических элементов. Остальные слои, составляющие стеки солнечных элементов, либо тонкие, либо сверхтонкие, чем поглотители, с единственным ограничением по толщине (и, следовательно, массе) происходит от подложки и инкапсуляции, которая может состоять из гибкой пластиковой плёнки толщиной несколько микрометров [24, 25]. Конкретная мощность, достигнутая к настоящему времени для перовскита (23 кВт/кг) [24] и органических (10 кВт/кг) [25] солнечных элементов, таким образом, превышает 20 или 10 раз больше, чем требуется некоторыми из новых миссий, которые предполагают необходимость снижения веса и снижения затрат на развертывание [21]. Высокая удельная мощность не является единственной привлекательной особенностью этих устройств. Указанная низкая стоимость изготовления обусловлена их внутренней совместимостью с методами низкотемпературной печати.

В течение последнего десятилетия двумерные твёрдые кристаллы привлекали большое внимание их уникальными особенностями, которые очень нужны для применений в оптоэлектронике, фотонике и термоэлектрике [27–29]. Их интригующие характеристики, такие как гибкость, прозрачность и сверхтонкость, делают их более удобными для сыпучих материалов в ультрасовременных наноразмерных технологиях. Ультратонкая геометрическая структура двумерных материалов приводит к эффектам квантового удержания в одном направлении, которые развивают много интересных особенностей в электронных и оптических свойствах двумерных материалов [27].

Различные оксиды перовскита неустанно исследовались в течение последних десятилетий как источник множества физических явлений, таких как упорядочение заряда, колоссальное магнитосопротивление, сверхпроводимость, сегнетоэлектричество, колоссальные магнитоэлектрические эффекты или фотовольтаический отклик [30–33]. Окислы марганца в настоящее время исследуются в физике конденсированных сред, и их популярность достигает уровней, сравнимых с уровнями высокотемпературных сверхпроводящих купратов.

В статье [34] представлена математическая модель солнечной панели, реализованная в программном математическом пакете MATLAB/Simulink. Для построения модели используется эквивалентная схема замещения солнечного элемента с одним диодом без учёта параллельного сопротивления. Последовательное сопротивление солнечной панели рассчитывается с помощью итерационного метода Ньютона с использованием данных её технической спецификации, что обеспечивает высокую точность моделирования. Адекватность модели оценивалась по известным техническим характеристикам модуля Solarex MSX 60. Полученные модельные вольт-амперные и вольт-ваттные характеристики модуля хорошо согласуются с данными завода изготовителя. Модель выполнена в виде отдельной подсистемы с возможностью ввода основных параметров через диалоговое окно, что позволяет легко её модифицировать. Кроме того, модель позволяет получать характеристики солнечных элементов различных типов и производителей, а также может использоваться для построения моделей солнечных панелей и фотоэлектрических систем произвольной конфигурации на их основе.

При преобразовании солнечной энергии в электрическую фотоэлектрическими преобразователями для получения максимального коэффициента полезного действия плос-

кость солнечных панелей должна быть перпендикулярной солнечному излучению. Для эффективного функционирования двухкоординатного электропривода ориентации солнечных панелей необходимо определять азимут Солнца и его высоту над горизонтом в месте их расположения [35].

В статье [36] рассматривается движение солнечной панели в непрерывном режиме слежения за Солнцем путём смещения угла наклона и направления установки солнечной панели, а также разработан алгоритм движения следящей за Солнцем подвижной панели.

В статье [37] установлены закономерности поступления солнечной энергии на солнечную панель закрепленную стационарно и постоянно ориентированную системой позиционирования перпендикулярно солнечному излучению. Выявлено влияние защитного остекления на уменьшение количества поступления энергии на приёмник солнечной панели в течение дня. Установлено относительные потери энергии в стационарно смонтированных солнечных панелях по сравнению с ориентацией их системой позиционирования. Расчёт мощности солнечных панелей представлен в [38].

В статье [36] рассматриваются основные угловые параметры, определяющие положение Солнца относительно Земли. Были выявлены и рассмотрены три варианта размещения подвижной и неподвижных солнечных панелей. Рассмотрение каждого варианта осуществлялось на основании мощностных показателей солнечной панели в течении одного календарного года. На основании полученных результатов был определён наиболее оптимальный вариант установки расположения солнечной панели относительно положения Солнца.

В статье [39] предложен телевизионный метод контроля люминесцирующих дефектов солнечных элементов, позволяющий определить потери на каждой ячейке и оценить эффективность преобразования солнечной панели в целом.

В статье [40] исследованы зависимости поглощательной способности полупроводников от толщины поглощающего слоя: кристаллического кремния, аморфного кремния, теллурида кадмия, диселенида индия и диселенида галлия.

За последние годы заметно выросло количество малогабаритной микроэлектронной аппаратуры с батарейным питанием, в том числе планшетных персональных компьютеров, карманных видеоигр, автономных видеопроигрывателей, цифровых фоторамок. Обычно в такой аппаратуре используются литий-ионные аккумуляторные батареи. Применение малогабаритных солнечных панелей для подзарядки литий-ионных аккумуляторных батарей рассмотрено в работе [41].

В статье [42] рассматривается моделирование солнечной панели в среде MATLAB. Модель разработана с использованием основных уравнений фотоэлектрических солнечных элементов, которые учитывают воздействия уровня солнечного излучения и перепадов температур. Проведена экспериментальная проверка расчетных соотношений MATLAB-модели на солнечной панели типа TCM-210SB.

В статье [43] рассмотрен алгоритм сборки уравнений кинетической энергии многозвенных механизмов с использованием матричного метода в среде графического программирования LabVIEW.

Существуют три вида установки панелей: на земле, на крыше здания, на фасаде здания. В работе [44] рассмотрено влияние ошибок ориентирования солнечных панелей на возникающие из-за них эксплуатационные проблемы. Сделан вывод о большей эффективности использования солнечных панелей, установленных на земле и на крыше здания. В работе [44] установлено, что система слежения за Солнцем повышает эффективность использования солнечных панелей, но увеличивает её стоимость.

В работах [45, 46] предлагается электрогенерирующий материал покрытия в виде черепицы из переработанных материалов на основе солнечных элементов и concentra-

тора солнечного излучения. Рассматриваются две версии солнечной черепицы — версия без концентраторов с планарными солнечными элементами и гелем, увеличивающими их срок службы, и солнечной черепицы с концентраторами, нарезанными солнечными элементами, гелем, концентратором солнечного излучения и оптической отклоняющей системой в виде призмы. Наряду со строительным значением солнечная черепица позволяет решить проблему выработки электроэнергии, увеличения срока службы солнечных модулей и вторичного использования пластиковых отходов.

Солнечная энергетика приближается к состоянию паритета цен с сетью, в котором она может составить ценовую конкуренцию традиционной энергетике [47].

В статье [48] рассматриваются возможности и экономические преимущества, которые может предложить новое оборудование для производства солнечной энергии. Основная идея состоит в том, чтобы использовать высотную аэростатическую платформу для поддержки фотоэлектрических модулей, чтобы существенно увеличить их мощность благодаря значительно усиленной солнечной радиации на рабочей высоте аэростата. Затем электрическая энергия передаётся на землю с помощью швартовного аэростата. Техническая осуществимость концепции демонстрируется с помощью стандартных уравнений и реалистичных значений для соответствующих инженерных параметров, которые описывают технические свойства материалов и подсистем. Тем не менее существуют проблемы, которые необходимо решить для повышения производительности; однако ни одна из этих проблем не считается отрицательной с технической точки зрения этой концепции. Предварительная модель затрат проиллюстрирована, и с использованием данных о единичных затратах для различных материалов и подсистем показано, что можно определить конкретный размер, который минимизирует стоимость произведённой энергии.

Совместное производство электроэнергии с помощью ветра и солнечной энергии является очень привлекательным решением для изолированных регионов с высоким уровнем годовой энергии ветра и инсоляции. В статье [49] разработана компьютерная модель для моделирования энергосистемы острова Средиземноморья, включая ветряную электростанцию, фотоэлектрическую электростанцию и систему хранения. Чтобы получить общее представление о производительности системы и экономических аспектах, модель также включает в себя несколько дизель-генераторов. Комбинированная система умеренных размеров может обеспечить значительную долю потребностей в электрической энергии. Различные параметры, рассчитанные при моделировании, могут быть использованы для улучшения конфигурации системы и оценки стоимости единицы электрической энергии.

В работе [50] представлены результаты исследования оптимальных параметров просветляющих покрытий солнечных панелей в зависимости от широты расположения солнечной электростанции.

Повышение энергоэффективности здания имеет большое значение для энергосбережения и защиты окружающей среды. Когда имеется несколько зданий с солнечной энергетикой и батареями, подключенными к микросети, координация распределенного энергопотребления и потребления может существенно повысить энергоэффективность. В статье [51] рассматривается проблема существенного повышения энергоэффективности солнечных батарей и вносятся следующие три основных вклада. Во-первых, сформулирована оптимизация работы микросети зданий как двухэтапную задачу стохастического программирования. Во-вторых, задача превращается в стохастическое смешанно-целочисленное линейное программирование. Затем метод сценария используется для решения проблемы. В-третьих, представлены тематические исследования университетского городка. Численные результаты показывают, что согласование распределенной солнечной энергии и батареи может снизить эксплуатационные расходы микросети.

В работе [52] описаны последствия использования плавникового коллектора при фокусировке солнечных коллекторов изучены и, как установлено, имеют свои преимущества. Уже много лет цилиндрическая парабола является потенциальной системой концентрации солнечного света. Он используется с плоскими или цилиндрическими приёмниками, расположенными перпендикулярно оптической оси параболы. Кажется, однако, что не было намного меньше ссылок на приёмники, расположенных вдоль оптической оси. Аксиально расположенный плоский приёмник (ребро) будет получать концентрированное солнечное излучение с обеих сторон. Следовательно, в этом случае не будет необходимости изолировать любую сторону приёмника. Кроме того, использование ребристого приёмника, обеспечивающего почти равные температуры на двух его поверхностях, может обеспечить дополнительные преимущества с точки зрения теплового дизайна.

Геометрическое поведение фокусирующего параболического жёлоба с ребристым приёмником было детально изучено с учётом интересного применения этой системы для фотоэлектрического преобразования солнечной энергии через солнечные элементы с двусторонним и многопереходным освещением по краям. В работе [53] представлены результаты, касающиеся влияния ошибок наведения жёлоба и ошибок выравнивания ребра на геометрическую концентрацию системы.

В статье [54] рассмотрено электроснабжение зданий с помощью солнечных панелей, рассмотрено устройство, принцип работы, классификация солнечных панелей.

В статье [55] проведен анализ эффективности солнечных панелей, представлены основные производители солнечных панелей и приведены их краткие характеристики. Наиболее эффективными на сегодняшний день являются монокристаллические солнечные панели, недостаток которых состоит в дороговизне. Наиболее оптимальными как по эффективности, так и по цене являются плёночные солнечные панели.

В работе [56] рассматриваются следующие четыре приложения, которые были наиболее распространены в течение нашего времени: насосная, медицинские учреждения, освещение и сельское сообщество. Поскольку солнечная энергия стала дешевле и надёжнее, она смогла заменить первичные батареи в портативных устройствах. Энергия от солнечных установок в зданиях может быть поставлена непосредственно жителям, вытесняя электричество, которое они иначе купили бы от сети.

В статье [57] предложено рациональное распределение солнечных панелей на сферическом архитектурном куполе с учётом климатических, синоптических, географических, метеорологических условий.

В контексте недавнего истощения запасов ископаемого топлива и проблем с ядерной энергией возрастают ожидания в отношении солнечной, ветровой, геотермальной энергии, биомассы и других природных энергий. Был проведён ряд исследований по применению солнечной энергии для восстановления металлов из оксидов металлов, для накопления энергии в виде разности химического потенциала и для получения водорода. Однако при прямом использовании солнечной энергии эффективность снижения составляет всего несколько процентов, что пока неосуществимо. Потому что в этом методе восстановления заключается в диссоциации кислорода и металлов при высокой температуре, которая была проведена в течение длительного времени, и оксиды металлов не могут быть нагреты до более чем около 3000 К даже с использованием солнечного света. Чтобы добиться эффективного восстановления металлов из оксидов металлов, необходима температура в несколько десятков тысяч градусов Цельсия [58].

В работе [59] предлагается генератор на солнечной батарее с инъекцией с тактовой частотой 2.4 ГГц, работающий на солнечной энергии с автономным питанием, обладающий высокой энергоэффективностью. Генератор с тактовой частотой 2.4 ГГц, работающий на солнечной энергии, с инъекционной блокировкой разработан для усиления

собираемых низкочастотных радиочастотных сигналов для сбора энергии. Солнечная панель с цепью регулятора напрямую преобразует солнечную энергию в электроэнергию генератора с инжекционной блокировкой впрыска. Метод прямого впрыска используется для уменьшения мощности, потребляемой генератором на солнечной батарее с инжекцией.

Наиболее важными аспектами любой опреснительной установки являются расходы на техническое обслуживание и эксплуатацию. Для солнечного опреснения воды снижение затрат и производство воды высшего качества по-прежнему являются решающими факторами, которые привлекают исследователей. Неисправности в конструкции систем опреснения воды могут привести к многочисленным проблемам технического обслуживания и эксплуатации в этих системах и могут привести к увеличению стоимости воды и/или снижению качества воды. В работе [60] предлагается аналитическое исследование конструктивных соображений и их влияния на эксплуатацию и техническое обслуживание опреснительных установок, работающих на солнечной энергии, таких как производительность, местоположение, технология, требования, технические характеристики воды, срок службы, доступность, надёжность и ресурсы. В работе [60] также представлен обзор факторов и компонентов затрат на опреснение по сравнению с другими альтернативами водоснабжения и традиционными методами опреснения воды; обсуждает проблемы и восприятие; и освещает последние разработки в технологии солнечного опреснения воды, которые влияют на общую стоимость доставки воды и отношения с эксплуатацией и техническим обслуживанием.

Функционирование электроэнергетических систем сегодня сталкивается с растущим уровнем неопределённости в поставках электроэнергии, вызванным всё большей и большей долей возобновляемых источников энергии в структуре генерации. Проблемы принятия решений, эксплуатации и планирования на рынках электроэнергии могут характеризоваться изменяющимися во времени и асимметричными затратами. Эти асимметричные затраты вызваны необходимостью постоянно балансировать систему электроснабжения, чтобы гарантировать надёжную и безопасную подачу электроэнергии. Следовательно, понимание удовлетворительной неопределённости необходимо для удовлетворительного управления системой электроснабжения. Это создаёт необходимость в прогнозах, описывающих все варианты возобновляемого поколения. Вероятностные прогнозы производства возобновляемой энергии предоставляют пользователям ценную информацию о неопределённости, связанной с ожидаемым производством. Текущие современные прогнозы солнечного излучения были сосредоточены на получении надёжных точечных прогнозов. Дополнительная информация, включенная в вероятностные прогнозы, может иметь первостепенное значение для лиц, принимающих решения, чтобы эффективно использовать это неопределённое и переменное поколение. В статье [61] предлагается структура стохастического дифференциального уравнения для моделирования неопределённости, связанной с прогнозом точки солнечного излучения. Такой подход к моделированию позволяет охарактеризовать как структуру взаимозависимости ошибок прогнозирования кратковременного солнечного излучения, так и их прогнозное распределение. Три различные модели стохастических дифференциальных уравнений сначала подгоняются к набору обучающих данных, а затем оцениваются на однолетнем тестовом наборе. Окончательная предложенная модель определена в ограниченном и изменяющемся во времени пространстве состояний с почти нулевой вероятностью почти всех событий за пределами этого пространства.

Совместное использование чистых технологий может привести, помимо прочего, к снижению воздействия на окружающую среду, повышению эффективности системы, лучшему управлению нехваткой земли и уменьшению влияния изменчивости мощности прерывистых источников чистой энергии. Тем не менее, частные инвесторы, стал-

квивающиеся с бюджетными ограничениями, предпочтут инвестировать в комбинацию технологий только в том случае, если последняя будет более выгодной, чем инвестиции в одну технологию [62].

В статье [63] исследованы особенности физической расходимости поляризованной восприимчивости третьего порядка, которая представляет собой фотоиндуцированный ток в смещенных кристаллических изоляторах. Этот ток растёт квадратично со временем освещения при отсутствии релаксации импульса и насыщения.

Большинство фотоэлектрических поглотителей идентифицируются с использованием стандартного принципа выбора Шокли-Кейссера, который основан на оптимальных значениях ширины запрещённой зоны. Однако этот критерий оказался недостаточным, поскольку многие материалы с соответствующими значениями по-прежнему работают плохо. В статье [64] использовали расчёты, основанные на теории функционала плотности, для оценки трёх оксидов меди в качестве потенциальных фотоэлектрических материалов.

Работа солнечных элементов и солнечных панелей на основе молекулярных электронных материалов ограничена относительно высокими безызлучательными потерями напряжения. Считается, что основным путём безызлучательной рекомбинации в устройствах с органическим донорно-акцепторным гетеропереходом является распад возбуждённого состояния с переносом заряда в основное состояние посредством передачи энергии колебательным модам [65].

Проблемы образования в области возобновляемой электроэнергетики и электротехники обсуждаются в работе [66].

Теория процессов в полупрозрачных солнечных элементах

Взаимодействие между светом и веществом, которое приводит к различным интересным явлениям, обычно сильно зависит от структурной симметрии и степени упорядочения в естественных или искусственных материалах. Исходя из существования или отсутствия дальнего и ближнего порядка, материалы (или структуры) могут обладать периодическим, квазипериодическим и случайным порядком соответственно. В частности, периодические структуры имеют как дальний, так и ближний порядок; квазипериодические структуры имеют дальний порядок, но и ближний беспорядок; а случайные структуры не имеют ни дальнего, ни ближнего порядка. Хорошо известно, что периодичность в структурах приводит к различным важным эффектам, например, что иллюстрирует теорема Блоха, в физике твёрдого тела.

Проектирование полупрозрачных солнечных элементов приводит к выбору компромисса между прозрачностью и эффективностью, поскольку прошедший свет не может быть преобразован в энергию полностью. Однако глаза человека чувствительны только к небольшому диапазону электромагнитного спектра. Признавая это, работают над компромиссом эффективности и прозрачности.

Как показано на рис. 1а, более половины входящих фотонов с энергиями выше запрещённой зоны кремния лежат вне видимого спектра и в основном в инфракрасной области электромагнитного спектра. В то время как фотоны в видимом спектре более энергичны, стандартные полупроводниковые солнечные элементы генерируют один носитель для каждого поглощенного фотона над запрещённой зоной независимо от частоты. Поэтому, адаптируя спектр поглощения стандартного полупроводникового солнечного элемента, чтобы он поглощал весь входящий инфракрасный свет над энергией запрещённой зоны при передаче всего видимого света, теоретически можно достичь прозрачного солнечного элемента с высокой эффективностью. Более подробный расчёт этого теоретического предела показывает, что предел эффективности Шокли-Кейссера для такого прозрачного солнечного элемента равен 21%, что почти на две

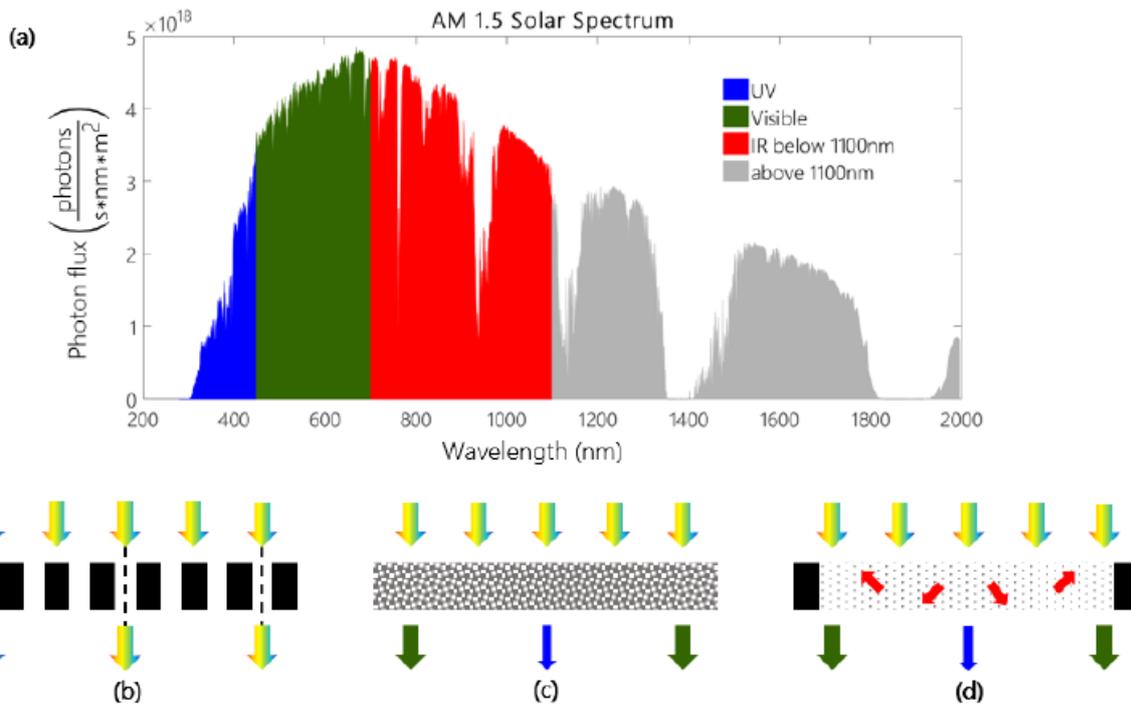


Рис. 1. Существующая технология прозрачных солнечных элементов. (а) Входящий поток фотонов от Солнца, разделённый на ультрафиолетовый, видимый и инфракрасный свет выше запрещённой зоны кремния. (б) Полупрозрачная ячейка, полученная из протравленной стандартной ячейки. (с) Полупрозрачная ячейка с частотно-избирательным активным слоем. (д) Полупрозрачный люминесцентный солнечный концентратор, который направляет преобразованный вниз свет на стандартные солнечные элементы.

трети превышает предельный коэффициент полезного действия для полупроводниковых солнечных элементов с одним соединением.

В то время как полупрозрачные солнечные элементы могут в принципе достичь достаточно высокой эффективности, существующие технологии ограничены несколькими ограничениями. Наиболее эффективная действующая стратегия, показанная на рис. 1b, достигает эффективности до 10%, но остаётся относительно непрозрачной. Эти ячейки состоят из традиционных полупроводниковых солнечных элементов с зазорами, вытравленными на их поверхности. Такая компоновка создает эффект, подобный экранированному крыльцу, когда достаточное количество света проходит сквозь эти человеческие глаза, может видеть изображение, но результирующее изображение размыто и затемнено, делая очевидным наличие солнечного элемента. Поскольку эти ячейки не могут различать видимый и невидимый свет, они действительно ограничены компромиссом между прозрачностью и эффективностью.

Другие полупрозрачные солнечные элементы включают в себя органические солнечные элементы, солнечные элементы с квантовыми точками и прозрачные люминесцентные солнечные концентраторы. На рис. 1c показана ячейка, в которой сам активный материал предназначен для поглощения невидимого света, такого как полупрозрачная органическая ячейка или ячейка квантовой точки. На рис. 1d показаны прозрачные люминесцентные солнечные концентраторы, в которых молекулярные красители поглощают входящий невидимый свет и переизлучают энергию со сдвинутой частотой, которая затем направляется полным внутренним отражением в волноводе к стандартному солнечному элементу. Поскольку в этих стратегиях используются материалы, которые поглощают невидимый свет, они достигают очень высокой прозрачности, до 84% в случае прозрачных люминесцентных солнечных концентраторов.

Рассмотрим шестиугольные синусоидальные наноструктурные покрытия солнечных элементов. Шестиугольные синусоидальные наноструктуры могут быть описаны с помощью уравнения

$$\mathcal{A}(x, y; \phi, h) = \frac{h}{H(\phi)} \cos \left[\frac{1}{2} (x + \sqrt{3}y) \right] \cos \left[\frac{1}{2} (x - \sqrt{3}y) \right] \cos (x + \phi) , \quad (1)$$

где фаза структуры ϕ позволяет сформировать гексагональную текстуру. Установка $\phi = 0$ приводит к тому, что называется структурой положительного косинуса (“+ cos”), тогда как $\phi = \pi$ формирует структуру отрицательного косинуса (“- cos”).

Архитектура ячейки рассмотрена в моделировании с использованием конечных элементов с двухсторонней текстурированной верхней ячейкой. На рис. 2 показана отрицательная косинусная наноструктура, для положительной косинусной текстуры ориентация текстуры меняется на противоположную. Для моделирования методом конечных элементов верхняя и нижняя области моделирования заключены соответственно полупространствами воздуха и кремния. Свет падает из воздушного пространства (сверху).

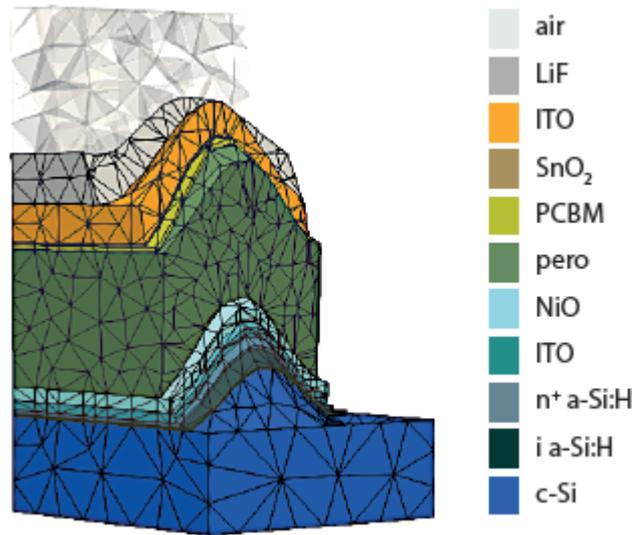


Рис. 2. Архитектура двухсторонней текстурированной ячейки.

Требуемая высота от вершины до долины h задается как входное значение; $H(\phi)$ высота от вершины до долины ненормированной текстуры

$$H(\phi) = \frac{3\sqrt{3}}{4} \sin \left(\frac{\phi + \pi}{3} \right) . \quad (2)$$

Для структурных фаз имеем $H(0) = H(\pi) = \frac{9}{8}$.

Функция масштабируется до желаемого периода P , который является стороной длины элементарной ячейки в форме ромба, с заменой

$$x \rightarrow \frac{2\pi}{\sqrt{3}P} x , \quad (3)$$

$$y \rightarrow \frac{2\pi}{\sqrt{3}P} y . \quad (4)$$

Соотношение сторон a определяется как $a = h/P$; малые или большие значения a приводят к довольно плоским или крутым текстурам, соответственно.

Рассмотрим обоснованность ламбертовской аппроксимации. В моделировании методом конечных элементов обрабатываем слой кремния как бесконечно толстый слой,

представленный идеально подобранным слоем. Для оценки поглощения в слое кремния толщиной 160 мкм с идеальным захватом света умножим поглощение для бесконечного слоя кремния A_{Si}^{∞} (что эквивалентно передаче в этот слой) с фактором, связанным с пределом Тиедье-Яблоновича,

$$A_{Si}(\lambda, L) = A_{Si}^{\infty}(\lambda) \frac{\alpha(\lambda)}{\alpha(\lambda) + (4 [n_{Si}(\lambda)]^2 L)^{-1}}, \quad (5)$$

где L и n_{Si} – толщина слоя и действительная часть показателя преломления кремния соответственно. Кроме того, предположим, что оптическое поглощение всех остальных слоёв не подвержено влиянию; разница между поглощением в бесконечном слое кремния и пределом Тиедье-Яблоновича была добавлена к отражательной способности R ,

$$R(\lambda, L) = R^{\infty}(\lambda) + A_{Si}^{\infty}(\lambda) - A_{Si}(\lambda, L). \quad (6)$$

Можно сказать, что выбранное приближение для расчёта отражательной способности, основанное на пределе Тиедье-Яблоновича, хорошо подходит для оценки поглощения кремниевой солнечной панели, которое будет присутствовать в реалистичном стекле солнечных элементов с пирамидальным обратным рефлектором. Хотя этот предел немного переоценивает поглощение по сравнению с более реалистичным случаем, разница достаточно мала, чтобы оценка оставалась полезной.

Зависимость фототока в кремниевом солнечном элементе от угла падения внешнего светового потока

Технология нанесения плёнок из нанокompозитных материалов из полиметилметакрилата с наночастицами серебра позволяет получать однородные толстые плёнки толщиной 30-80 мкм на поверхностях стекла, кремния различной площади. При этом достигается выполнение необходимых технических условий, а именно, стабилизация поверхности наночастиц серебра, равномерное распределение наночастиц серебра в полимерной матрице, изоморфизм наночастиц.

Известно, что интерференция естественного света в толстых плёнках, толщина которых значительно больше длины волны падающего света, невозможна, если плёнки изготовлены из обычных прозрачных материалов. Это связано с отсутствием пространственной когерентности волн на границах плёнки даже для световых волн высокой монохроматичности. В толстых плёнках в поле естественного света, содержащего пути с различными волновыми векторами, разность хода на границах толстой плёнки становится случайной величиной, и интерференция не наблюдается.

Представляет значительный интерес исследование при воздействии на поверхность образца плёнки из нанокompозитного материала из полиметилметакрилата с наночастицами серебра направленных световых пучков.

На рис. 3 представлены экспериментальные результаты исследования фототока в кремниевом солнечном элементе, поверхность которого покрыта нанокompозитной плёнкой из полиметилметакрилата с наночастицами из серебра. В качестве источника света использована галогеновая лампа. Открытый световой поток с помощью конденсора формирует практически коллимированный поток света. Угол поворота образца от 0 до 90 градусов. Расстояние от выходной плоскости лампы до образца 15 см, освещенность регулируется электрическим образом, изменяя питание лампы.

Эффективность солнечных элементов определяется по формуле:

$$\eta = \frac{I_{sc} V_{oc} F F}{E A_c}, \quad (7)$$

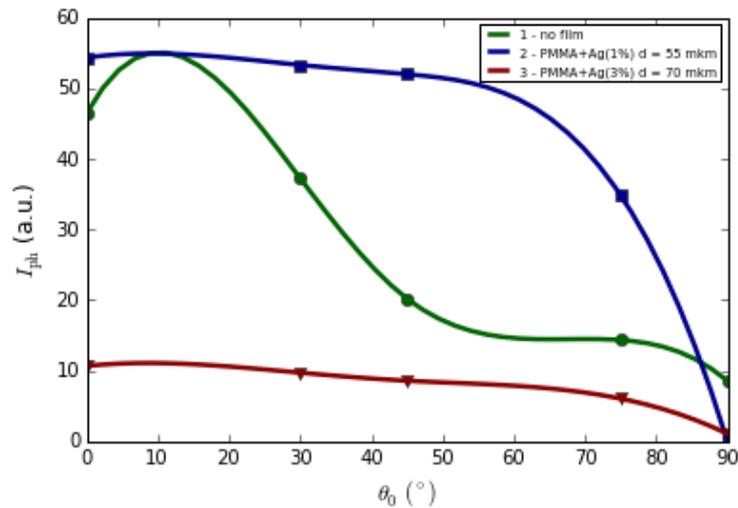


Рис. 3. Зависимость фототока в кремниевом солнечном элементе от угла падения внешнего светового потока.

где I_{sc} – ток короткого замыкания, V_{oc} – напряжение холостого хода, FF – фактор заполнения, E – мощность внешнего излучения, A_c – площадь поверхности солнечного элемента. Стандартные условия облучения соответствуют температуре окружающей среды 25°C , мощности облучения $E = 1000\text{ Вт/м}^2$ при атмосферной массе 1.5 (АМ 1.5). При этих условиях солнечный элемент с эффективностью 12% и площадью $A_c = 0.01\text{ м}^2$ генерирует мощность 1.2 Вт.

Для экспериментального исследования угловой зависимости для нанокompозита использован набор серийно выпускаемых кремниевых солнечных элементов различной эффективности от 10% до 21.37%. Два из этих солнечных элементов выпускаются серийно американской компанией Sun Power, остальные были изготовлены по технологии ВИЭСХ (Москва). На поверхности этих солнечных элементов были нанесены штатные интерференционные просветляющие покрытия. Нанокompозитные плёнки из полиметилметакрилата с наночастицами из серебра толщиной 30 мкм были нанесены на внешнюю поверхность всех солнечных элементов. Отражательная способность этих образцов значительно понижается по сравнению с отражательной способностью солнечных элементов без нанокompозитной плёнки с наночастицами серебра равномерно по всему спектру от 450 нм до 1000 нм.

В результате анализа зависимости силы фототока кремниевого солнечного элемента со штатным интерференционным просветлением подтверждён факт сильной угловой зависимости интерференционных просветляющих покрытий от угла падения внешнего излучения. В результате анализа зависимости силы фототока кремниевого солнечного элемента с нанокompозитным просветляющим покрытием получена слабая угловая зависимость оптического пропускания нанокompозитных просветляющих покрытий от угла падения внешнего излучения, что играет важную роль в солнечной энергетике в решении проблемы увеличения эффективности солнечных установок.

Заключение

В результате экспериментальных исследований значений фототока кремниевого солнечного элемента со штатным интерференционным просветлением подтвержден известный факт сильной угловой зависимости интерференционных просветляющих покрытий от угла падения внешнего излучения. Генерируемый фототок в солнечном элементе пропорционален оптическому пропусканию света внутрь кремния. Угловые измерения

этого же солнечного элемента, покрытого толстой нанокompозитной плёнкой из полиметилметакрилата с наночастицами из серебра, показали слабую угловую зависимость оптического пропускания. Следовало ожидать, что обнаруженный в коллимированных пучках эффект слабой зависимости фототока от угла падения внешнего излучения, играет важную роль в солнечной энергетике в решении проблемы увеличения эффективности солнечных установок.

Для эффективности образцов солнечных элементов в диапазоне углов от 0 до 70° известна слабая по сравнению с косинус-фактором угловая зависимость эффективности солнечных элементов. Для одного из образцов при нулевом угле падения солнечного излучения вольт-амперные характеристики дают значения $V_{oc} = 0.41$ В, $I_{sc} = 1.7$ А, $FF = 0.621$, $A_c = 1/2 \cdot 12.5 \times 12.5$ см², $E = 718$ Вт/м², температура воздуха 18° С, что соответствует эффективности солнечного элемента $\eta = 12.43$ %. При угле падения солнечного излучения 60° из вольт-амперных характеристик могут быть получены значения: $V_{oc} = 0.43$ В, $I_{sc} = 0.89$ А, $FF = 0.663$, что соответствует эффективности $\eta = 10.49$ %, вместо 6.212 %, в соответствии с косинус-фактором. Таким образом, известно, что нанокompозитные плёнки из полиметилметакрилата с наночастицами из серебра являются высокоэффективными просветляющими покрытиями, позволяющими в 1.69 раза увеличить эффективность солнечных элементов при большом наклоне солнечного излучения. Это означает, например, что можно не применять дорогостоящие устройства слежения за Солнцем для достижения необходимого энергопотребления солнечной установки.

Список использованных источников

1. Solar cell efficiency tables (version 40) / M. A. Green [et al.] // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. — 2012. — jul. — Vol. 20, no. 5. — P. 606–614. — URL: <https://doi.org/10.1002/pip.2267>.
2. Green M. A. Silicon solar cells: evolution, high-efficiency design and efficiency enhancements // Semiconductor Science and Technology. — 1993. — jan. — Vol. 8, no. 1. — P. 1–12. — URL: <https://doi.org/10.1088/0268-1242/8/1/001>.
3. Solar cell efficiency tables (version 41) / M. A. Green [et al.] // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. — 2012. — dec. — Vol. 21, no. 1. — P. 1–11. — URL: <https://doi.org/10.1002/pip.2352>.
4. Review of status developments of high-efficiency crystalline silicon solar cells / J. Liu [et al.] // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2018. — feb. — Vol. 51, no. 12. — P. 123001. — URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aaac6d>.
5. Branker K., Pathak M.J.M., Pearce J.M. A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2011. — dec. — Vol. 15, no. 9. — P. 4470–4482. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.104>.
6. Photovoltaic devices / S. A. Ringel [et al.] // Guide to state-of-the-art electron devices. — John Wiley & Sons, Ltd, 2013. — feb. — P. 213–223. — URL: <https://doi.org/10.1002/9781118517543.ch16>.
7. Goetzberger A., Knobloch J., Voß B. Solar power // Crystalline silicon solar cells. — John Wiley & Sons, Ltd, 2014. — sep. — P. 5–7. — URL: <https://doi.org/10.1002/9781119033769.ch2>.
8. Киричук Ю. Б., Ким А. А. Солнечные панели и батареи в архитектуре // Новые идеи нового века: материалы международной научной конференции ФАД ТОГУ. — 2017. — Т. 2. — С. 123–129.

9. Панченко В. А. Кровельные солнечные панели для электро- и теплогенерации // В сборнике: Возобновляемые источники энергии. Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием и XI научной молодежной школы. — Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Объединенный институт высоких температур РАН, 2018. — С. 151–160.
10. Панченко В. А. Кровельные солнечные панели для энергоснабжения инфраструктурных объектов // Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта. — 2018. — № 14. — С. 109–117.
11. Абрамян С. Г., Саутиев А. У. Термо- и солнечные панели для энергоэффективных фасадных систем // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. — 2018. — № 10. — С. 237–240.
12. Волков О. В., Горбенко А. В., Шевченко И. В. Исследование пробоя защиты служебного модуля Международной космической станции при дополнительном экранировании солнечными панелями // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2012. — Т. 14, № 1-2. — С. 477–479.
13. Захаров В. М., Смирнов Н. Н., Лапатеев Д. А. Тройной энергетический эффект для систем энергоснабжения зданий от использования теплоотражающих экранов с солнечными панелями в окнах // В сборнике: Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии XVIII Бенардосовские чтения: материалы международной научно-технической конференции. Иваново, 27-29 мая 2015 г. — Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина, 2015. — С. 148–152.
14. Ломач М. С., Алексеев И. С. Разработка энергосберегающей системы отопления солнечными жидкостными панелями // В сборнике: Материалы докладов 48 Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов, посвященной 50-летию университета в 2 т. — Витебский государственный технологический университет, 2015. — С. 271–274.
15. Алексеев И. С., Дорошенко И. А. Разработка конструкции системы отопления и электроснабжения солнечными жидкостными панелями // В сборнике: Материалы докладов 44 научно-технической конференции преподавателей и студентов университета. — Витебский государственный технологический университет, 2011. — С. 312–314.
16. Кривцова Л. А., Хромченко А. Ю. Солнечные панели как энергоэффективная замена обычных окон // В сборнике: Информационные технологии, энергетика и экономика. Сборник трудов XV Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. В 3-х томах. — Универсум (Смоленск), 2018. — С. 29–32.
17. Основные параметры солнечной панели с концентраторами / Д. Ш. Ахмедов [и др.] // Вестник Югорского государственного университета. — 2015. — № S2 (37). — С. 145–147.
18. Быкова Ю. В., Баженова Е. Е. Преимущества перехода от солнечных панелей к солнечной черепице // StudArctic Forum. — 2017. — Т. 3, № 7 (7). — С. 41–47.
19. Зуев Ю. М., Андреева Е. Н. Проблемы альтернативной электроэнергетики. Солнечные панели // В сборнике: Современные технологии в электроэнергетике и теплоэнергетике. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. — 2018. — С. 63–67.

20. Reynolds C. G., Green C. M., Lomask V. Vanguard: A History. // Military Affairs. — 1971. — oct. — Vol. 35, no. 3. — P. 120. — URL: <https://doi.org/10.2307/1984029>.
21. Bailey Sh., Raffaele R. Space solar cells and arrays // Handbook of photovoltaic science and engineering. — John Wiley & Sons, Ltd, 2011. — mar. — P. 365–401. — URL: <https://doi.org/10.1002/9780470974704.ch9>.
22. Pierce D. T., Spicer W. E. Electronic structure of amorphous Si from photoemission and optical studies // Physical Review B. — 1972. — apr. — Vol. 5, no. 8. — P. 3017–3029. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.5.3017>.
23. Thin-film photovoltaic solar array parametric assessment / D. Hoffman [et al.] // 35th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit. — American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2000. — jul. — URL: <https://doi.org/10.2514/6.2000-2919>.
24. Flexible high power-per-weight perovskite solar cells with chromium oxide–metal contacts for improved stability in air / M. Kaltenbrunner [et al.] // Nature Materials. — 2015. — aug. — Vol. 14, no. 10. — P. 1032–1039. — URL: <https://doi.org/10.1038/nmat4388>.
25. Ultrathin and lightweight organic solar cells with high flexibility / M. Kaltenbrunner [et al.] // Nature Communications. — 2012. — jan. — Vol. 3, no. 1. — URL: <https://doi.org/10.1038/ncomms1772>.
26. Record amorphous silicon single-junction photovoltaic module with 9.1% stabilized conversion efficiency on 1.43 m² / E. L. Salabaş [et al.] // Progress in photovoltaics: research and applications. — 2016. — mar. — Vol. 24, no. 8. — P. 1068–1074. — URL: <https://doi.org/10.1002/pip.2760>.
27. Semiconducting group 15 monolayers: a broad range of band gaps and high carrier mobilities / Sh. Zhang [et al.] // Angewandte Chemie International Edition. — 2015. — dec. — Vol. 55, no. 5. — P. 1666–1669. — URL: <https://doi.org/10.1002/anie.201507568>.
28. High thermoelectric performances of monolayer SnSe allotropes / Z.-Y. Hu [et al.] // Nanoscale. — 2017. — Vol. 9, no. 41. — P. 16093–16100. — URL: <https://doi.org/10.1039/c7nr04766e>.
29. Akinwande D., Petrone N., Hone J. Two-dimensional flexible nanoelectronics // Nature Communications. — 2014. — dec. — Vol. 5, no. 1. — URL: <https://doi.org/10.1038/ncomms6678>.
30. Coey J. M. D., Viret M., von Molnár S. Mixed-valence manganites // Advances in Physics. — 1999. — mar. — Vol. 48, no. 2. — P. 167–293. — URL: <https://doi.org/10.1080/000187399243455>.
31. Dagotto E., Hotta T., Moreo A. Colossal magnetoresistant materials: the key role of phase separation // Physics Reports. — 2001. — apr. — Vol. 344, no. 1-3. — P. 1–153. — URL: [https://doi.org/10.1016/s0370-1573\(00\)00121-6](https://doi.org/10.1016/s0370-1573(00)00121-6).
32. Cheong S.-W., Mostovoy M. Multiferroics: a magnetic twist for ferroelectricity // Nature Materials. — 2007. — jan. — Vol. 6, no. 1. — P. 13–20. — URL: <https://doi.org/10.1038/nmat1804>.

33. Snaith H. J. Perovskites: the emergence of a new era for low-cost, high-efficiency solar cells // *The Journal of Physical Chemistry Letters*. — 2013. — oct. — Vol. 4, no. 21. — P. 3623–3630. — URL: <https://doi.org/10.1021/jz4020162>.
34. Обухов С. Г., Плотников И. А. Модель солнечной панели в MATLAB SIMULINK // *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология*. — 2014. — № 21 (161). — С. 51–59.
35. Лунин А. Н. Алгоритм ориентации солнечных панелей // *Электронные средства и системы управления*. — 2010. — № 2. — С. 105–109.
36. Еремин Д. И., Понятов Ю. А., Кемешева Д. Г. Определение оптимального угла расположения солнечной панели в течении дня для повышения эффективности её работы // В сборнике: *Современные научные исследования: методология, теория, практика. Материалы III Международной научно-практической конференции*. — Центр содействия развитию научных исследований, 2014. — С. 131–140.
37. Коваль В. П., Ивасечко Р. Р., Козак Е. Н. Энергетическая эффективность систем позиционирования плоских солнечных панелей // *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. — 2015. — № 3 (134). — С. 2–10.
38. Кудаярова А. А., Хузина Л. Н., Ялалетдинова Д. А. Расчет мощности солнечных панелей // В сборнике: *Энергетика: эффективность, надежность, безопасность. Материалы трудов XXI Всероссийской научно-технической конференции*. В 2 томах. Томск, 2 - 4 декабря 2015 г. — ООО “Скан”, 2015. — С. 79–82.
39. Порев В. А., Пахалюк Р. И., Божко К. М. Исследование люминесцирующих дефектов солнечных панелей // *Известия Академии инженерных наук имени А. М. Прохорова*. — 2014. — № 1. — С. 3–6.
40. Косяченко Л. А., Грушко Е. В., Микитюк Т. И. Поглощательная способность полупроводников, используемых в производстве солнечных панелей // *Физика и техника полупроводников*. — 2012. — Т. 46, № 4. — С. 482–486.
41. Кэдервэл К., Лайлз У., Карпентер Д. Применение малогабаритных солнечных панелей для подзарядки литий-ионных аккумуляторных батарей // *Компоненты и технологии*. — 2012. — № 12 (137). — С. 172–173.
42. Шарифов Б. Н., Терегулов Т. Р. Моделирование солнечной панели в программе MATLAB/SIMULINK // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. — 2015. — Т. 19, № 4 (70). — С. 77–83.
43. Панков Р. Э., Ручкина Н. Л., Ручкин Л. В. Алгоритм сборки уравнений кинетической энергии механизма раскрытия штанги панелей солнечных батарей // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. — 2010. — Т. 1, № 6. — С. 13–14.
44. Байшев А. В., Торопов А. С. Особенности расположения солнечных панелей // В сборнике: *Актуальные вопросы в науке и практике Сборник статей по материалам VI международной научно-практической конференции*. В 4-х частях. — С. 109–113.
45. The development of root solar panels / D. Strebkov [et al.] // *Research in Agricultural Electric Engineering*. — 2015. — no. 4. — P. 123–126.
46. Разработка кровельной солнечной панели / Д. С. Стребков [и др.] // *Вестник ВИ-ЭСХ*. — 2015. — № 4 (21). — С. 106–110.

47. Стребков Д. С., Кирсанов А. И., Панченко В. А. Солнечные кровельные панели для программы “Один миллион солнечных крыш в России” // В сборнике: Управление инновационным развитием Арктической зоны Российской Федерации. Сборник избранных трудов по материалам Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Составители Е. Н. Богданова, И. Д. Нефедова. — 2017. — С. 393–397.
48. Solar power generation using high altitude platforms feasibility and viability / G. S. Aglietti [et al.] // Progress in photovoltaics: research and applications. — 2008. — jun. — Vol. 16, no. 4. — P. 349–359. — URL: <https://doi.org/10.1002/pip.815>.
49. Samarakou M. T., Hennet J. C. Simulation of a combined wind and solar power plant // International journal of energy research. — 1986. — jan. — Vol. 10, no. 1. — P. 1–10. — URL: <https://doi.org/10.1002/er.4440100102>.
50. Алтунин К. К., Серова Д. В. Исследование оптимальных параметров просветляющих покрытий солнечных панелей в зависимости от широты расположения солнечной электростанции // В книге: Актуальные проблемы физической и функциональной электроники материалы 20-й Всероссийской молодежной научной школы-семинара. Ульяновск, 05-07 декабря 2017 г. — Ульяновский государственный технический университет (Ульяновск), 2017. — С. 204–205.
51. Zhang Yu., Jia Q.-Sh. Operational optimization for microgrid of buildings with distributed solar power and battery // Asian journal of control. — 2016. — dec. — Vol. 19, no. 3. — P. 996–1008. — URL: <https://doi.org/10.1002/asjc.1424>.
52. Singh R. N., Mathur S. S., Kandpal T. C. Using a fin with a parabolic concentrator // International journal of energy research. — 1979. — Vol. 3, no. 4. — P. 393–395. — URL: <https://doi.org/10.1002/er.4440030410>.
53. Influence of errors of trough pointing and fin alignment on the geometrical concentration ratio of focusing parabolic concentrators / S. S. Mathur [et al.] // International journal of energy research. — 1981. — Vol. 5, no. 3. — P. 277–287. — URL: <https://doi.org/10.1002/er.4440050308>.
54. Морозов Д. А. Использование солнечных панелей для электроснабжения зданий // Поволжский научный вестник. — 2017. — № 3. — С. 20–25.
55. Нагаев Д. А. Обзор современных солнечных панелей // Вестник современных исследований. — 2018. — № 6.3 (21). — С. 530–534.
56. Wolfe Ph. Terrestrial solar applications // The solar generation. — John Wiley & Sons, Inc., 2018. — apr. — P. 25–46. — URL: <https://doi.org/10.1002/9781119425618.ch3>.
57. Энергоэффективность подвижных и неподвижных конструкций солнечных панелей / К. А. Гросс [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2018. — Т. 329, № 3. — С. 113–122.
58. Development of solar-pumped lasers and its application / T. Saiki [et al.] // Electrical engineering in Japan. — 2017. — jan. — Vol. 199, no. 2. — P. 3–9. — URL: <https://doi.org/10.1002/ej.22961>.
59. Wu J.-M., Yang Z.-Y., Ke S.-W. A solar-powered 2.4 GHz injection-locked oscillator for RF amplification // Microwave and optical technology letters. — 2019. — feb. — Vol. 61, no. 7. — P. 1688–1691. — URL: <https://doi.org/10.1002/mop.31797>.

60. Kabeel A. E., El-Said Emad M. S., Dafea Salah A. Design considerations and their effects on the operation and maintenance cost in solar-powered desalination plants // Heat transfer-Asian research. — 2019. — mar. — URL: <https://doi.org/10.1002/htj.21454>.
61. Probabilistic forecasts of solar irradiance using stochastic differential equations / E. B. Iversen [et al.] // Environmetrics. — 2014. — apr. — Vol. 25, no. 3. — P. 152–164. — URL: <https://doi.org/10.1002/env.2267>.
62. Schepper E. De, Passel S. Van, Lizin S. Economic benefits of combining clean energy technologies: the case of solar photovoltaics and battery electric vehicles // International journal of energy research. — 2015. — mar. — Vol. 39, no. 8. — P. 1109–1119. — URL: <https://doi.org/10.1002/er.3315>.
63. Fregoso B. M., Muniz R. A., Sipe J. E. Jerk current: a novel bulk photovoltaic effect // Physical Review Letters. — 2018. — oct. — Vol. 121, no. 17. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.121.176604>.
64. Živković A., Roldan A., de Leeuw N. H. Density functional theory study explaining the underperformance of copper oxides as photovoltaic absorbers // Physical Review B. — 2019. — jan. — Vol. 99, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.99.035154>.
65. Nonradiative energy losses in bulk-heterojunction organic photovoltaics / M. Azzouzi [et al.] // Physical Review X. — 2018. — sep. — Vol. 8, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevx.8.031055>.
66. Стребков Д. С. Образование в области возобновляемой энергетики // Энергетический вестник. — 2013. — № 16. — С. 57–60.

Сведения об авторах:

Константин Константинович Алтунин — кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики и технических дисциплин ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: kostya_altunin@mail.ru

ORCID iD  0000-0002-0725-9416

Web of Science ResearcherID  I-5739-2014

SCOPUS ID  57201126207

Original article
PACS 73.50.Pz
OCIS 040.5350
MSC 00A79

Semitransparent solar cells

K. K. Altunin 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted January 10, 2023
Resubmitted January 12, 2023
Published March 10, 2023

Abstract. The physical properties of translucent solar cells are considered. As a result of the analysis of the dependence of the photocurrent strength of a silicon solar cell with a standard interference coating, the fact of a strong angular dependence of interference antireflection coatings on the angle of incidence of external radiation was confirmed. As a result of the analysis of the dependence of the photocurrent strength of a silicon solar cell with a nanocomposite antireflection coating, a weak angular dependence of the optical transmission of nanocomposite antireflection coatings on the angle of incidence of external radiation was obtained, which plays an important role in solar energy in solving the problem of increasing the efficiency of solar installations.

Keywords: solar cells, solar panels, solar energy, silicon, gallium arsenide, solar energy receiver, photovoltaic technologies, solar energy concentrating technologies, concentrating photovoltaic systems, solar radiation intensity

References

1. Solar cell efficiency tables (version 40) / M. A. Green [et al.] // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. — 2012. — jul. — Vol. 20, no. 5. — P. 606–614. — URL: <https://doi.org/10.1002/pip.2267>.
2. A.Green M. Silicon solar cells: evolution, high-efficiency design and efficiency enhancements // Semiconductor Science and Technology. — 1993. — jan. — Vol. 8, no. 1. — P. 1–12. — URL: <https://doi.org/10.1088/0268-1242/8/1/001>.
3. Solar cell efficiency tables (version 41) / M. A. Green [et al.] // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. — 2012. — dec. — Vol. 21, no. 1. — P. 1–11. — URL: <https://doi.org/10.1002/pip.2352>.
4. Review of status developments of high-efficiency crystalline silicon solar cells / J. Liu [et al.] // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2018. — feb. — Vol. 51, no. 12. — P. 123001. — URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aaac6d>.
5. Branker K., Pathak M.J.M., Pearce J.M. A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2011. — dec. — Vol. 15, no. 9. — P. 4470–4482. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.104>.

6. Photovoltaic devices / S. A. Ringel [et al.] // Guide to state-of-the-art electron devices. — John Wiley & Sons, Ltd, 2013. — feb. — P. 213–223. — URL: <https://doi.org/10.1002/9781118517543.ch16>.
7. Goetzberger A., Knobloch J., Voß B. Solar power // Crystalline silicon solar cells. — John Wiley & Sons, Ltd, 2014. — sep. — P. 5–7. — URL: <https://doi.org/10.1002/9781119033769.ch2>.
8. Kirichuk Yu. B., Kim A. A. Solar panels and batteries in architecture // New ideas of the new century: materials of the international scientific conference FAD PNU. — 2017. — Vol. 2. — P. 123–129.
9. Panchenko V. A. Rooftop solar panels for electricity and heat generation // In the collection: Renewable energy sources. Materials of the All-Russian scientific conference with international participation and XI scientific youth school. — Lomonosov Moscow State University, Joint Institute for High Temperatures RAS, 2018. — P. 151–160.
10. Panchenko V. A. Rooftop solar panels to power infrastructure facilities // Modern problems of improving the work of railway transport. — 2018. — no. 14. — P. 109–117.
11. Abrahamyan C. G., Sautiev A. U. Thermo and solar panels for energy efficient façade systems // Resource and energy efficient technologies in the construction complex of the region. — 2018. — no. 10. — P. 237–240.
12. Volkov O. V., Gorbenko A. V., Shevchenko I. V. International Space Station Service Module Protection Breakdown Study with Additional Shielding by Solar Panels // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. — 2012. — Vol. 14, no. 1-2. — P. 477–479.
13. Zakharov V. M., Smirnov N. N., Lapateev D. A. Triple Energy Benefits for Building Energy Systems from Using Heat-Reflective Screens with Solar Panels in Windows // In the collection: Status and prospects for the development of electrical and thermal technology XVIII Benardos readings: materials of the international scientific and technical conference. Ivanovo, May 27-29, 2015. — Ivanovo State Power Engineering University named after V. I. Lenin, 2015. — P. 148–152.
14. Lomach M. S., Alekseev I. S. Development of an energy-saving heating system with solar fluid panels // In the collection: Proceedings of the 48th International Scientific and Technical Conference of Teachers and Students, dedicated to the 50th anniversary of the university in 2 volumes. — Vitebsk State Technological University, 2015. — P. 271–274.
15. Alekseev I. S., Doroshenko I. A. Development of the design of the heating and power supply system with solar liquid panels // In the collection: Materials of reports of the 44th scientific and technical conference of teachers and students of the university. — Vitebsk State Technological University, 2011. — P. 312–314.
16. Krivtsova L. A., Khromchenko A. Yu. Solar panels as an energy-efficient replacement for conventional windows // In the collection: Information technology, energy and economics. Proceedings of the XV International Scientific and Technical Conference of Students and Postgraduates. In 3 volumes. — Universum (Smolensk), 2018. — P. 29–32.
17. Basic parameters of a solar panel with concentrators / D. Sh. Akhmedov [et al.] // Bulletin of Yugra State University. — 2015. — no. S2(37). — P. 145–147.

18. Bykova Yu. V., Bazhenova E. E. Benefits of switching from solar panels to solar tiles // StudArctic Forum. — 2017. — Vol. 3, no. 7(7). — P. 41–47.
19. Zuev Yu. M., Andreeva E. N. Problems of alternative power engineering. Solar panels // In the collection: Modern technologies in the electric power industry and thermal power engineering. Collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation. — 2018. — P. 63–67.
20. Reynolds C. G., Green C. M., Lomask V. Vanguard: History. // Military Affairs. — 1971. — oct. — Vol. 35, no. 3. — P. 120. — URL: <https://doi.org/10.2307/1984029>.
21. sh. Bailey, Raffaele R. Space solar cells and arrays // Handbook of photovoltaic science and engineering. — John Wiley & Sons, Ltd, 2011. — mar. — P. 365–401. — URL: <https://doi.org/10.1002/9780470974704.ch9>.
22. Pierce D. T., Spicer W. E. Electronic structure of amorphous Si from photoemission and optical studies // Physical Review B. — 1972. — apr. — Vol. 5, no. 8. — P. 3017–3029. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.5.3017>.
23. Thin-film photovoltaic solar array parametric assessment / D. Hoffman [et al.] // 35th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit. — American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2000. — jul. — URL: <https://doi.org/10.2514/6.2000-2919>.
24. Flexible high power-per-weight perovskite solar cells with chromium oxide–metal contacts for improved stability in air / M. Kaltenbrunner [et al.] // Nature Materials. — 2015. — aug. — Vol. 14, no. 10. — P. 1032–1039. — URL: <https://doi.org/10.1038/nmat4388>.
25. Ultrathin and lightweight organic solar cells with high flexibility / M. Kaltenbrunner [et al.] // Nature Communications. — 2012. — jan. — Vol. 3, no. 1. — URL: <https://doi.org/10.1038/ncomms1772>.
26. Record amorphous silicon single-junction photovoltaic module with 9.1% stabilized conversion efficiency on 1.43 m² / E. L. Salabaş [et al.] // Progress in photovoltaics: research and applications. — 2016. — mar. — Vol. 24, no. 8. — P. 1068–1074. — URL: <https://doi.org/10.1002/pip.2760>.
27. Semiconducting group 15 monolayers: a broad range of band gaps and high carrier mobilities / sh. Zhang [et al.] // Angewandte Chemie International Edition. — 2015. — dec. — Vol. 55, no. 5. — P. 1666–1669. — URL: <https://doi.org/10.1002/anie.201507568>.
28. High thermoelectric performances of monolayer SnSe allotropes / Z.-Y. Hu [et al.] // Nanoscale. — 2017. — Vol. 9, no. 41. — P. 16093–16100. — URL: <https://doi.org/10.1039/c7nr04766e>.
29. Akinwande D., Petrone N., Hone J. Two-dimensional flexible nanoelectronics // Nature Communications. — 2014. — dec. — Vol. 5, no. 1. — URL: <https://doi.org/10.1038/ncomms6678>.
30. Coey J. M. D., Viret M., von Molnár S. Mixed-valence manganites // Advances in Physics. — 1999. — mar. — Vol. 48, no. 2. — P. 167–293. — URL: <https://doi.org/10.1080/000187399243455>.

31. Dagotto E., Hotta T., Moreo A. Colossal magnetoresistant materials: the key role of phase separation // *Physics Reports*. — 2001. — apr. — Vol. 344, no. 1-3. — P. 1–153. — URL: [https://doi.org/10.1016/s0370-1573\(00\)00121-6](https://doi.org/10.1016/s0370-1573(00)00121-6).
32. Cheong S.-W., Mostovoy M. Multiferroics: a magnetic twist for ferroelectricity // *Nature Materials*. — 2007. — jan. — Vol. 6, no. 1. — P. 13–20. — URL: <https://doi.org/10.1038/nmat1804>.
33. Snaith H. J. Perovskites: the emergence of a new era for low-cost, high-efficiency solar cells // *The Journal of Physical Chemistry Letters*. — 2013. — oct. — Vol. 4, no. 21. — P. 3623–3630. — URL: <https://doi.org/10.1021/jz4020162>.
34. Obukhov C. G., Plotnikov I. A. Solar panel model in MATLAB SIMULINK // *International Scientific Journal Alternative Energy and Ecology*. — 2014. — no. 21 (161). — P. 51–59.
35. Lunin A. N. Solar Panel Orientation Algorithm // *Electronic means and control systems*. — 2010. — no. 2. — P. 105–109.
36. Eremin D. I., Ponyatov Yu. A., Kemesheva D. G. Determining the optimal angle of the solar panel during the day to increase its efficiency // In the collection: *Modern scientific research: methodology, theory, practice. Materials of the III International Scientific and Practical Conference*. — Center for the Promotion of Scientific Research, 2014. — P. 131–140.
37. Koval V. P., Ivasechko R. R., Kozak E. N. Energy Efficiency of Solar Panel Positioning Systems // *Energy saving. Energy. Energy audit*. — 2015. — no. 3 (134). — P. 2–10.
38. Kudayarova A. A., Khuzina L. N., Yalaletdinova D. A. Solar panel power calculation // In the collection: *Energy: efficiency, reliability, safety. Proceedings of the XXI All-Russian Scientific and Technical Conference. In 2 volumes. Tomsk, December 2 - 4, 2015*. — OOO “Scan”, 2015. — P. 79–82.
39. Porev V. A., Pakhalyuk R. I., Bozhko K. M. Investigation of Luminescent Defects in Solar Panels // *News of the Academy of Engineering Sciences named after A. M. Prokhorov*. — 2014. — no. 1. — P. 3–6.
40. Kosyachenko L. A., Grushko E. V., Mikityuk T. I. Absorptivity of semiconductors used in the production of solar panels // *Physics and technology of semiconductors*. — 2012. — Vol. 46, no. 4. — P. 482–486.
41. Caderval K., Lyles W., Carpenter D. Using Small Solar Panels to Recharge Lithium Ion Batteries // *Components and Technologies*. — 2012. — no. 12 (137). — P. 172–173.
42. Sharifov B. N., Teregulov T. R. Solar Panel Simulation in MATLAB/SIMULINK // *Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University*. — 2015. — Vol. 19, no. 4 (70). — P. 77–83.
43. Pankov R. E., Ruchkina N. L., Ruchkin L. V. Algorithm for assembling equations of kinetic energy of the mechanism for opening the bar of solar panels // *Actual problems of aviation and astronautics*. — 2010. — Vol. 1, no. 6. — P. 13–14.
44. Baishev A. V., Toropov A. S. Features of the location of solar panels // In the collection: *Topical issues in science and practice Collection of articles based on the materials of the VI international scientific and practical conference. In 4 parts*. — P. 109–113.

45. The development of roof solar panels / D. Strebkov [et al.] // Research in Agricultural Electrical Engineering. — 2015. — no. 4. — P. 123–126.
46. Development of rooftop solar panel / D. S. Strebkov [et al.] // Bulletin VIESH. — 2015. — no. 4 (21). — P. 106–110.
47. Strebkov D. S., Kirsanov A. I., Panchenko V. A. Solar roof panels for “One million solar roofs in Russia” program // In the collection: Management of innovative development of the Arctic zone of the Russian Federation. Collection of selected works based on the materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation. Compiled by E. N. Bogdanova, I. D. Nefedova. — 2017. — P. 393–397.
48. Solar power generation using high altitude platforms feasibility and viability / G. S. Aglietti [et al.] // Progress in photovoltaics: research and applications. — 2008. — jun. — Vol. 16, no. 4. — P. 349–359. — URL: <https://doi.org/10.1002/pip.815>.
49. Samarakou M. T., Hennes J. C. Simulation of a combined wind and solar power plant // International journal of energy research. — 1986. — jan. — Vol. 10, no. 1. — P. 1–10. — URL: <https://doi.org/10.1002/er.4440100102>.
50. Altunin K. K., Serova D. V. Study of the optimal parameters of antireflective coatings of solar panels depending on the latitude of the solar power plant // In the book: Actual problems of physical and functional electronics materials of the 20th All-Russian Youth Scientific School-Seminar. Ulyanovsk, December 05-07, 2017. — Ulyanovsk State Technical University (Ulyanovsk), 2017. — P. 204–205.
51. Zhang Yu., Jia Q.-Sh. Operational optimization for microgrid of buildings with distributed solar power and battery // Asian journal of control. — 2016. — dec. — Vol. 19, no. 3. — P. 996–1008. — URL: <https://doi.org/10.1002/asjc.1424>.
52. Singh R. N., Mathur S. S., Kandpal T. C. Using a fin with a parabolic concentrator // International journal of energy research. — 1979. — Vol. 3, no. 4. — P. 393–395. — URL: <https://doi.org/10.1002/er.4440030410>.
53. Influence of errors of trough pointing and fin alignment on the geometrical concentration ratio of focusing parabolic concentrators / S. S. Mathur [et al.] // International journal of energy research. — 1981. — Vol. 5, no. 3. — P. 277–287. — URL: <https://doi.org/10.1002/er.4440050308>.
54. Morozov D. A. Using Solar Panels to Power Buildings // Volga Scientific Bulletin. — 2017. — no. 3. — P. 20–25.
55. Nagaev D. A. Review of modern solar panels // Bulletin of Modern Research. — 2018. — no. 6.3(21). — P. 530–534.
56. Wolfe Ph. Terrestrial solar applications // The solar generation. — John Wiley & Sons, Inc., 2018. — apr. — P. 25–46. — URL: <https://doi.org/10.1002/9781119425618.ch3>.
57. Energy efficiency of mobile and fixed solar panel structures / K. A. Gross [et al.] // News of the Tomsk Polytechnic University. Georesource Engineering. — 2018. — Vol. 329, no. 3. — P. 113–122.
58. Development of solar-pumped lasers and its application / T. Saiki [et al.] // Electrical engineering in Japan. — 2017. — jan. — Vol. 199, no. 2. — P. 3–9. — URL: <https://doi.org/10.1002/eej.22961>.

59. Wu J.-M., Yang Z.-Y., Ke S.-W. A solar-powered 2.4 GHz injection-locked oscillator for RF amplification // *Microwave and optical technology letters*. — 2019. — feb. — Vol. 61, no. 7. — P. 1688–1691. — URL: <https://doi.org/10.1002/mop.31797>.
60. Kabeel A. E., El-Said Emad M. S., Dafea Salah A. Design considerations and their effects on the operation and maintenance cost in solar-powered desalination plants // *Heat transfer-Asian research*. — 2019. — mar. — URL: <https://doi.org/10.1002/htj.21454>.
61. Probabilistic forecasts of solar irradiance using stochastic differential equations / E. B. Iversen [et al.] // *Environmetrics*. — 2014. — apr. — Vol. 25, no. 3. — P. 152–164. — URL: <https://doi.org/10.1002/env.2267>.
62. Schepper E. De, Passel S. Van, Lizin S. Economic benefits of combining clean energy technologies: the case of solar photovoltaics and battery electric vehicles // *International journal of energy research*. — 2015. — mar. — Vol. 39, no. 8. — P. 1109–1119. — URL: <https://doi.org/10.1002/er.3315>.
63. b. M. Fregoso, Muniz R. A., Sipe J. E. Jerk current: a novel bulk photovoltaic effect // *Physical Review Letters*. — 2018. — oct. — Vol. 121, no. 17. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.121.176604>.
64. Živković A., Roldan A., de Leeuw N. H. Density functional theory study explaining the underperformance of copper oxides as photovoltaic absorbers // *Physical Review B*. — 2019. — jan. — Vol. 99, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.99.035154>.
65. Nonradiative energy losses in bulk-heterojunction organic photovoltaics / M. Azzouzi [et al.] // *Physical Review X*. — 2018. — sep. — Vol. 8, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevx.8.031055>.
66. Strebkov D. S. Renewable energy education // *Energy Bulletin*. — 2013. — no. 16. — P. 57–60.

Information about authors:

Konstantin Konstantinovich Altunin – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics and Technical Disciplines of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Pedagogical University”, Ulyanovsk, Russia.

E-mail: kostya.altunin@mail.ru

ORCID iD  0000-0002-0725-9416

Web of Science ResearcherID  I-5739-2014

SCOPUS ID  57201126207