ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК. СЕРИЯ АВИАЦИОННО-РАКЕТНОЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ ТОМ 9 № 2 2025
OMSK SCIENTIFIC BULLETIN. SERIES AVIATION-ROCKET AND POWER ENGINEERING VOL. 9 NO. 2 2025

УДК/UDC 620.91:621.383
DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-2-110-120
EDN: XAMZKD
Научная статья/Original article

КОМПЛЕКСНЫЙ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ РАЗНЫХ ПОКОЛЕНИЙ

Т. А. Дуюн, Элмнфи Монаем Хамад

Белгородский технологический университет им. В. Г. Шухова,
Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46

Возможным решением глобального энергетического кризиса является использование солнечного света для выработки электроэнергии. Солнечные элементы, преобразующие солнечную энергию в электричество, должны быть надежными и экономически эффективными, чтобы конкурировать с традиционными источниками энергии. Целью статьи является описание различных поколений фотоэлектрических элементов, а также современных и будущих технологий, используемых в фотоэлектрических системах. Статья охватывает основы фотоэлектричества, включая принцип работы и основные характеристики. Рассматриваются все поколения солнечных элементов. Особое внимание уделяется эффективности преобразования солнечного света в электричество, используемым материалам и экономическому анализу. По мере развития фотоэлектрических технологий также демонстрируются возможности повышения эффективности, снижения производственных затрат и внедрения инноваций. В статье анализируются существующие ограничения современных фотоэлектрических технологий и предлагаются возможные пути их преодоления на основе новейших научных разработок.

Ключевые слова: солнечная энергия, фотоэлемент, солнечные батареи, фотоэлектрические элементы, фотоэлектрический эффект, поколения солнечных фотоэлектрических материалов, развитие фотоэлектрических технологий, производительность, эффективность.

Для цитирования: Дуюн Т. А., Элмнфи Монаем Хамад. Комплексный технико-экономический анализ солнечных фотоэлектрических материалов разных поколений // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2025. Т. 9, № 2. С. 110—120. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-2-110-120. EDN: XAMZKD.

© Дуюн Т. А., Элмнфи Монаем Хамад, 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

COMPREHENSIVE TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF SOLAR PHOTOELECTRIC MATERIALS OF DIFFERENT GENERATIONS

T. A. Duyun, Elmnifi Monaem Hamad

Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov,
Russia, Belgorod, Kostyukova St., 46, 308012

A possible solution to the global energy crisis is to use sunlight to generate electricity. Solar cells that convert solar energy into electricity have to be reliable and cost-effective to compete with conventional energy sources. The aim of the article is to describe the different generations of photoelectric cells and the current and future technologies used in photoelectric systems. The article covers the basics of photoelectricity, including the principle of operation and basic features. All generations of solar cells are reviewed. Special attention is focuses on the efficiency of converting sunlight into electricity, used materials, and economic analysis. As photoelectric technology advances, opportunities for efficiency improvements, lower manufacturing costs, and innovation are also demonstrated. The paper analyzes the current limitations

of modern photoelectric technologies and suggests possible ways to meet them based on the recent scientific developments.

Keywords: solar energy, photoelectric cell, solar panels, photoelectric elements, photoelectric effect, generations of solar photovoltaic materials, development of photovoltaic technologies, productivity, efficiency.

For citation: Duyun T. A., Elmnifi Monaem Hamad. Comprehensive techno-economic analysis of solar photoelectric materials of different generations. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering.* 2025. Vol. 9, no. 2. P. 110–120. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-2-110-120 EDN: XAMZKD.

© Duyun T. A., Elmnifi Monaem Hamad, 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Материалы, поглощающие электромагнитное излучение, испускают электрически заряженные частицы из-за фотоэлектрического отклика. Под действием квантов света (фотонов), падающих на металлическую поверхность, из поверхностного слоя металла выбиваются электроны — явление, известное как фотоэлектрический эффект. Физическое состояние материала определяет, какие компоненты высвобождаются во время процессов электронного и ионного облучения [1]. Все типы электромагнитного излучения, от инфракрасного до гамма-лучей, а также видимые световые волны, ультрафиолетовое излучение и рентгеновские лучи вызывают фотоэлектрические процессы. Электронам необходимо поглотить это минимальное количество энергии, чтобы освободиться от поверхности в соответствии с работой выхода взаимодействующих веществ с электромагнитными волнами. Эйнштейн представил научному миру фотоны, которые легли в основу квантовой механики, заменив традиционные волновые теории, используя квантовые модели для объяснения. Указанный принцип находит свое применение в материаловедении и квантовой электронике, а также в астрофизике, но он позволяет работать фотодетекторам и солнечным элементам вместе с фотоэлектронной спектрометрией. Процесс фотоэлектрического эффекта представлен на рис. 1.

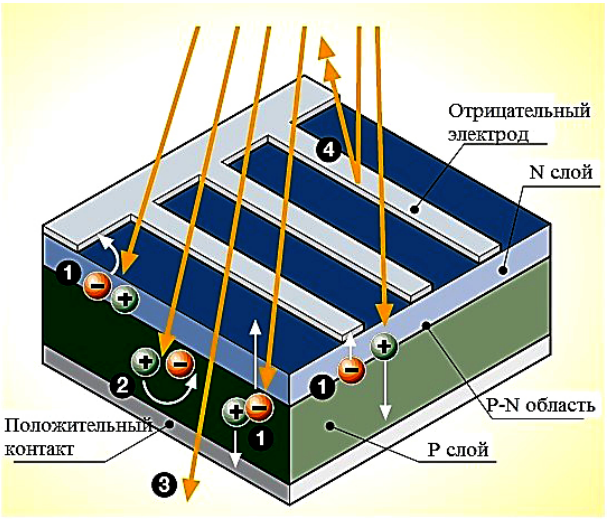

Рис. 1. Фотоэлектрический эффект [2]
Fig. 1. Photoelectric effect [2]

Актуальность, цель и задачи исследования

На фоне мирового энергетического кризиса и необходимости перехода на эффективные источники энергии растет стремление к разработке фотоэлектрических технологий, которые могут обеспечить надежное электроснабжение как гражданского, так и промышленного и военного секторов. Для обоснования научных решений требуется **проанализировать** все используемые технологии и классифицировать их по производительности, стоимости, экологичности и уровню зрелости. **Целью** исследования является сравнительный технико-экономический анализ различных поколений фотоэлектрических элементов и определение наиболее перспективных технологий, способных обеспечить стабильное и недорогое производство электроэнергии для всех сфер применения, от небольших бытовых систем до крупных промышленных и оборонных проектов.

Основными задачами являются:

— научная группировка и систематизация современных поколений фотоэлектрических элементов;

— проведение сравнительного анализа основных характеристик, эффективности, себестоимости производства, экологической безопасности, стабильности и возможности крупномасштабной промышленной технологичности;

— определение технических и экономических барьеров внедрения отдельных технологий;

— определение перспектив дальнейшего развития технологий фотоэлектрических элементов, их практического внедрения в гражданских, промышленных и военных областях.

Фотоэлектрический элемент

Если энергия падающих фотонов превышает работу выхода данного материала, то даже при низкой интенсивности света наблюдается эмиссия электронов вследствие фотоэлектрического эффекта. Фотоэлектрический эффект объясняет эмиссию электронов из поверхности материалов при воздействии света [3]. Свет проявляет дуализм: он обладает как волновыми свойствами, так и корпускулярными, перенося энергию в виде фотонов. Данное открытие поставило под сомнение классические представления о природе света и привело к развитию квантовой теории. Исследования показали, что частота света, а не его интенсивность является определяющим фактором для возникновения фотоэлектронной эмиссии. Квантовая теория получила свою основу благодаря этому открытию, которое послужило постоянным источником научного развития во многих областях технологий.

В своей теории Эйнштейн продемонстрировал, что электроны поглощают энергию фотонов света, которые проникают в материалы [4]. Электроны

в металле движутся с большой скоростью из-за слабого сцепления с атомами кристаллической решетки. Часть энергии фотона расходуется на преодоление работы выхода материала, а оставшаяся передаётся электрону в виде кинетической энергии. Энергия, необходимая для того, чтобы электрон смог покинуть поверхность металла под воздействием света, соответствует работе выхода. Это физическая характеристика материала, определяющая минимальную энергию фотона и необходимая для фотоэмиссии.

Валентная оболочка атома кремния имеет четыре электрона, между атомами которых образуется ковалентная связь [5]. Этим методом создается тетраэдрическая структура кристалла кремния [6]. Часть световых лучей отражается, часть проходит сквозь, а остальные поглощаются при соприкосновении с каким-либо веществом. Кристалл поглотит достаточное количество фотонов, если интенсивность входного света достаточно высока. Некоторые из этих фотонов затем вызывают возбуждение электронов в ковалентных связях.

В 1839 г. французский физик Эдмон Беккерель сделал открытие в области фотоэлектрического эффекта [7]. В 1883 г. Чарльз Фриттс разработал первые работающие солнечные элементы [8]. Он использовал тонкий лист селена, покрытый золотом. Солнечные панели являются относительно новой технологией для производства электроэнергии и тепла [9]. С начала 1900-х гг. солнечная энергия начала использоваться для производства электроэнергии. В 1954 г. Bell Labs создала первые крупномасштабные солнечные элементы из кристаллического кремния. Фотоэлектрические элементы, разработанные в лаборатории Bell, имели эффективность преобразования солнечной энергии в электричество около 4 %, что было значительным достижением в области энергетических технологий. Солнечные элементы на основе кремния с эффективностью 6 % были разработаны Дэрилом М. Чапином. Ученые продолжают совершенствовать и развивать оригинальные конструкции солнечных батарей, способных преобразовывать в электрическую энергию до 20 % получаемой солнечной энергии [10].

Солнечные батареи из поликристаллического кремния преобразуют в электричество около 20% получаемой энергии.

В конце 1900-х гг. нарастание осведомленности о последствиях глобального потепления и увеличивающийся спрос на возобновляемые источники энергии стимулировали ученых к работе над улучшением кремниевых фотоэлектрических систем. В начале 2000-х гг. были доступны солнечные элементы с коэффициентом рекуперации электроэнергии в размере 24 % [11]. Благодаря использованию материалов, связанных с космической эрой, ученым удалось значительно увеличить скорость рекуперации электроэнергии солнечных элементов из кремния всего за семь лет. К 2007 г. современные кремниевые фотоэлектрические солнечные элементы достигли уровня рекуперации энергии в 28 % [12]. Сегодняшний рынок насыщен технологиями и применениями фотоэлектрических элементов.

Типы фотоэлектрических элементов. Первое поколение солнечных батарей

Большинство транзисторов, используемых в солнечных элементах, используют кремний в качестве полупроводникового материала [13]. Промышленный рынок отдает предпочтение кристаллизованным кремниевым фотоэлектрическим элементам или модулям, среди которых лидируют модули C-Si wafer. Кристаллические кремниевые элементы существуют в трех различных типах, включая Mono и Poly C-Si, а также кремниевую ленту:

1. Монокристаллические (Mono C-Si).
2. Мультикристаллические или поликристаллические (Poly C-Si) или (m C-Si).
3. Кремниевая лента.

Sharp Corporation стала первой компанией, которая начала коммерческое производство модулей C-Si, когда она изготовила фотоэлектрические модули мощностью 242 Вт для установки на маяке в 1963 г. [14]. Продажи фотоэлектрических изделий в 2010 г. на 87 % состояли из кристаллических кремниевых продуктов. Эффективность кристаллических кремниевых модулей составляет от 14 до 19 %. Постоянное снижение затрат наряду с улучшенным выбором материалов и производственных процессов позволяет технологии постепенно развиваться.

Рис. 2. Монокристаллическая солнечная панель [16]
Fig. 2. Monocrystalline solar panel [16]

Монокристаллический кремний

По сравнению с тремя наиболее распространенными технологиями кремниевые монокристаллические элементы являются наиболее эффективными .Это своего рода фотоэлектрический материал, изготовленный из монокристаллической кремниевой структуры. Фотоэлектрические элементы изготавливаются путем обработки тонких кусочков (пластин) кремния высокой чистоты, полученных путем резки стержней (слитков), извлекаемых из отливки. Продолжительность жизни фотоэлектрических (модулей или систем) обычно составляет 25—30 лет [15]. Монокристаллическая кремниевая ячейка показана на рис. 2.

Преимущества монокристаллической кремниевой ячейки: высокая производительность, стабильная эффективность, длительный срок службы. Недостатки: высокая стоимость изготовления, повышенная чувствительность к температуре, ограниченная эффективность поглощения света, увеличенные потери материала при производстве.

Поликристаллический кремний

Молекулярная структура кремния состоит из нескольких групп или кристаллических зерен, разделенных барьерами. Они более экономичны и эффективны в производстве, чем монокристаллические элементы. Эффективность солнечных элементов ниже, чем у монокристаллического кремния. В отличие от монокристаллического кремния поликристаллический кремний отливают в блоки. Когда кристаллы цементируются, они образуют кристаллические образования разного размера с дефектами на гранях. Эти дефекты снижают эффективность; лабораторная эффективность коле-

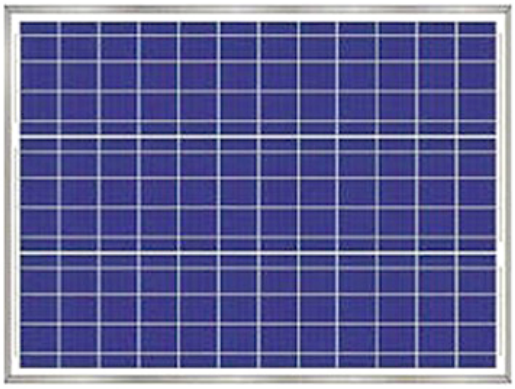

Рис. 3. Поликристаллическая кремниевая ячейка [17]
Fig. 3. Polycrystalline silicon cell [17]

Рис. 5. Солнечные элементы на основе теллурида кадмия [23]
Fig. 5. Solar cells based on cadmium telluride [23]

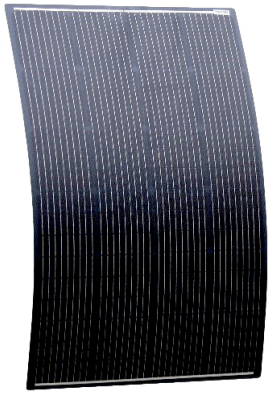

Рис. 4. Второе поколение фотоэлектрических элементов — тонкопленочные солнечные элементы [20]
Fig. 4. The second generation of photoelectric cells — thin-film solar cells [20]

блется от 8 до 23 %, а производственная — от 14 до 17 % . На рис. 3 изображена ячейка из поликристаллического кремния.

Преимущества поликристаллического кремния: хорошо отработанная и проверенная технология; стабильная эффективность; дешевле, чем монокристаллический кремний; плотность упаковки оптимизирована при использовании квадратных ячеек. Недостатки: использование дорогостоящих материалов; нарезка пластин; немного менее эффективны, чем монокристаллы.

Второе поколение солнечных батарей

Тонкоплёночные солнечные батареи

Разработано множество различных вариантов тонкопленочных солнечных элементов. Стоимость производства энергии тонкопленочными солнечными элементами ниже по сравнению с солнечными элементами на основе пластин C-Si [18]. Солнечные элементы, разработанные в виде тонких пленок, выпускаются в листах толщиной от 1 до 4 мкм. Кадмий выполняет функцию катализатора, поскольку он осаждается на существенных поверхностях из стекла, полимера и металла, которые образуются при производстве цинка.

Ограниченное производство теллура является серьёзной проблемой, так как его добыча значительно уступает кадмию, что приводит к нестабильности его доступности на рынке. Поскольку теллур является побочным продуктом медной промышленности, повышение эффективности добычи, очистки и переработки меди играет ключевую роль в обеспечении стабильных поставок теллура. Это, в свою очередь, критически важно для дальнейшего развития и масштабирования производства солнечных элементов на основе CdTe. Ограничения на использование кадмия обусловлены известными токсичными свойствами этого материала [19]. Тонкопленочные солнечные элементы подходят для компонентов фотоэлектрических систем, интегрированных в здания (BIPV), поскольку их можно перерабатывать в легкие, гибкие структуры. Существует три коммерчески разработанных типа тонкопленочных солнечных элементов:

1. Аморфный кремний (A-Si и A-Si/C-Si).
2. Теллурид кадмия (CdTe).
3. Селенид меди-индия (CIS) и диселенид меди-индия-галлия (CIGS) .

На рис. 4 показаны тонкопленочные солнечные элементы.

Аморфные кремниевые солнечные элементы наряду с CdTe-элементами представляют собой одни из наиболее разрабатываемых типов тонкопленочных солнечных элементов. Их можно наносить на недорогие подложки, что снижает производственные затраты [21]. Однако их выходная энергия и мощность со временем снижаются. Многопереходные тонкопленочные кремниевые (A-Si или C-Si) солнечные элементы, которые включают дополнительный слой (A-Si) и слой микрокристаллического кремния (C-Si), улучшенную версию с 10 %-ным увеличением эффективности в красной и ближней инфракрасной областях. Современные технологии осаждения позволяют создавать многопереходные тонкие пленки с площадью поверхности до 1,4 м^2.

Преимущества тонкоплёночных солнечных батарей: низкая стоимость производства; широкая доступность сырья; нетоксичность материалов; высокий коэффициент поглощения света. Недостатки: более низкая эффективность по сравнению с другими материалами; сложности в подборе подходящих легирующих добавок; короткое время жизни неосновных носителей заряда.

Теллурид кадмия (CdTe)

Теллурид кадмия (CdTe), несмотря на меньшую стоимость по сравнению с кремнием, менее эффективен. Чтобы обеспечить восстановление модуля после повторной установки, используется тяжелый металл кадмий. В настоящее время достигнута мак-

Рис. 6. Ячейка CIGS на гибкой пластиковой подложке [24]
Fig. 6. CIGS cell on a flexible plastic substrate [24]

симальная эффективность в 16 % [22]. Солнечные элементы из теллурида кадмия показаны на рис. 5.

Преимущества *теллурид кадмия (CdTe):* очень высокий коэффициент поглощения света, требуется меньше материала для производства, кадмий (Cd) легко доступен. Недостатки: высокая стоимость изготовления, кадмий (Cd) обладает высокой токсичностью, теллур (Te) доступен в ограниченных количествах, высокая температурная чувствительность.

Селенид меди-индия (CIS)
и селенид меди-индия-галлия (CIGS)

Ячейки CIGS имеют самую высокую эффективность среди тонкопленочных фотоэлектрических технологий, и компании занимаются их коммерциализацией. Производитель Solar Frontier достиг производственной мощности в 1 ГВт. Преимущество CIGS-модулей заключается в том, что фотоэлементы с низкой статической нагрузкой могут поглощать как прямой, так и непрямой солнечный свет, что делает их подходящими для использования на плоских крышах или в зимнее время. Фотоэлектрическая ячейка, созданная по технологии CIGS, показана на рис. 6.

Преимущества ячейки CIGS: для производства требуется меньше материалов, высокая эффективность, низкая стоимость производства, простота изготовления. Недостатки: ограниченная доступность галлия (Ga), высокая себестоимость, низкая стабильность, повышенная чувствительность к температурам, низкая надёжность.

Третье поколение солнечных батарей

Фотовольтаика третьего поколения (ФВ) направлена на разработку высокоэффективных устройств при использовании методов тонкопленочного осаждения второго поколения. Цель в том, чтобы снизить стоимость одного ватта, при этом увеличивая только затраты [25]. Кроме того, будут использоваться нетоксичные и распространенные материалы, как в тонкопленочных технологиях второго поколения на основе Si-технологии. Говоря иначе, технологии третьего поколения можно использовать для создания крупномасштабных фотоэлектрических систем. Хотя этот процесс требует больше энергии и времени, он отличается от производства высококачественных монокристаллических фотоэлектрических устройств первого поколения с низким уровнем дефектов и высокой эффективностью при предельном потенциале устройств с однополосным зазором.

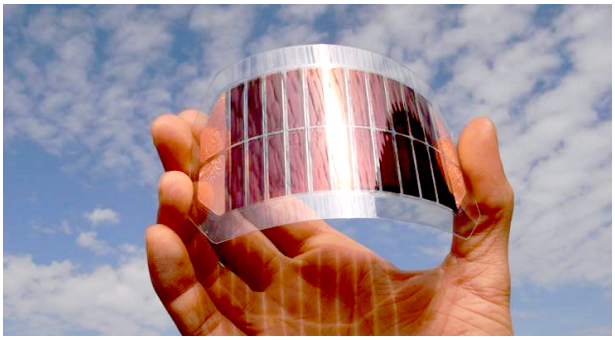

Рис. 7. Органический солнечный элемент [27]
Fig. 7. Organic solar cell [27]

Органические солнечные элементы

Органические солнечные элементы изготавливаются из полимерных или органических материалов. Несмотря на низкую стоимость, они не отличаются особой эффективностью. Коммерческие органические фотоэлектрические модули имеют эффективность преобразования от 4 до 5 %, а лабораторные органические фотоэлектрические модули — от 6 до 8 % [26]. Производители органических элементов также наращивают усилия по выводу своей продукции на рынок, намереваясь выпускать более 1 ГВт продукции в год. При производстве органических элементов применяются рулонные технологии с высокими скоростями и низкими температурами, а также традиционные методы печати.

Органические солнечные элементы, легкие и гибкие, идеально подходят для мобильных устройств и неровных поверхностей, что делает их конкурентоспособными по сравнению с другими фотоэлектрическими технологиями, особенно для портативных устройств, таких как мобильные телефоны и компьютеры. Их также можно складывать или сворачивать, когда они не используются. Органические фотоэлектрические модули будут привлекательны для применения в строительстве, что позволит расширить формы фотоэлектрических систем. Кроме того, эта технология использует преимущества легкодоступных нетоксичных ингредиентов и основана на масштабируемом и высокопроизводительном производстве. На рис. 7 изображен органический фотоэлектрический элемент.

Преимущества органических солнечных элементов: низкая стоимость обработки, небольшой вес, высокая гибкость, хорошая термическая стабильность. Недостатки: очень низкий коэффициент полезного действия (КПД).

Сенсибилизированные красителем
солнечные элементы (СКС)

В DSSC используется оксидный полупроводник с широкой полосой пропускания, а также сенсибилизатор, поглощающий электромагнитные (ЭМ) волны видимого света. В 1972 г. был изобретен чувствительный к хлорофиллу электродный солнечный элемент (DSSC) на основе оксида цинка (ZnO) [28]. В 1976 г. Карлсон и Вронски создают первый фотоэлектрический элемент из аморфного кремния с эффективностью 2,4 % [29].

С тех пор DSSC привлекает внимание специалистов по солнечной энергетике. Основная проблема заключается в том, что только 1 % падающего солнечного света может пройти через единственный слой молекул красителя на поверхности [30]. Исследования в области DSSC привели к прорыву

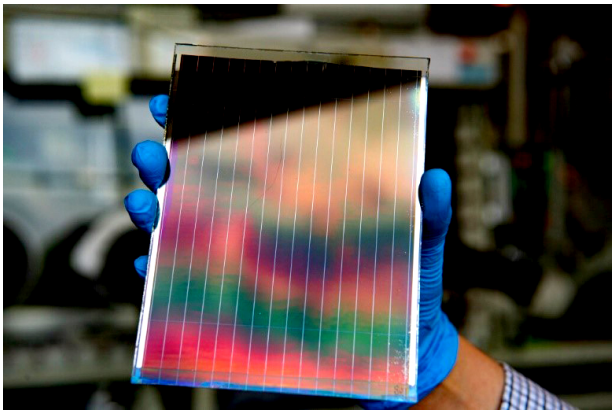

Рис. 8. Сенсибилизированные красителем солнечные элементы [32]
Fig. 8. Dye-sensitized solar cells [32]

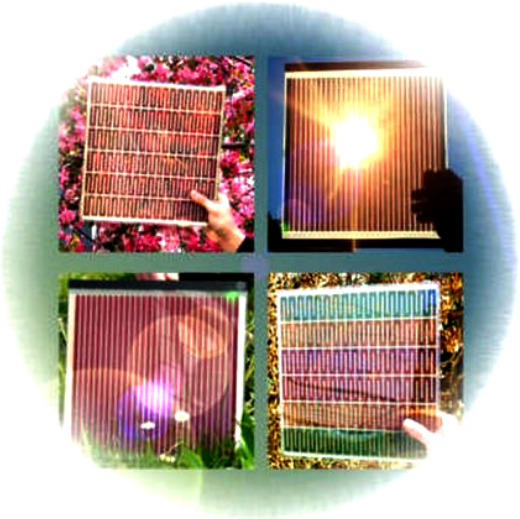

Рис. 9. Сенсибилизированные квантовыми точками солнечные элементы [35]
Fig. 9. Solar cells sensitized by quantum dots [35]

в 1991 г. [31]. Низкая стоимость производства и простота конструкции стали важными факторами, побудившими многих исследователей по всему миру работать над повышением эффективности до коммерчески приемлемого уровня.

DSSC использует процесс, аналогичный фотосинтезу, при котором применяются красители, имитирующие хлорофилл. Перенос заряда (электрона) от DSSC к внешней цепи начинается с выхода электронов из слоя полупроводниковой сети и завершается возвращением их на фотосенсибилизатор посредством окислительно-восстановительного компонента в электролите. В данном поколении солнечных элементов чистота полупроводникового материала менее критична по сравнению с предыдущими поколениями, поскольку архитектура устройства и механизм работы обеспечивают более эффективную работу даже при наличии примесей. На рис. 8 представлен DSSC.

Преимущества сенсибилизированных красителей солнечных элементов: более низкая стоимость производства эффективная работа при слабом освещении и широком угле падения света, высокая надежность, длительный срок службы. Недостатки: проблемы с температурной стабильностью, используемое сырье обладает токсичностью и летучестью.

Солнечные элементы, сенсибилизированные квантовыми точками (QDSSC)

По мере развития исследований в области DSSC возникла идея использовать солнечные элементы, сенсибилизированные квантовыми точками, вместо традиционных красителей. Квантовые точки — это наноструктуры размером от нескольких до нескольких десятков нанометров (нм), обладающие уникальными оптическими свойствами благодаря квантовым эффектам. Данные структуры имеют крошечные энергетические зазоры, размеры которых зависят от размеров самих квантовых точек. Чем меньше размер квантовой точки, тем больше энергетический зазор, что позволяет эффективно поглощать свет в видимом спектре и улучшать производительность солнечных элементов.

Идея применения квантовых точек принадлежит исследователям в области нанотехнологий и фотоэлектрических устройств, которые стремятся повысить эффективность и стабильность DSSC. В результате возбужденные электроны Quantum Dots (QDs) могут быть перенесены на мезопористый слой TiO2 после осаждения на электроды.

В 1960-х гг. исследователи начали изучать возможность использования материалов, таких как красители, для сенсибилизации полупроводников. Геришер и др. [33] впервые применили QDs в 1986 г. для сенсибилизации полупроводников с широкой полосой пропускания. Основой для создания DSSC послужили успехи в исследованиях сенсибилизации. Хотя оригинальные DSSC на основе пористого TiO2 были разработаны O'Regan и Grätzel с использованием органических красителей, концепция использования квантовых точек для изменения спектральных свойств и улучшения эффективности была предложена и активно исследовалась начиная с конца 1990-х гг. Эти квантовые точки обеспечивают расширенный диапазон поглощения и возможность настройки оптических свойств, включая цвет, что способствует повышению производительности QDSSC [34].

Неорганические квантовые точки (КТ) обладают рядом преимуществ по сравнению с органическими красителями. В частности, они проще в изготовлении и характеризуются значительно большей долговечностью. Так, стабильность неорганических квантовых точек может превышать срок службы органических красителей в несколько раз — часто их рабочий ресурс составляет от нескольких месяцев до нескольких лет, тогда как органические красители могут деградировать уже через несколько недель или месяцев эксплуатации под воздействием ультрафиолетового излучения и других факторов окружающей среды [35]. Кроме того, можно регулировать оптическую зону пропускания КТ. QDS также могут помочь солнечным энергетическим системам работать более эффективно, снижая темновые токи. На рис. 9 показан QDSSC.

Преимущества QDSSC: низкая себестоимость производства, низкое энергопотребление при эксплуатации. Недостатки: высокая токсичность используемых материалов, низкая устойчивость к разложению (высокая деградация).

Перовскит-сенсибилизированный солнечный элемент

Основными ограничениями для DSSC являются сложность производства и недостаточная химическая стабильность традиционных органических

красителей, что снижает долговечность и эффективность устройств. В результате этих проблем был предложен новый класс материалов — перовскиты и квантовые точки (QDs), которые выступают в качестве молекулярной замены красителей. Эти материалы демонстрируют значительно улучшенные оптические и электрические свойства, что позволило достичь рекордной эффективности преобразования солнечной энергии, превышающей 20 %. Таким образом, использование перовскитов и квантовых точек решает ключевые проблемы традиционных DSSC и открывает новые возможности для создания более стабильных и эффективных солнечных элементов [36].

Недавние исследования показали, что создание экономически эффективных и перспективных галогенорганических перовскитных солнечных элементов является реалистичной задачей. Благодаря высокой эффективности преобразования солнечной энергии эти устройства представляют особый интерес как технологии нового поколения. В 2009 г. Миясака и др. разработали первые перовскитные солнечные элементы с эффективностью преобразования энергии 3,81 % [37]. В 2018 г. сообщается, что перовскитные солнечные элементы производят больше энергии, чем органические тонкопленочные солнечные элементы, с максимальной эффективностью преобразования энергии более 21 % [38].

Наибольшая эффективность была достигнута при использовании галогенида метиламмония свинца в перовскитных солнечных элементах. В структуре перовскита общей формулы ABX3 (X=галоген) катион A занимает кубический октаэдрический участок, а катион B — октаэдрический участок кубической элементарной ячейки. A и B обычно двухвалентны или четырехвалентны, если используется анион O2-. Однако существует несколько дополнительных вариантов. На участках A и B анионы галогенов в перовскитах обеспечивают нейтральность заряда для моновалентных и двухвалентных катионов. В этом неорганическом галоген-свинцовом перовските A представляет собой органический катион метил-аммония, B — Pb или Sn, а X — галоген-анион. Катион A должен быть как достаточно большим, чтобы создать плотную структуру перовскита, так и достаточно маленьким, чтобы поместиться между четырьмя соседними октаэдрами MX6 с общими углами. Коэффициенты геометрических допусков используются для расчета формоустойчивости перовскита. Спектры оптического поглощения различных перовскитов галогенидов свинца, включая йодистый метил аммония, который имеет 1,5−1,6 эВ [39].

Были измерены длины волн менее 800 нм [40]. Перовскитные солнечные элементы генерируют значительное количество света, который используется для преобразования солнечной энергии в электричество. Существует два основных типа таких элементов: с плотным слоем TiO2 и с мезопористым слоем TiO2. Второй тип включает перовскитные низкомолекулярные органические солнечные элементы с плотным слоем TiO2. Перовскитные солнечные элементы имеют почти 40 нм тонкий слой TiO2 поверх прозрачного проводящего оксида. При поглощении света пористым слоем перовскита (CH3CH2NH3PbX3) образуются пары электронных дырок с электронами в проводимости (3,93 эВ) и дырками в валентной (−5,43 эВ) [41]. Для создания фототока в устройстве электроны инжектируются в TiO2 (−4,0 эВ), а дырки переносятся

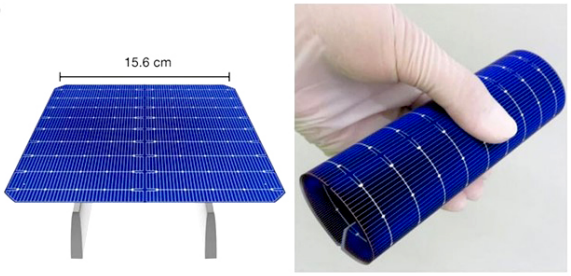

Рис. 10. Конфигурации перовскитных солнечных элементов [43]
Fig. 10. Configurations of perovskite solar cells [43]

на платиновый противоэлектрод (−5,0 эВ) [42]. С использованием технологий рулонного производства устройства третьего поколения могут быть легко изготовлены на основе полимерных солнечных элементов — тонкопленочных фотоэлементов, использующих органические полимеры для поглощения света и преобразования его в электричество.

Стабильность и производительность перовскит-сенсибилизированных солнечных элементов ограничены из-за их склонности к деградации под воздействием влаги, температуры и ультрафиолетового излучения. Кроме того, проблемы с долговечностью материалов и нестабильность кристаллической структуры снижают эксплуатационный срок таких устройств. Несмотря на это, технологии перовскитных солнечных элементов обладают значительным потенциалом благодаря высокой эффективности преобразования солнечного света и возможности низкозатратного производства, что делает их перспективными для дальнейших исследований и коммерциализации. На рис. 10 показаны перовскитные солнечные элементы.

Преимущества перовскит-сенсибилизированных солнечных элементов: низкая стоимость производства, простая конструкция, небольшой вес, высокая гибкость, высокая эффективность. Недостатки: недостаточная стабильность при эксплуатации.

Черный кремниевый солнечный элемент

Наноструктуры на поверхности кремния являются перспективным решением для уменьшения прямого отражения в солнечных элементах, что может привести к снижению производственных затрат и повышению общей эффективности устройства. Однако из-за повышенной рекомбинации носителей заряда на наномасштабной поверхности предыдущие попытки использовать черный кремний в солнечных элементах привели к получению элементов с эффективностью менее 20 % [44].

Недавние исследования показали, что использование конформных пленок оксида алюминия обеспечивает высокоэффективную химическую и электрическую пассивацию поверхности, значительно снижая поверхностную рекомбинацию. Эксперименты показали, что солнечные элементы с толстыми блокирующими тыльными контактами могут достигать эффективности более 22 % [45], хотя пассивация передней поверхности остается критическим фактором, влияющим на транспорт носителей заряда. При сравнении с эталонными (стандартными) кремниевыми солнечными элементами аналогичной эффективности было показано, что черные нанокремниевые элементы могут обеспечить увеличение выходной мощности примерно

Таблица 1. Средние значения для наиболее важных типов солнечных элементов
Table 1. Average values for the most important types of solar cells

Тип технологии	Эффективность (%)	Стоимость производства ($/Вт)	Стабильность эксплуатации	Экологическая безопасность	Потенциал масштабирования
Монокристаллический кремний (Mono C-Si)[49]	20 – 22	Высокая	Отличная	Высокая	Отличный
Поликристаллический кремний (Poly C-Si)[50]	14 – 19	Средняя	Хорошая	Высокая	Отличный
Теллурид кадмия (CdTe)[51]	до 16	Низкая	Средняя	Низкая (токсичный Cd)	Хороший
CIGS ($CuInGaSe_2$)[52]	15 – 20	Средняя	Средняя	Средняя	Умеренный
Органические фотоэлементы (OPV)[53]	5 – 8	Очень низкая	Низкая	Высокая	Высокий
Перовскитные фотоэлементы [54]	до 23	Очень низкая	Низкая	Средняя	Ограниченный
Чёрный кремний [55]	до 22	Средняя	Хорошая	Высокая	Перспективный

на 3 %. Это увеличение обусловлено улучшением углового приема солнечного света — способностью элемента более эффективно улавливать и преобразовывать свет, поступающий под разными углами, что особенно важно, поскольку положение солнца меняется в течение дня.

Следует отметить, что термин «улучшенная рекомбинация» относится к сравнению с плоской (не нано) поверхностью кремния, где рекомбинация становится более существенной проблемой из-за увеличенной площади и структурных особенностей. Таким образом, при условии эффективной пассивации поверхности черные кремниевые солнечные элементы имеют реальный потенциал для промышленного применения благодаря сочетанию улучшенного поглощения света и контролируемой рекомбинации носителей заряда.

Четвертое поколение солнечных батарей

Четвертое поколение солнечных элементов — условные композиты, состоящие из полимеров и наночастиц, — менее затратно и более эффективно, чем предыдущие поколения, поскольку их можно складывать в тонкие многоспектральные слои. Эффективность солнечного элемента может быть увеличена благодаря наличию буферного слоя, обеспечивающего оптимальное распределение носителей заряда, при этом GaAs поглощает солнечную энергию в верхних элементах, а Si поглощает ее дополнительно в нижних элементах. Образовавшиеся носители заряда восстанавливаются на электродах в тонком буферном слое между солнечными элементами.

Солнечные элементы 4G — это четвертое поколение солнечных элементов, объединяющее неорганические и органические материалы для повышения эффективности и экономичности [46]. Эти элементы сочетают гибкость проводящих полимерных пленок со стабильностью наноструктур.

Пятое поколение солнечных батарей

Maxeon Solar Technologies разработала пятое поколение двусторонних солнечных панелей SunPower Performance 5, предназначенных для использования на крупных электростанциях. Согласно опубликованным данным компании, данные панели обладают рядом инновационных характеристик, обеспечивающих высокую производительность и долговечность. Их коммерческое внедрение планировалось на четвертый квартал 2020 г. с ожидаемой поддержкой общей мощности солнечных электростанций более 5 ГВт по всему миру [47]. Панели оснащены двусторонними моноэлементными ячейками PERC, изготовленными из больших 8-дюймовых пластин G12, что обеспечивает исключительную эффективность и превосходную устойчивость к затенению. С максимальной выходной мощностью 625 Вт эти панели идеально подходят для разработчиков электростанций [48].

Следовательно, кремниевые элементы первого поколения обеспечивают долгосрочную стабильность и эффективность. Технологические достижения могут снизить производственные затраты и упростить производственные процессы. Поколения 1 и 2 обладают превосходной стабильностью и сроком службы по сравнению с технологиями третьего и четвертого поколений. Органическая фотовольтаика (OPV) сталкивается с проблемами деградации, сосредоточившись на сборе энергии. Технологии третьего и четвертого поколений превосходят традиционные кремниевые элементы в условиях низкой освещенности. Будущие поколения солнечных элементов могут снизить затраты на электроэнергию и повысить устойчивость.

Сравнительный технико-экономический анализ фотоэлектрических технологий

Для объективной оценки возможностей различных технологий солнечных элементов был проведен сравнительный анализ их основных технических, экономических и экологических характеристик. В табл. 1 и на рис. 11 показаны средние значения для наиболее важных типов солнечных элементов.

Перовскитные фотоэлектрические элементы демонстрируют наибольшие перспективы с точки зрения соотношения эффективности к стоимости производства, однако проблемы со стабильностью

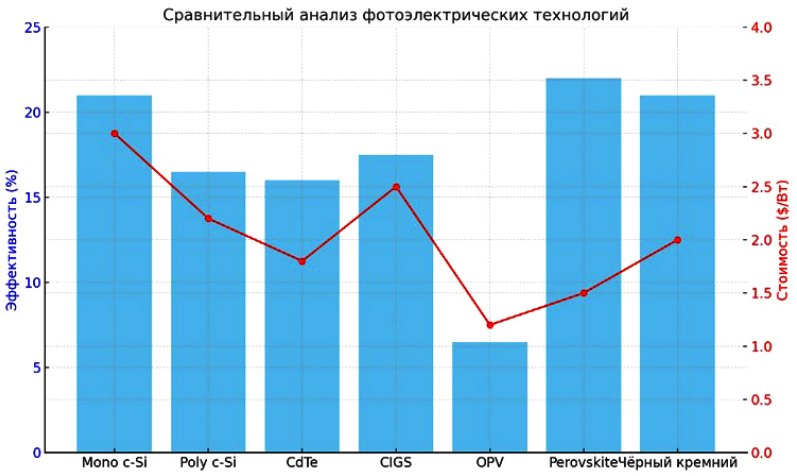

Рис. 11. Сравнение эффективности фотоэлектрических элементов и себестоимости производства в долларах за ватт
Fig. 11. Comparison of PV efficiency and production costs in dollars per watt

и долговечностью по-прежнему сдерживают их широкое применение. Черный кристалл (ячейки из черного кремния) также является перспективным вариантом благодаря своей высокой эффективности, умеренной стоимости и способности эффективно работать в условиях низкой освещенности.

На рис. 11 представлен график сравнения фотоэлектрической эффективности и производственных затрат в долларах на ватт производственной мощности семи ведущих типов технологий солнечных элементов. Перовскитные и монокристаллические кремниевые (Mono C-Si) фотоэлементы демонстрируют одни из самых высоких значений эффективности — свыше 21 %, что делает их особенно привлекательными с точки зрения производительности.

С другой стороны, элементы OPV являются наименее эффективными, но их проще всего производить, поэтому они конкурентоспособны. Черный кремний, в свою очередь, демонстрирует уникальное сочетание высокой эффективности и средней доступности, что делает его пригодным для крупномасштабного использования, включая случаи условий низкой освещенности. Согласно данным, производственные затраты таких технологий, как CdTe и CIGS, относительно низкие, их эффективность можно считать умеренной, что повышает их производственную осуществимость для промышленных и децентрализованных приложений.

Заключение

В исследовании представлен всесторонний обзор эволюции фотоэлектрических элементов от первого до пятого поколения. Особое внимание уделено сравнительному технико-экономическому анализу используемых материалов и технологий с акцентом на основные тенденции развития и направления исследований.

Результаты анализа показывают, что перовскитные солнечные элементы имеют большой потенциал благодаря сочетанию высокой эффективности и низкой стоимости, несмотря на проблемы, связанные с их стабильностью, которая остается предметом активных научных исследований. Черный кремний считается перспективной альтернативной технологией, особенно эффективной в условиях слабого освещения и в промышленных применениях.

Существующие проблемы, включая токсичность некоторых материалов (например, кадмия и свинца), а также вопросы масштабируемости и долговечности устройств, можно решить путем внедрения инновационных подходов в материаловедении, проектировании ячеек и усовершенствованных производственных процессах. Фотоэлектрические технологии играют ключевую роль в глобальном переходе к устойчивым и децентрализованным энергетическим системам.

Благодарности / Acknowledgements

Авторы выражают благодарность факультету технологии машиностроения Белгородского технологического университета им. В. Г. Шухова за возможность реализации данного исследовательского проекта. Авторы также признательны заведующему кафедрой за постоянную поддержку на этапе исследований.

The authors express their gratitude to the Mechanical Engineering Technology Department of Belgorod Technological University named after V. G. Shukhov for the opportunity to realize this research project. The authors are also grateful to the Head of the Department for the continuous support at the research stage.

Список источников / References

1. Mikhailov S. A., Michailow W., Beere H. E., Ritchie D. A. Theory of the in-plane photoelectric effect in two-dimensional electron systems. *Physical Review B.* 2022. Vol. 106, no. 7. 075411. DOI: 10.1103/PhysRevB.106.075411.

2. Bhattacharya S., John S. Beyond 30% conversion efficiency in silicon solar cells: a numerical demonstration. *Scientific Reports.* 2019. Vol. 9, no. 1. P. 12482. DOI: 10.1038/s41598-019-48981-w.

3. Potters J. Going Beyond the World of Atoms: Heinrich Hertz and the Electromagnetic Worldview. *In: A History of Physics: Phenomena, Ideas and Mechanisms: Essays in Honor of Salvo D'Agostino.* Cham: Springer International Publishing, 2024. P. 331–359.

4. Wang K. X., Yu Z., Liu V. [et al.]. Absorption enhancement in ultrathin crystalline silicon solar cells with antireflection and light-trapping nanocone gratings. *Nano Letters.* 2012. Vol. 12, no. 3. P. 1616–1619. DOI: 10.1021/nl204550q.

5. Hegedus S. S., Luke A. Status, trends, problems and bright future of solar electricity from photovoltaics. *Handbook of Photovoltaic Science and Technology.* John Wiley&Sons, 2003. P. 1—43. ISBN 9780471491965. DOI: 10.1002/0470014008.

6. Richter A., Müller R., Benick J. [et al.]. Design rules for high-efficiency both-sides-contacted silicon solar cells with balanced charge carrier transport and recombination losses. *Nature Energy.* 2021. Vol. 6, no. 4. P. 429—438. DOI: 10.1038/s41560-021-00805-w.

7. Yoshikawa K., Yoshida W., Irie T. [et al.]. Exceeding conversion efficiency of 26% by heterojunction interdigitated back contact solar cell with thin film silicon technology. *Solar Energy Materials and Solar Cells.* 2017. Vol. 173. P. 37—42. DOI: 10.1016/j.solmat.2017.06.024.

8. Rabaia M. K., Sayed E. T., Abdelkareem M. A., Olabi A. G. Developments of solar photovoltaics. *Renewable Energy.* 2023. Vol. 1: Solar, Wind, and Hydropower. P. 175—195. DOI: 10.1016/B978-0-323-99568-9.00011-X.

9. Fadhil N. A., Elmnfi M., Abdulrazig O. D., Habib L. J. Design and modeling of hybrid photovoltaic micro-hydro power for Al-Bakur road lighting: A case study. *Materials Today: Proceedings.* 2022. Vol. 49. P. 2851—2857. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.10.072.

10. Yoshikawa K., Kawasaki H., Yoshida W. [et al.]. Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%. *Nature Energy.* 2017. Vol. 2, no. 5. P. 1—8. DOI: 10.1038/nenergy.2017.32.

11. Pastuszak J., Wegierek P. Photovoltaic cell generations and current research directions for their development. *Materials.* 2022. Vol. 15, no. 16. 5542. DOI: 10.3390/ma15165542.

12. Moria H., Elmnfi M. Feasibility Study into Possibility Potentials and Challenges of Renewable Energy in Libya. *International Journal of Advanced Science and Technology.* 2020. Vol. 29, no. 3. P. 12546—12560.

13. Jenkins P., Elmnfee M., Eunice A., Emhamed A. Hybrid Power Generation by Using Solar and Wind Energy: Case Study. *World Journal of Mechanics.* 2019. Vol. 9, no. 4. P. 81—93. DOI: 10.4236/wjm.2019.94006.

14. Eldin A. H., Refaey M., Farghly A. A review on photovoltaic solar energy technology and its efficiency. *Proceedings of the 17th International Middle-East Power System Conference (MEPCON'15).* Mansoura University, Egypt. 2015. P. 63.

15. Ayed S. K., Elmnifi M., Moria H., Habeeb L. J. Economic and technical feasibility analysis of hybrid renewable energy (PV/Wind) grid-connected in Libya for different locations. *International Journal of Mechanical Engineering.* 2022. Vol. 7, no. 1. P. 930—943.

16. Taşçıoğlu A., Taşkın O., Vardar A. A power case study for monocrystalline and polycrystalline solar panels in Bursa City, Turkey. *International Journal of Photoenergy.* 2016. Vol. 2016. 7324138. DOI: 10.1155/2016/7324138.

17. Becker C., Amkreutz D., Sontheimer T. [et al.]. Polycrystalline silicon thin-film solar cells: Status and perspectives. *Solar Energy Materials and Solar Cells.* 2013. Vol. 119. P. 112—123. DOI: 10.1016/J.SOLMAT.2013.05.043.

18. Agarwal S., Prajapati Y. K., Kumar A. Advanced materials-based nano-absorbers for thermo-photovoltaic cells. *Advances in Terahertz Technology and Its Applications.* Springer, Singapore, 2021. P. 191—209. DOI: 10.1007/978-981-16-5731-3_11.

19. Bullock J., Hettick M., Geissbühler J. [et al.]. Efficient silicon solar cells with dopant-free asymmetric heterocontacts. *Nature Energy.* 2016. Vol. 1, no. 3. P. 1—7. 15031. DOI: 10.1038/nenergy.2015.31.

20. Von Gastrow G., Alcubilla R., Ortega P. [et al.]. Analysis of the atomic layer deposited Al2O3 field-effect passivation in black silicon. *Solar Energy Materials and Solar Cells.* 2015. Vol. 142. P. 29—33. DOI: 10.1016/J.SOLMAT.2015.05.027.

21. Mehta S. PV Technology, Production and Cost. Outlook: 2010—2015. GTM, 2011.

22. Kapadnis R. S., Bansode S. B., Supekar A. T. [et al.]. Cadmium telluride/cadmium sulfide thin films solar cells: a review. *ES Energy & Environment.* 2020. Vol. 10, no. 2. P. 3—12. DOI: 10.30919/esee8c706.

23. Oh J., Yuan H. C., Branz H. M. An 18.2%-efficient black-silicon solar cell achieved through control of carrier recombination in nanostructures. *Nature Nanotechnology.* 2012. Vol. 7, no. 11. P. 743—748. DOI: 10.1038/nnano.2012.166.

24. Ramanujam J., Bishop D. M., Todorov T. K. [et al.]. Flexible CIGS, CdTe and a-Si: H based thin film solar cells: a review. *Progress in Materials Science.* 2020. Vol. 110. 100619. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2019.100619.

25. Green M. A. Third generation photovoltaics: Ultrahigh conversion efficiency at low cost. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications.* 2001. Vol. 9, no. 2. P. 123—135. DOI: 10.1002/pip.360.

26. Otajonov S. M., Ergashev R. N., Axmedov T., Usmonov Y., Karimov B. Photoelectric properties of solar cells based on pCdTe-nCdS and pCdTe-nCdSe heterostructures. *Journal of Physics: Conference Series.* 2022. Vol. 2388, no. 1. P. 012062. DOI: 10.1088/1742-6596/2388/1/012062.

27. Osterrieder T., Schmitt F., Lüer L. [et al.]. Autonomous optimization of an organic solar cell in a 4-dimensional parameter space. *Energy & Environmental Science.* 2023. Vol. 16, no. 9. P. 3984—3993. DOI: 10.48550/arXiv.2305.08248.

28. Karlson D. E., Vronsky K. R. Solar cell made of amorphous silicon. *Letters on Applied Physics.* 1976. Vol. 28, no. 11. P. 671—673. DOI: 10.1063/1.88617.

29. Carlson D. E., Wronski C. R. Amorphous silicon solar cells. Amorphous Semiconductors. *Topics in Applied Physics.* Vol. 36. 2005. P. 287—329. DOI: 10.1007/3-540-16008-6_164.

30. Francis O. I., Ikenna A. Review of dye-sensitized solar cell (DSSCs) development. *Natural Science.* 2021. Vol. 13, no. 12. P. 496—509. DOI: 10.4236/ns.2021.1312043.

31. Shalini S., Balasundaraprabhu R., Kumar T. S. [et al.]. Status and outlook of sensitizers/dyes used in dye sensitized solar cells (DSSC): a review. *International Journal of Energy Research.* 2016. Vol. 40, no. 10. P. 1303—1320. DOI: 10.1002/er.3538.

32. Huaulmé Q., Mwalukuku V. M., Joly D. [et al.]. Photochromic dye-sensitized solar cells with light-driven adjustable optical transmission and power conversion efficiency. *Nature Energy.* 2020. Vol. 5, no. 6. P. 468—477. DOI: 10.1038/s41560-020-0624-7. Photochromic dye-sensitized solar cells with light-driven adjustable optical transmission and power conversion efficiency.

33. Jan J., Van J., Zhao K. [et al.]. CdSeTe/CdS Type-I Core/Shell Quantum Dot Sensitized Solar Cells with Efficiency over 9%. *Journal of Physical Chemistry C.* 2015. Vol. 119, no. 52. P. 28800—28808. DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b10546.

34. Smestad G. P., Gratzel M. Demonstration of electron transfer and nanotechnology: A natural dye-sensitized nanocrystalline energy converter. *Journal of Chemical Education.* 1998. Vol. 75, no. 6. 752. DOI: 10.1021/ed075p752.

35. Lee H., Leventis H. K., Moon S. J. [et al.]. Solid-state solar cells sensitized by PbS and CdS quantum dots: "old concepts, new results". *Advanced Functional Materials.* 2009. Vol. 19, no. 17. P. 2735—2742. DOI: 10.1002/adfm.200900081.

36. Jan E.-H., Datta D., Junjun D. [et al.]. Synthesis, modeling, and characterization of 2D materials, and their heterostructures. Elsevier, 2020. ISBN 9780128184752.

37. Lee Y.-L., Lo Y.-S. Highly Efficient Quantum-Dot-Sensitized Solar Cell Based on Co-Sensitization of CdS/CdSe. *Advanced Functional Materials.* 2009. Vol. 19, no. 4. P. 604—609. DOI: 10.1002/adfm.200800940.

38. Chebrol W. T., Kim H.-J. Recent progress in quantum dot sensitized solar cells: Recent progress in quantum dot sensitized solar cells: an inclusive review of photoanode, sensitizer, electrolyte, and the counter electrode. *Journal of Materials Chemistry C.* 2019. Vol. 7, no. 17. P. 4911—4933. DOI: 10.1039/c8tc06476h.

39. Simia O. K., Radhakrishnan P., Ashok A. [et al.]. Engineered nanomaterials for energy applications — "Nanomaterials for Solar

Energy Generation". *Handbook of Nanomaterials for Industrial Applications.* Elsevier BV, Amsterdam, Netherlands. 2018. P. 751–767. DOI: 10.1016/B978-0-12-813351-4.00043-2.

40. Chen C., Zheng S., Song H. Photon management to reduce energy loss in perovskite solar cells. *Chemical Society Reviews.* 2021. Vol. 50, no. 12. P. 7250–7329. DOI: 10.1039/D0CS01488E.

41. Jeong S. H., Park J., Han T. H. [et al.]. Characterizing the efficiency of perovskite solar cells and light-emitting diodes. *Joule*. 2020. Vol. 4, no. 6. P. 1206–1235. DOI: 10.1016/j.joule.2020.04.007.

42. Yun S., Qin Y., Uhl A. R. [et al.]. New-generation integrated devices based on dye-sensitized and perovskite solar cells. *Energy & Environmental Science.* 2018. Vol. 11, no. 3. P. 476–526. DOI: 10.1039/C7EE03165C.

43. Fu F., Feurer T., Weiss T. P. [et al.]. High-efficiency inverted semi-transparent planar perovskite solar cells in substrate configuration. *Nature Energy.* 2016. Vol. 2, no. 1. P. 1–9. 16190. DOI: 10.1038/nenergy.2016.190.

44. Fan Z., Cui D., Zhang Z. [et al.]. Recent progress of black silicon: From fabrications to applications. *Nanomaterials.* 2020. Vol. 11, no. 1. 41. DOI: 10.3390/nano11010041.

45. Desa M. M., Sapeai S., Azhari A. W. [et al.]. Silicon back contact solar cell configuration: A pathway towards higher efficiency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2016. Vol. 60. P. 1516–1532. DOI: 10.1016/j.rser.2016.03.004.

46. Nayak P. K., Mahesh S., Snaith H. J., Cahen D. Photovoltaic solar cell technologies: analysing the state of the art. *Nature Reviews Materials.* 2019. Vol. 4, no. 4. P. 269–285. DOI: 10.1038/s41578-019-0097-0.

47. Kruitwagen L., Story K. T., Friedrich J. [et al.]. A global inventory of photovoltaic solar energy generating units. *Nature.* 2021. Vol. 598, no. 7882. P. 604–610. DOI: 10.1038/s41586-021-03957-7.

48. Sopian K., Cheow S. L., Zaidi S. H. An overview of crystalline silicon solar cell technology: Past, present, and future. *AIP Conference Proceedings*. 2017. Vol. 1877, no. 1. 020004. DOI: 10.1063/1.4999854.

49. Ortiz Lizcano J. C., Procel P., Calcabrini A. [et al.]. Colored optic filters on crystalline silicon interdigitated back contact solar cells for building integrated photovoltaic applications. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications.* 2022. Vol. 30, no. 4. P. 401–435. DOI: 10.1002/pip.3504.

50. Alarifi I. M. Advanced selection materials in solar cell efficiency and their properties – A comprehensive review. *Materials Today: Proceedings.* 2023. Vol. 81. P. 403–414. DOI: 10.20944/preprints202102.0345.v1.

51. Al-Ezzi A. S., Ansari M. N. M. Photovoltaic solar cells: a review. *Applied System Innovation.* 2022. Vol. 5, no. 4. 67. DOI: 10.3390/asi5040067.

52. Shah N., Shah A. A., Leung P. K. [et al.]. A review of third generation solar cells. *Processes.* 2023. Vol. 11, no. 6. 1852. DOI: 10.3390/pr11061852.

53. Liu Z., Lin R., Wei M. [et al.]. All-perovskite tandem solar cells achieving >29% efficiency with improved (100) orientation in wide-bandgap perovskites. *Nature Materials.* 2025. P. 1–8. DOI: 10.1038/s41563-024-02073-x.

54. Savin H., Repo P., Von Gastrow G[et al.]. Black silicon solar cells with interdigitated back-contacts achieve 22.1% efficiency. *Nature Nanotechnology.* 2015. Vol. 10, no. 7. P. 624–628. DOI: 10.1038/nnano.2015.89.

55. Best research-cell efficiency chart. *National Renewable Energy Laboratory (NREL) Website.* 2023. https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html (accessed: 14.05.2025.).

ДУЮН Татьяна Александровна, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова (БГТУ), г. Белгород.
SPIN-код: 4058-1103
AuthorID (РИНЦ): 316225
ORCID: 0000-0002-2051-6202
Адрес для переписки: tanduun@mail.ru.
ЭЛМНФИ МОНАЕМ ХАМАД, аспирант кафедры «Технология машиностроения» БГТУ, г. Белгород.
ORCID: 0000-0003-4074-1877
Адрес для переписки: Monm.hamad@yahoo.co.uk.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 01.03.2025; одобрена после рецензирования 02.06.2025; принята к публикации 05.06.2025.

DUYUN Tatyana Aleksandrovna, Doctor of Technical Sciences, Head of the Mechanical Engineering Technology Department, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov (BSTU), Belgorod.
SPIN-code: 4058-1103
AuthorID (RSCI): 316225
ORCID: 0000-0002-2051-6202
Correspondence address: tanduun@mail.ru.
ELMNIFI MONAEM HAMAD, Postgraduate at the Mechanical Engineering Technology Department, BSTU, Belgorod.
ORCID: 0000-0003-4074-1877
Correspondence address: Monm.hamad@yahoo.co.uk

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 01.03.2025; approved after reviewing 02.06.2025; accepted for publication 05.06.2025.