

Перспективы перовскитных солнечных элементов на основе исследований моделей и характеристик

П. Д. Бадильо, А. Э. Дегтерев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
pbadillo@gmail.com

Аннотация. Перовскитовые солнечные элементы пробудили интерес в научном сообществе за последние несколько лет благодаря впечатляющему росту эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую, которая достигла значений, очень близких к более традиционным технологиям производства. Технология создания перовскитных солнечных элементов демонстрирует преимущества в стоимости изготовления и гибкость для применения в широком диапазоне материалов. Но, тем не менее, этот новый тип солнечных элементов еще не появился на коммерческом рынке из-за некоторых проблем, которые необходимо решить раньше: надежность и использование опасных материалов, таких как свинец. За это время были проведены исследования в полевых условиях, и хотя большая часть работы выполняется в лаборатории, очень важная часть достигается путем определения характеристик и моделирования перовскитового солнечного элемента, что позволяет заранее проанализировать результаты предлагаемых улучшений. Цель этой статьи - выяснить, какие инструменты используются в текущем исследовании для измерения наиболее вероятных результатов и изучения возможных будущих применений этих перспективных материалов.

Ключевые слова: перовскитные солнечные элементы; характеристика и моделирование солнечных элементов; перспективы солнечной энергии; измерение солнечных элементов

I. ВВЕДЕНИЕ

В современном мире электричество стало основной потребностью человеческого общества, и с каждым днем потребление энергии на душу населения растет. Фактически, более высокое потребление энергии может быть связано с наиболее развитым обществом с точки зрения уровня жизни [1].

Необходимая им энергия получается различными способами, с высокой зависимостью от природных невозобновляемых материалов, таких как нефть, уголь и газ. Для получения энергии из этих материалов, помимо того, что они не могут быть регенерированы, они создают токсичные выбросы и требуют большого количества воды, еще одного элемента, который стал предметом серьезной озабоченности правительств и научного сообщества.

Эти факты привели к поиску новых источников энергии, которые должны поступать из возобновляемых источников. Сегодня существует множество технологий, которые получают энергию из широкого спектра материалов и технологий, использующих природные

возобновляемые источники, такие как ветер, солнце и приливы, снижая вредное воздействие, наблюдаемое при использовании ископаемого топлива. В 2021 году между всеми этими видами возобновляемых источников энергии было достигнуто почти 38 % от общего мирового производства энергии [2].

Солнечная энергия является одним из наиболее важных источников энергии среди возобновляемых видов, с долей 3,6% между всеми источниками производства энергии. Технологии солнечной энергетики используют энергию, поступающую от Солнца, которая излучается на Землю в виде света и тепла. Он в основном состоит из видимого света и инфракрасного излучения, но также из ультрафиолетового излучения и других форм излучения. Солнечная энергия в настоящее время используется для получения электрической и тепловой энергии, являясь постоянной, дешевой, чистой и безопасной формой получения энергии.

Существуют различные способы получения электрической энергии из солнечной энергии, и одним из наиболее широко применяемых является использование фотоэлектрических элементов, также известных как солнечные элементы. Солнечные элементы изготавливаются из различных материалов, которые обладают свойством поглощать солнечный свет и испускать электроны на основе фотоэлектрического эффекта, генерируя поток электрического тока. Солнечные элементы объединяются в солнечные панели и устанавливаются на крышах или на наземных солнечных фермах для сбора солнечной энергии.

Наиболее широкодоступные солнечные элементы изготовлены из кристаллического кремния, который используется почти в 95 % производимых сегодня солнечных элементов. Этот тип солнечных элементов показал хорошую надежность и приемлемую стоимость, но, с другой стороны, эффективность преобразования этой технологии уже достигает своего теоретического максимума (29,43 %, в то время как коммерчески доступные кремниевые солнечные элементы имеют КПД около 20 %).

Чтобы попытаться снизить затраты и повысить получаемую эффективность, специалисты в этой области продолжают поиск инновационных подходов. Существуют различные стратегии, позволяющие попытаться решить эти проблемы: новые материалы и изменения в составе и структуре традиционных материалов, многопереходные материалы, оптические

концентраторы и другие. По сравнению с элементами из кристаллического кремния существуют материалы, которые дешевле производить и наносить на различные поверхности, что может значительно расширить спектр применения технологий солнечных элементов.

II. ПЕРОВСКИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

A. Обзор

Перовскитовые солнечные элементы относятся к семейству тонкопленочных элементов и получили свое название из-за их кристаллической структуры, открытой в середине девятнадцатого века. Эта структура описывается формулой ABX_3 . В такого рода структуре А и В представляют собой два положительно заряженных иона (катионы, обычно разного размера, причем В больше), а X – отрицательно заряженный ион (анион, часто оксид), который создает связи между катионами А и В. Этот тип минералов в основном встречается в дикой природе в виде оксидов (силикатов, таких как минералы бриджманита), но также их можно рассматривать как фторид, хлорид, гидроксид, арсенид и интерметаллические соединения. Однако перовскитные материалы могут быть синтезированы, и в настоящее время существуют композитные материалы, такие как металлосоединения, гибридные органико-неорганические и безметаллические перовскиты; были разработаны даже перовскиты на основе благородных газов. В то время как исходный минерал перовскит образован кальцием, титаном и кислородом ($CaTiO_3$), перовскитоподобные материалы приобретают широкий спектр свойств в зависимости от состава своей структуры, которые включают фотолюминесценцию, магнитосопротивление, сверхпроводимость, спин-зависимый транспорт и могут работать в качестве универсального катализатора в многочисленных применениях [3]. Благодаря этому перовскиты являются интересной областью исследований для физиков, химиков и материаловедов.

Перовскитные материалы появились не так давно в области разработки солнечных элементов. За этот короткий промежуток времени они продемонстрировали большой потенциал стать решением большинства проблем, связанных с традиционными и широкодоступными технологиями, используемыми в этой области, такими как солнечные панели на основе кристаллического кремния. Они представляют собой тип тонкопленочных ячеек, преимущество которых заключается в нанесении практически на любой доступный материал подложки (с использованием методов печати, нанесения покрытий или вакуума даже из раствора) благодаря возможности нанесения при относительно низких температурах (ниже $85\text{ }^\circ\text{C}$), что делает их в то же время коммерчески выгодными. Кроме того, эффективность, достигнутая сегодня, сравнима с эффективностью, полученной при использовании широкодоступных элементов из кристаллического кремния, и они продемонстрировали отличные оптоэлектронные свойства (например, большой индекс поглощения и длительный срок службы носителей). Перовскитные материалы также показали свою полезность для других применений, таких как лазеры [4] и улучшения светового излучения для дисплеев сверхвысокого разрешения [5] благодаря их стойкости к поверхностным дефектам.

Перовскитные материалы имеют запрещенную зону, которую можно настраивать с использованием различных материалов, что делает их отличными кандидатами для tandemных солнечных элементов. В солнечных элементах такого типа материал с более высокой запрещенной зоной поглощает фотоны с более высокой энергией, в то время как другой материал с более низкой запрещенной зоной (который может работать отдельно и электрически соединиться в более простой конфигурации с 4 выводами или проходить электрически через рекомбинационный переход в конфигурации с 2 выводами) поглощает фотоны с более низкой энергией. Такая конфигурация продемонстрировала повышение эффективности преобразования, которая достигла 29 %, благодаря сочетанию перовскитных и традиционных кристаллических кремниевых солнечных элементов. Ожидается, что эти показатели эффективности могут быть улучшены с использованием новых технологий изготовления и сделают их коммерчески привлекательными, поскольку современные методы tandemного внедрения обычно делают их более дорогими. Вторым способом повышения эффективности преобразования солнечных элементов является использование оптических концентраторов: специально прикрепленных линз, которые концентрируют входящий свет с разных направлений в матрицу солнечного элемента; этот метод уже показал хорошие результаты в других методах производства солнечных элементов, но затраты на производство такого рода улучшений

Однако, чтобы достичь коммерческого статуса, перовскитовые солнечные элементы должны доказать, что они могут обеспечить хорошую надежность (около 20 лет, как у их аналогов из кристаллического кремния), чтобы инвестиции в структуру солнечной энергии были прибыльными, что делает эту проблему наиболее важной, над которой работают ученые всего мира. Глубоко работающий в настоящее время. Перовскитные материалы, используемые для солнечных элементов (металлоорганический галогенид перовскит), сегодня имеют тенденцию со временем разрушаться из-за влажности, в результате чего они теряют некоторые из оптических и электрических свойств и эксплуатационных характеристик, которые их характеризуют. Вторая проблема, которую пытаются решить исследователи, заключается в том, что тестовые образцы, которые дали наилучшие результаты по эффективности преобразования, содержат свинец – токсичный элемент, который должен быть либо полностью удален из конструкции (заменен другими материалами), надлежащим образом инкапсулирован, чтобы избежать вреда для людей и окружающей среды, либо тщательно обработан во время изготовления и процессы окончательной утилизации [6].

B. Разработка перовскитных солнечных элементов

Не все типы перовскитных материалов подходят для создания солнечных элементов из-за сильной электростатической связи в кристаллической структуре, что делает их запрещенную зону неподходящей для данного применения. Mitzi и его команда в 1994 году начали работать над перовскитами, содержащими галогениды, для устройств оптоэлектроники, что открыло путь для текущих исследований их в качестве материалов для использования в солнечных элементах.

О первом применении перовскитных материалов в области фотовольтаики было сообщено в 2009 году в работе проф. Miyasaka и его команда [7]. Они использовали для ячейки органико-неорганический галогенид ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$), который достиг эффективности преобразования 3,8 %, что продолжалось в течение нескольких минут. Всего три года спустя, в 2012 году, работы Grätzel [8] и Snath [9] улучшили не только эффективность преобразования до 9,7 и 10,9 % соответственно, но и его долговечность, заменив электролит на твердотельный дырочный транспортный слой, превратив эти достижения в самый замечательный в этой области новый материал с тех пор, как разработка солнечных элементов из кристаллического кремния в 1950-х годах. Благодаря этим первым работам в этой области эффективность преобразования повысилась до достижения 25,7 % в 2022 году [10], а вместе с этим улучшился состав используемого материала и конструкция ячейки в целом (применяемый метод нанесения покрытия, материалы, используемые для контактов, процесс изготовления).

В этой статье мы предложили обобщить основные проблемы, с которыми сегодня сталкивается научное сообщество, работающее в этой области. Есть три основных направления, в которых ведутся исследования: повышение эффективности, повышение надежности и долговечности элементов и отказ от использования материалов, которые могут быть опасны для окружающей среды и здоровья. Мы проанализировали их в трех разделах, чтобы представить каждую из основных проблем, изучаемых сегодня, описав результаты недавних исследований по каждой из них и какие инструменты были использованы.

III. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Как обсуждалось в предыдущих разделах, эффективность преобразования является одной из основных тем не только для перовскитных солнечных элементов, но и для любого типа солнечных элементов, включая коммерческие и высокопроизводительные (таандем, с концентратором, в качестве примеров). Идея состоит в том, чтобы попытаться получить как можно больше энергии из солнечного света и избежать потери энергии на этапе преобразования.

Существует множество аспектов, которые можно изучить для достижения большей эффективности преобразования, таких как улучшение дизайна, состава, методов. Существуют также инновационные методы проектирования, такие как использование машинного обучения для настройки параметров проектирования перовскитных материалов на основе модели, которая содержит результаты нескольких образцов [11]. В следующих подразделах мы рассмотрим некоторые улучшения, описанные в литературе, и используемые инструменты.

A. Конструкция перовскитового солнечного элемента

Мы уже рассмотрели, что одним из первых усовершенствований, внесенных в первые перовскитовые солнечные элементы, был переход с жидкого на твердотельный транспортный слой, что почти в три раза повысило эффективность преобразования солнечного элемента; в результате мы можем сказать, что работа над дизайном перовскитовых материалов является важной частью для получения

лучших результатов, но также и дизайн других компонентов, окружающих его, таких как электронные и дырочные транспортные слои и контакты.

В своей статье Li и др. [12] показали нам использование моделей для лучшего понимания физики, лежащей в основе проектирования как органических, так и перовскитных солнечных элементов. Они демонстрируют, как электронные процессы внутри всех интерфейсов между различными материалами и даже контактами играют главную роль в полученных конечных результатах, наряду с такими механизмами, как прямая зонная и поверхностная рекомбинация и миграция ионов. В обзоре они делают вывод о важности использования передовых моделей солнечных элементов для лучшего моделирования поведения перовскитных солнечных элементов в таких программах, как PC1D, SCAPS и других, которые широко используются в области исследований и будут полезны в будущем массовом производстве такого рода элементов. В 2020 году Tian и др. [13] опубликовали статью о полностью неорганических солнечных элементах и о том, как синергетическая оптимизация самих перовскитных пленок и интерфейсов устройств может улучшить результаты, полученные с помощью солнечных элементов этого типа. Они говорят о важности работы с дефектами кристаллической структуры (которые могут действовать как центры рекомбинации), а также о более стабильном переносе заряда и материалах электродов для обеспечения лучшего извлечения заряда.

SCAPS – это инструмент моделирования, используемый также для тестирования различных составов перед лабораторными испытаниями. В литературе можно найти работы, в которых, помимо прочего, проводятся имитационные исследования перовскита на основе свинца [14], перовскита формамидиния [15] и бессвинцового олова на основе формамидиния [16–17]. Моделирование на инструменте SCAPS также используется для тестирования других компонентов перовскитных солнечных элементов, таких как исследование, проведенное Gamal et al. [18] по бессвинцовому использованию $\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}$ в качестве транспортного слоя, или работа Husainat et al. [19] по использованию контактов Au для перовскита из йодистого свинца метиламмония. солнечные элементы. Кроме того, Raoui и др. [20] и Vansal и др. [21] протестировали использование различных материалов для слоев переноса электронов и дырок и для замены золотых контактов с использованием SCAPS для имитации результатов. Другим широко используемым вариантом моделирования перовскитных солнечных элементов является программа AMPS, которая присутствует в исследовании идеальной геометрии солнечного элемента Liu et al. [22].

B. Характеристики и свойства

Некоторые параметры солнечного элемента могли бы дать нам общее представление о его производительности с точки зрения эффективности преобразования, а также с точки зрения их перспектив улучшения его характеристик. Некоторые из них – кривая ток-напряжение (I-V), кривая плотность тока-напряжение, плотность тока короткого замыкания (J_{sc}), напряжение холостого хода (V_{oc}) и коэффициент заполнения (FF).

Capriglio и др. al [23–24] опубликовал различные статьи о важности некоторых параметров, чтобы оценить взаимосвязь между этими различными параметрами.

IV. ДЕГРАДАЦИЯ ПЕРОВСКИТОВЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Эта проблема, как уже упоминалось, является одной из самых важных, препятствующих появлению этого нового материала на рынке. Исследования [25], проведенные недавно, показали, что этот тип солнечных элементов может работать без потери своих первоначальных свойств в течение одного года. Другое исследование, проведенное Tress и соавт. [26], воспроизвело реальные условия в лабораторной среде, чтобы смоделировать механизмы производительности и скорости деградации в неидеальной среде.

Помимо прямого экспериментального исследования в лаборатории, которое является наиболее распространенным подходом к анализу проблемы, существуют исследования, пытающиеся связать некоторые показатели производительности солнечного элемента с его состоянием деградации: Julien и др. [27] описали корреляции между оптико-электрическими параметрами и эволюцией деградации солнечного элемента. солнечный элемент. Кроме того, Хи и др. [28] использовали численную модель кристаллической структуры для изучения влияния влаги на механизмы деградации перовскитовых солнечных элементов.

V. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОЛОВА ДЛЯ БЕССВИНЦОВЫХ ПЕРОВСКИТНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Чтобы избежать проблем, которые могут возникнуть при использовании свинца при изготовлении перовскитовых солнечных элементов, проводится множество исследовательских работ, направленных на его замену в составе материала. В литературе можно найти ионы различных металлов, таких как медь, висмут, германий, серебро, никель и даже кадмий (которые вызывали аналогичные опасения по поводу его использования из-за его потенциальной опасности для окружающей среды), но олово (Sn) имеет лучшие перспективы из-за его лучшей совместимости с окружающей средой и многообещающего свойства, между прочим, оптоэлектрические (например, высокое поглощение).

Первые эксперименты с оловом в качестве компонента галогенидно–перовскитных солнечных элементов были проведены в 2014 году [29], которые смогли достичь эффективности преобразования 5-6%. Их исследования показали более узкую запрещенную зону между 1,2 и 1,3 эВ, что может позволить лучше использовать поступающую световую энергию, но, с другой стороны, они оказались очень нестабильными и быстро деградировали. Текущие исследования этого состава перовскита направлены на решение существующих проблем, чтобы превзойти по производительности их аналоги на основе свинца.

Одним из особых преимуществ перед перовскитами из галогенида свинца является уже упомянутая оптическая запрещенная зона. На основе свинца эффективность преобразования достигла 25 % и имеет запрещенную зону порядка 1,5 – 1,6 эВ, что, согласно модели Shockley–Queisser, устанавливает максимальную теоретическую эффективность около 30 %. Основываясь

на той же модели и упомянутой запрещенной зоне, перовскиты на основе олова могут достигать теоретической эффективности преобразования 32,5 %, демонстрируя хорошие перспективы для достижения еще большей эффективности преобразования. Эта разница в запрещенной зоне также может быть полезна для создания tandemных солнечных элементов "перовскит на перовските", что может сделать изготовление такого рода высокоэффективных солнечных элементов более экономичным.

Помимо уже упомянутой нестабильности (которую можно преодолеть, работая над процессом инкапсуляции элемента), одной из важных наблюдаемых проблем является более быстрая рекомбинация по сравнению с материалом на основе свинца. Эта проблема может привести к тому, что ячейка в худшем случае будет вести себя как проводник. Возможным решением представляется работа по легированию материала с использованием SnF₂.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой статье мы описали основные характеристики перовскитовых солнечных элементов, а также их различные составы. Мы обсудили основные направления, по которым ведутся исследования в этой области, чтобы сделать этот вид солнечных элементов коммерчески доступным.

Инструменты моделирования являются важным способом ускорить процесс проектирования перовскитовых солнечных элементов и спрогнозировать возможное поведение тестируемого образца в определенных условиях. Мы изучили, как эти инструменты используются для тестирования различных составов перовскитового материала, а также как другие компоненты солнечного элемента влияют на эффективность преобразования энергии в целом, такие как транспортные слои и контакты. Кроме того, инструменты моделирования окружающей среды могут быть использованы для оценки проблемы деградации клеток, проблемы, которую трудно оценить без правильного знания механизмов разрушения материала. Мы также изучили, как некоторые оптоэлектронные параметры могут дать нам некоторые инструменты для прогнозирования будущей разработки определенного типа варианта перовскитового солнечного элемента.

В свете многочисленных исследований, проведенных сегодня в этой области, мы можем видеть, что на успех этой технологии возлагаются большие надежды, поскольку она обещает достичь по крайней мере такой же эффективности преобразования при гораздо меньших затратах и быть более гибкой в применении. Однако существует настоятельная необходимость найти решения уже выявленных проблем, и исследовательские усилия замедляются, демонстрируя свои результаты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Luceño-Sánchez J.A., Díez-Pascual A.M., Peña Capilla R. Materials for Photovoltaics: State of Art and Recent Developments. *Int J Mol Sci.* 2019. Vol. 20, № 4. P. 976. DOI: 10.3390/ijms20040976.
- [2] "World Electricity Generation," World Energy Data. Available at <https://www.worldenergydata.org/world-electricity-generation/> (accessed 20 March 2023).
- [3] Assirey E.A.R. Perovskite synthesis, properties and their related biochemical and industrial application. *Saudi Pharm J.* 2019. Vol. 27, № 6. P. 817–829. DOI: 10.1016/j.jpsps.2019.05.003.

- [4] Deschler F., Price M., Pathak S., Klintberg L.E., Jaraush D.-D., Higler R., Hüttner S., Leijtens T., Stranks S.D., Snaith H.J., Atattüre M., Phillips R.T., Friend R.H. High Photoluminescence Efficiency and Optically Pumped Lasing in Solution-Processed Mixed Halide Perovskite Semiconductors. *J. Phys. Chem. Lett. American Chemical Society*, 2014. Vol. 5, № 8. P. 1421–1426. DOI: 10.1021/jz5005285.
- [5] Bae J., Lee S., Ahn S., Kim J.H. Wajahat M., Chang W.S., Yoon S.-Y., Kim J.T., Seol S.K., Pyo J. 3D-Printed Quantum Dot Nanopixels. *ACS Nano. American Chemical Society*, 2020. Vol. 14, № 9. P. 10993–11001. DOI: 10.1021/acsnano.0c04075.
- [6] Schileo G., Grancini G. Lead or no lead? Availability, toxicity, sustainability and environmental impact of lead-free perovskite solar cells. *J. Mater. Chem. C. The Royal Society of Chemistry*, 2021. Vol. 9, № 1. P. 67–76. DOI: 10.1039/D0TC04552G.
- [7] Kojima A., Teshima K., Shirai Y., Miyasaka T. Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells. *J. Am. Chem. Soc. American Chemical Society*, 2009. Vol. 131, № 17. P. 6050–6051. DOI: 10.1021/ja809598r.
- [8] Kim H.-S., Lee C.-R., Im J.-H., Lee K.-B., Moehl T., Marchioro A., Moon S.-J., Humphry-Baker R., Yum J.-H., Moser J.E., Grätzel M., Park N.-G. Lead Iodide Perovskite Sensitized All-Solid-State Submicron Thin Film Mesoscopic Solar Cell with Efficiency Exceeding 9%. *Sci Rep. Nature Publishing Group*, 2012. Vol. 2, № 1. P. 1–7. DOI: 10.1038/srep00591.
- [9] Lee M.M., Teuscher J., Miyasaka T., Murakami T.N., Snaith H.J. Efficient hybrid solar cells based on meso-superstructured organometal halide perovskites. *Science*, 2012. Vol. 338, № 6107. P. 643–647. DOI: 10.1126/science.1228604.
- [10] Kim M., Jeong J., Lu H., Lee T.K., Eickemeyer F.T., Liu Y., Choi I.W., Choi S.J., Jo Y., Kim H.-B., Mo S.-I., Kim Y.-K., Lee H., An N.G., Cho S., Tress W.R., Zakeeruddin S.M., Hagfeldt A., Kim J.Y., Grätzel M., Kim D.S. Conformal quantum dot-SnO₂ layers as electron transporters for efficient perovskite solar cells. *Science. American Association for the Advancement of Science*, 2022. Vol. 375, № 6578. P. 302–306. DOI: 10.1126/science.abh1885.
- [11] Tao Q., Xu P., Li M., Lu W. Machine learning for perovskite materials design and discovery. *npj Comput Mater. Nature Publishing Group*, 2021. Vol. 7, № 1. P. 1–18. DOI: 10.1038/s41524-021-00495-8.
- [12] Li D., Song L., Chen Y., Huang W. Modeling Thin Film Solar Cells: From Organic to Perovskite. *Advanced Science*, 2020. Vol. 7, № 1. P. 1901397. DOI: 10.1002/advs.201901397.
- [13] Tian J., Xue Q., Yao Q., Li N., Brabec C.J., Yip H.-L. Inorganic Halide Perovskite Solar Cells: Progress and Challenges. *Advanced Energy Materials*, 2020. Vol. 10, № 23. P. 2000183. DOI: 10.1002/aenm.202000183.
- [14] Mandadapu U., Vedanayakam V., Thyagarajan K. Simulation and Analysis of Lead based Perovskite Solar Cell using SCAPS-1D. *Indian Journal of Science and Technology*, 2017. Vol. 10. P. 1–8. DOI: 10.17485/ijst/2017/v10i11/110721.
- [15] Karthick S., Velumani S., Bouclé J. Experimental and SCAPS simulated formamidinium perovskite solar cells: A comparison of device performance. *Solar Energy*, 2020. Vol. 205. P. 349–357. DOI: 10.1016/j.solener.2020.05.041.
- [16] Abdelaziz S., Zekry A., Shaker A., Abouelatta M. Investigating the performance of formamidinium tin-based perovskite solar cell by SCAPS device simulation. *Optical Materials*, 2020. Vol. 101. P. 109738. DOI: 10.1016/j.optmat.2020.109738.
- [17] Kumar M., Raj A., Kumar A., Anshul A. An optimized lead-free formamidinium Sn-based perovskite solar cell design for high power conversion efficiency by SCAPS simulation. *Optical Materials*, 2020. Vol. 108. P. 110213.
- [18] Gamal N., Sedky S.H., Shaker A., Fedawy M. Design of lead-free perovskite solar cell using Zn_{1-x}Mg_xO as ETL: SCAPS device simulation. *Optik*, 2021. Vol. 242. P. 167306. DOI: 10.1016/j.ijleo.2021.167306.
- [19] Husainat A., Ali W., Cofie P., Attia J., Fuller J. Simulation and Analysis of Methylammonium Lead Iodide (CH₃NH₃PbI₃) Perovskite Solar Cell with Au Contact Using SCAPS 1D Simulator. *American Journal of Optics and Photonics. Science Publishing Group*, 2019. Vol. 7, № 2. P. 33. DOI: 10.11648/j.ajop.20190702.12.
- [20] Raoui Y., Ez-Zahraouy H., Ahmad S., Kazim S., Tahiri N., Omar E.B. Performance analysis of MAPbI₃ based perovskite solar cells employing diverse charge selective contacts: Simulation study. *Solar Energy*, 2019. Vol. 193C. P. 948–955. DOI: 10.1016/j.solener.2019.10.009.
- [21] Bansal S., Aryal P. Evaluation of new materials for electron and hole transport layers in perovskite-based solar cells through SCAPS-1D simulations. 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2016. P. 0747–0750. DOI: 10.1109/PVSC.2016.7749702.
- [22] Liu F., Zhu J., Wei J., Li Y., Lv M., Yang S., Zhang B., Yao J., Dai S. Numerical simulation: Toward the design of high-efficiency planar perovskite solar cells. *Appl. Phys. Lett. American Institute of Physics*, 2014. Vol. 104, № 25. P. 253508. DOI: 10.1063/1.4885367.
- [23] Caprioglio P., Stolterfoht M., Wolff C.M., Unold T., Rech B., Albrecht S., Neher D. On the Relation between the Open-Circuit Voltage and Quasi-Fermi Level Splitting in Efficient Perovskite Solar Cells. *Advanced Energy Materials*, 2019. Vol. 9, № 33. P. 1901631. DOI: 10.1002/aenm.201901631.
- [24] Caprioglio P., Wolff C.M., Sandberg O.J., Armin A., Rech B., Albrecht S., Neher D., Stolterfoht M. On the Origin of the Ideality Factor in Perovskite Solar Cells. *Advanced Energy Materials*, 2020. Vol. 10, № 27. P. 2000502. DOI: 10.1002/aenm.202000502.
- [25] Grancini G., Roldán-Carmona C., Zimmermann I., Mosconi E., Lee X., Martineau D., Narbey S., Oswald F., De Angelis F., Grätzel M., Nazeeruddin M.K. One-Year stable perovskite solar cells by 2D/3D interface engineering. *Nature Communications. Nature Publishing Group*, 2017. Vol. 8, № 1. P. 1–8. DOI: 10.1038/ncomms15684.
- [26] Tress W., Domanski K., Carlsen B., Agarwalla A., Alharbi E.A., Grätzel M., Hagfeldt A. Performance of perovskite solar cells under simulated temperature-illumination real-world operating conditions. *Nat Energy. Nature Publishing Group*, 2019. Vol. 4, № 7. P. 568–574. DOI: 10.1038/s41560-019-0400-8.
- [27] Julien A., Puel J.-B., Guillemoles J.-F. Distinction of mechanisms causing experimental degradation of perovskite solar cells by simulating associated pathways. *Energy & Environmental Science. Royal Society of Chemistry*, 2023. Vol. 16, № 1. P. 190–200. DOI: 10.1039/D2EE03377A.
- [28] Xu K.J., Wang R.T., Xu A.F., Chen J.Y., Xu G. Hysteresis and Instability Predicted in Moisture Degradation of Perovskite Solar Cells. *ACS Appl. Mater. Interfaces. American Chemical Society*, 2020. Vol. 12, № 43. P. 48882–48889. DOI: 10.1021/acsaami.0c17323.
- [29] Hao F., Stoumpos C.C., Cao D.H., Chang R.P.H., Kanatzidis M.G. Lead-free solid-state organic-inorganic halide perovskite solar cells. *Nature Photon*, 2014. Vol. 8, № 6. P. 489–494. DOI: 10.1038/nphoton.2014.82.