

08,16

## Электрические свойства тандемных солнечных элементов на основе пленок металлоорганических перовскитов, нанесенных на тонкопленочные кремниевые солнечные элементы

© Г.В. Ненашев<sup>1</sup>, Н.А. Фокина<sup>1,2</sup>, М.С. Дунаевский<sup>1</sup>, А.Н. Алешин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина),  
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: virison95@gmail.com

Поступила в Редакцию 14 декабря 2023 г.

В окончательной редакции 14 декабря 2023 г.

Принята к публикации 25 декабря 2023 г.

Представлены результаты исследования морфологических и электрических свойств многослойных структур, созданных на основе тонких пленок металлоорганических галогенидных перовскитов (organometallic halide perovskites, ОНР),  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ , нанесенных на поверхность солнечных элементов (СЭ) на основе кристаллического кремния (*c*-Si). Исследования морфологии и электрических свойств полученных структур проводились методами атомно-силовой микроскопии (АСМ), вольт-амперной (ВАХ) характеристики и импедансной спектроскопии. Результаты АСМ исследований показали заметные морфологические различия между синтезированными образцами. Анализ ВАХ при 300 К показал, что все образцы обладают улучшенной фотопроводимостью по сравнению с чистым *c*-Si, что указывает на положительный эффект перовскитного слоя. Из анализа результатов импедансной спектроскопии следует, что образец со слоем перовскита на *c*-Si в темноте имеет два полукруга в комплексной плоскости импеданса, что свидетельствует о наличии двух различных механизмов, таких как диффузия ионов или перезарядка, которые при освещении сливаются в один механизм из-за изменения концентрации носителей заряда. Полученные результаты открывают новые возможности для оптимизации и улучшения рабочих характеристик тандемных *c*-Si СЭ следующего поколения с верхними слоями на основе металлоорганических галогенидных перовскитов.

**Ключевые слова:** импедансная спектроскопия, электропроводность, солнечные элементы, металлоорганические перовскиты, кристаллический кремний.

DOI: 10.61011/FTT.2024.02.57250.271

### 1. Введение

Модификация поверхности *c*-Si солнечных элементов (СЭ) пленками металлоорганических перовскитов считается одним из наиболее перспективных направлений [1], благодаря высокому коэффициенту поглощения в этих материалах в видимой области спектра [2], возможности формирования многослойных гетероструктур [3], достаточно высокой подвижности носителей заряда [4], а также относительно низкой стоимости производства. В настоящее время максимальная эффективность (КПД) СЭ на основе кремниевых гетероструктур (НП) достигает 26.8% [5]. Наиболее перспективным сочетанием технологичности изготовления и эффективности преобразования энергии являются тандемные СЭ. Обычный перовскитный СЭ — это структура, в которой тонкий слой металлоорганического перовскита используется в качестве активного слоя для поглощения света и преобразования его в фототок. Тандемный СЭ состоит из двух или более слоев фотоэлектрического материала, нанесенных последовательно (сэндвич-структура), одним из которых является перовскит. Основное различие между обычным перовскитным СЭ (ПСЭ)

и тандемным СЭ заключается в их эффективности. Эффективность тандемного СЭ значительно выше, чем КПД обычного ПСЭ, что связано с тем, что тандемная структура поглощает в более широком диапазоне солнечного спектра, в результате чего большая часть солнечной энергии преобразуется в электричество.

КПД тандемных СЭ на основе *c*-Si и металлоорганических перовскитов растет быстрыми темпами. В 2018 г. рекордная эффективность таких структур составляла 25.2%, а в 2020 г. она была повышена до — 27.7%, а затем 29.15%. В 2021 году этот показатель приблизился к 30% и составил 29.8%. В 2022 г. исследователи из Федеральной политехнической школы Лозанны (EPFL) и Швейцарского центра электроники и микротехнологий (CSEM) разработали тандемные СЭ с КПД 30.93% и 31.2%, соответственно [6] (33.2% в 2023 г.). Эти результаты подтверждают тот факт, что разработка и исследование перовскитных СЭ нанесенных на поверхность *c*-Si СЭ является актуальным и перспективным направлением.

Одним из эффективных методов исследования тандемных СЭ является метод импедансной спектроско-

пии (ИС). ИС — это универсальный метод определения характеристик для мониторинга действующих электрических и электрохимических процессов, а также профилирования электронной структуры в твердотельных устройствах [7]. ИС считается быстрым, неинвазивным и недорогим методом, который позволяет исследовать параметры фотоэлемента для изучения и улучшения его характеристик. Несмотря на то, что импеданс параметры перовскитных tandemных СЭ демонстрируют богатое разнообразие характеристик [8], интерпретация таких спектров является непростой задачей. Одной из причин проблемы интерпретации данных ИС является сложность учета влияния движения ионов в слое перовскита. Подвижные ионы могут вызывать поляризацию поверхности раздела [9], влияя на скорости переноса заряда или вызывая емкостное накопление носителей заряда.

Другой важной характеристикой перовскитных пленок является морфология их поверхности. Улучшение морфологии и кристалличности слоев металлоорганических перовскитов является ключевым фактором для снижения плотности дефектов, токов утечки и контактного сопротивления, что приводит к созданию более стабильных и эффективных СЭ [10]. Основной целью контроля морфологии является получение пленок с меньшей шероховатостью, лучшей однородностью, компактностью и отсутствием точечных дефектов.

В настоящей работе представлены результаты исследования морфологических и электрических свойств многослойных структур, созданных на основе тонких пленок металлоорганических галогенидных перовскитов (organometallic halide perovskites, (ОНР)),  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ , нанесенных на поверхность СЭ на основе кристаллического кремния (*c*-Si). Морфология и электрические свойства данных структур были исследованы методами АСМ, вольт-амперной характеристики и импеданс-спектроскопии. Показано, что исследованные образцы демонстрируют заметную фотопроводимость, причем фотопроводимость образцов с верхним слоем перовскита ОНР1/*c*-Si и ОНР2/*c*-Si значительно превышает аналогичные характеристики для СЭ на основе *c*-Si.

## 2. Объекты и методы исследования

В процессе синтеза металлоорганических галогенидных перовскитов были приготовлены два раствора. Первый раствор получали путем смешивания йодида метиламмония ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ ) и диметилформаида (DMF, ДМФА) в соотношении 1 : 3. Аналогичное соотношение 1 : 3 использовалось для получения второго раствора, в котором были смешаны йодид свинца ( $\text{PbI}_2$ ) и ДМФА. Далее, 4.62 г  $\text{PbI}_2$  смешивали с 1.58 г  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ . Полученную смесь перемешивали при помощи магнитной мешалки на протяжении 12 h при температуре 80°C. На следующем этапе синтеза металлоорганических галогенидных перовскитов проводилась продувка раствора

аргоном при температуре 100°C в течение более восьми часов с целью удаления растворителя. В итоге был получен концентрированный, вязкий, темно-коричневый раствор металлоорганического перовскита. Этот раствор, обозначенный как  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Pb}_{0.98x}\text{Ba}_{0.02x}\text{I}_3$ , был нанесен на кремниевую подложку и обозначен как ОНР1/*c*-Si.

Раствор йодида бария в ДМФА подготавливали с использованием коммерческого порошка дигидрата йодида бария. Начальный этап включал сушку данного порошка при температуре 100°C в течение 24 h для получения безводного йодида бария. Затем обезвоженное кристаллическое вещество полностью растворяли в ДМФА до того момента, когда концентрация раствора достигала 5%. Этот раствор йодида бария затем смешивали с уже существующим раствором металлоорганического перовскита, состоящим из  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ . Концентрация ионов бария в растворе перовскита могла варьироваться от 1 до 3%, в зависимости от исходных компонентов. Полученный раствор был обозначен как образец ОНР2 и нанесен на кремниевую подложку (ОНР2/*c*-Si).

Для проведения измерений электрических характеристик применялись солнечные элементы (СЭ), изготовленные из монокристаллического кремния *c*-Si, предоставленные Центром тонкопленочных технологий в энергетике. Основной СЭ включает в себя кристал-

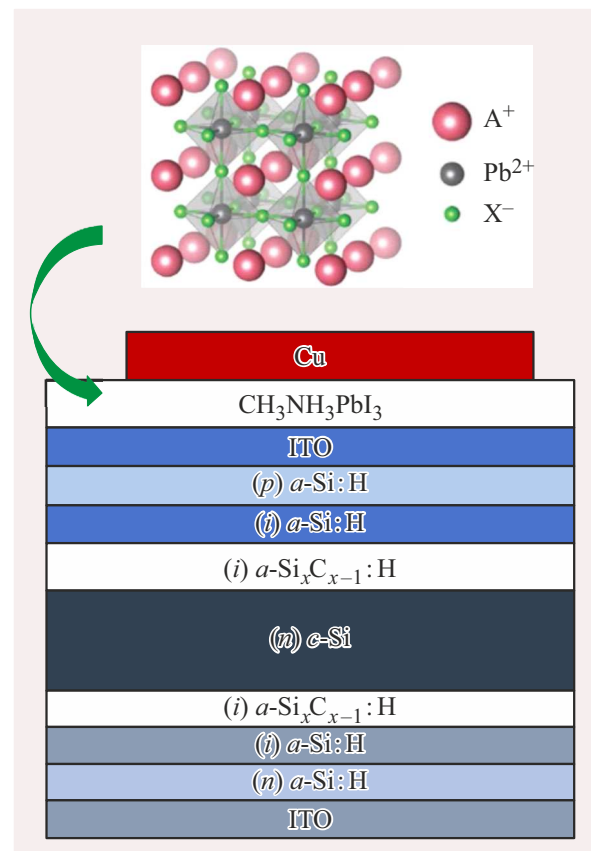
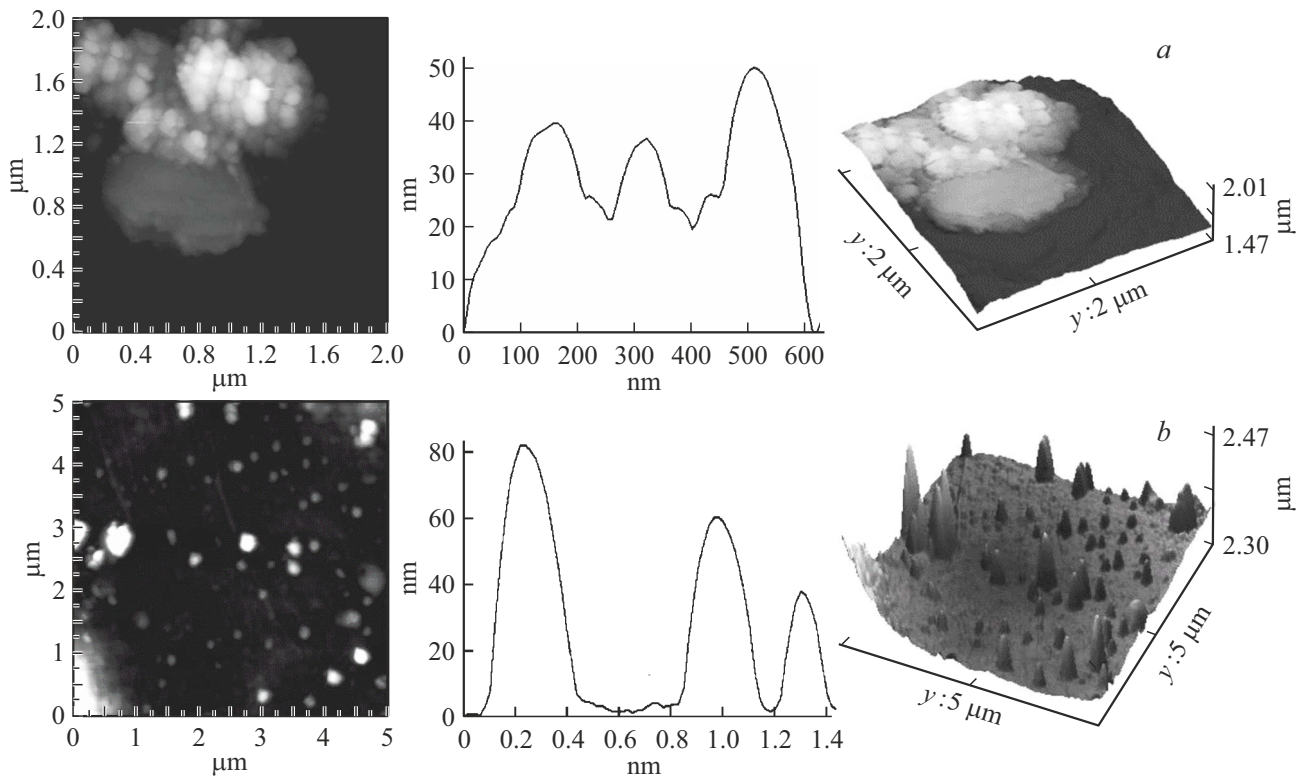


Рис. 1. Базовый СЭ с верхним слоем металлоорганического перовскита  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ .



**Рис. 2.** Изображения АСМ топографии (левый ряд), профилей сечения (центральный ряд) и 3D-рельефа поверхности (правый ряд) образцов ОНР1/*c*-Si (а) и ОНР2/*c*-Si (б).

лическую подложку из кремния *n*-типа, *c*-Si, ориентированную (100). На обе стороны подложки последовательно наносились слои аморфного гидрированного карбида кремния в форме твердого раствора  $\text{Si}_x\text{C}_{x-1}\text{H}$  с  $0.8 < x < 0.9$  толщиной 0.5–2 nm, а также легированный слой аморфного гидрированного кремния толщиной 2–5 nm. На лицевую сторону (сторону излучения) наносился легированный *p*-слой аморфного гидрированного кремния толщиной 5–20 nm и слой оксида индия-олова (ИТО) толщиной 90–110 nm [11–13], на обратную сторону кристаллической подложки последовательно наносился легированный *n*-слой аморфного гидрированного кремния толщиной 10–20 nm и слой ИТО толщиной 40–80 nm. Кристаллическая подложка толщиной 80–250 μm является компонентом, в котором происходит основное поглощение света в СЭ. Растворы перовскита наносились на подложки из *c*-Si методом центрифугирования с использованием центрифуги KW-4A Chemat при скорости 2000 rpm в течение 30 с. Базовый СЭ с верхним слоем металлоорганического перовскита  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  представлен на рис. 1.

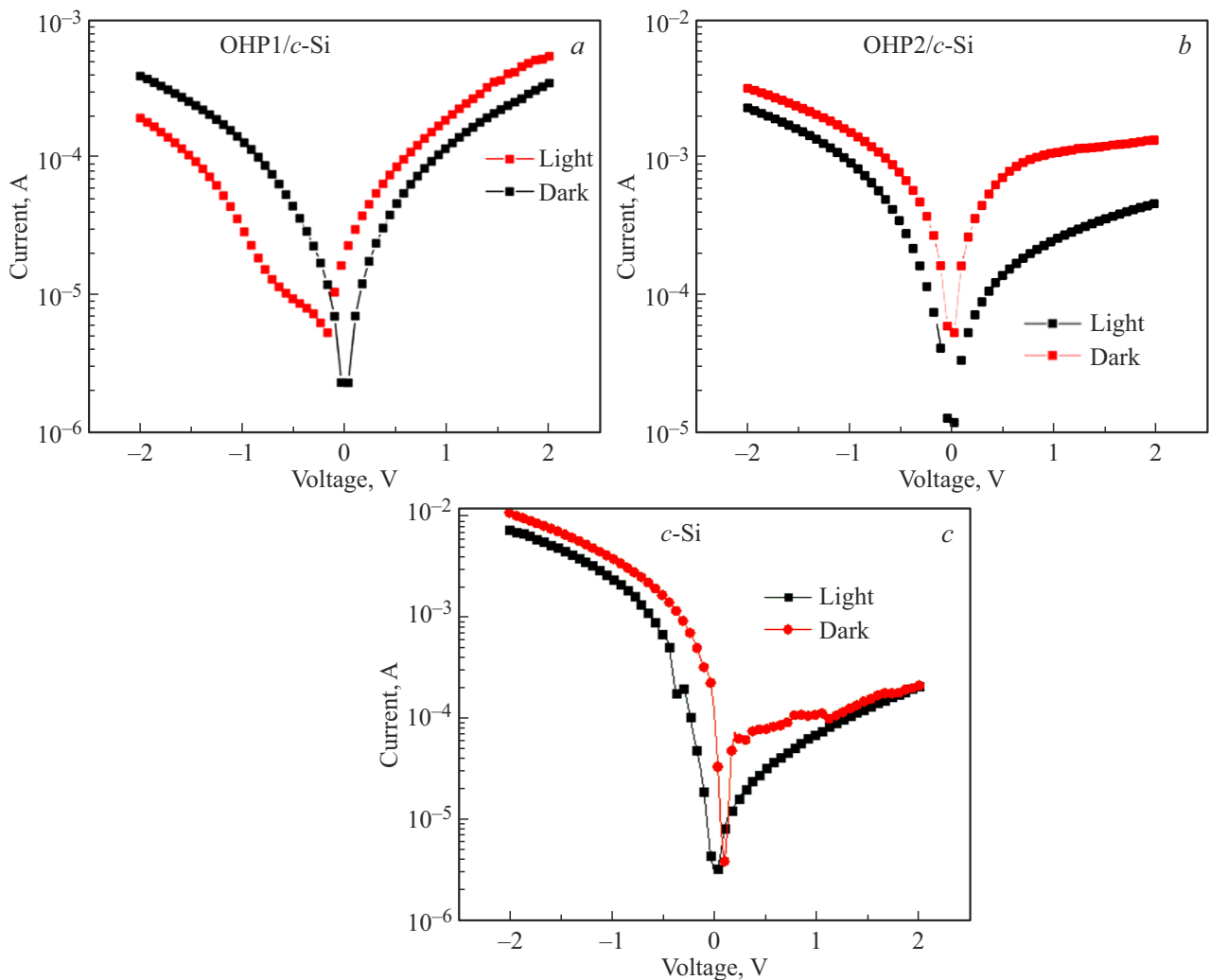
Структуру и толщину пленок  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  исследовали методом атомно-силовой микроскопии (АСМ), с помощью микроскопа NTegra-Aura (NTMDT-SI, Россия) и зондов NSG10 (TipsNano, Россия). Для проведения исследования растворы  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  были нанесены на полированные кремниевые подложки с удельным сопротивлением 20–40 Ω · см.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) образцов измеряли в планарной геометрии, с использованием двухзондовой схемы. Эксперименты проводились в темноте и при освещении имитатором солнечного излучения с использованием автоматизированной измерительной системы на основе пикоамперметра Keithley 6487 и регулируемого источника напряжения АКIP-1124, напряжение изменялось в диапазоне от –2 до +2 V [14].

Комплекс измерений методом импедансной спектроскопии проводился в темноте и при освещении имитатором солнечного света с помощью измерителя импеданса Elinx Z-500PX, в соответствии с методикой, описанной в нашей предыдущей работе [15]. Верхний электрод был изготовлен из меди. Эксперименты проводились при прямом смещении от 0 до 1 V и в диапазоне частот от 10 Hz до 0.5 MHz. Для минимизации внешних помех, образцы были помещены в медный изолированный бокс.

### 3. Результаты и обсуждение

Для изучения морфологии поверхности образцов ОНР1/*c*-Si использовался метод АСМ, результаты которого представлены на рис. 2. Было обнаружено, что поверхность образцов обладает сложной и шероховатой структурой с присутствием глобул с четко определенными границами, что свидетельствует о гетерогенности слоя перовскита. В дополнение, были выявлены



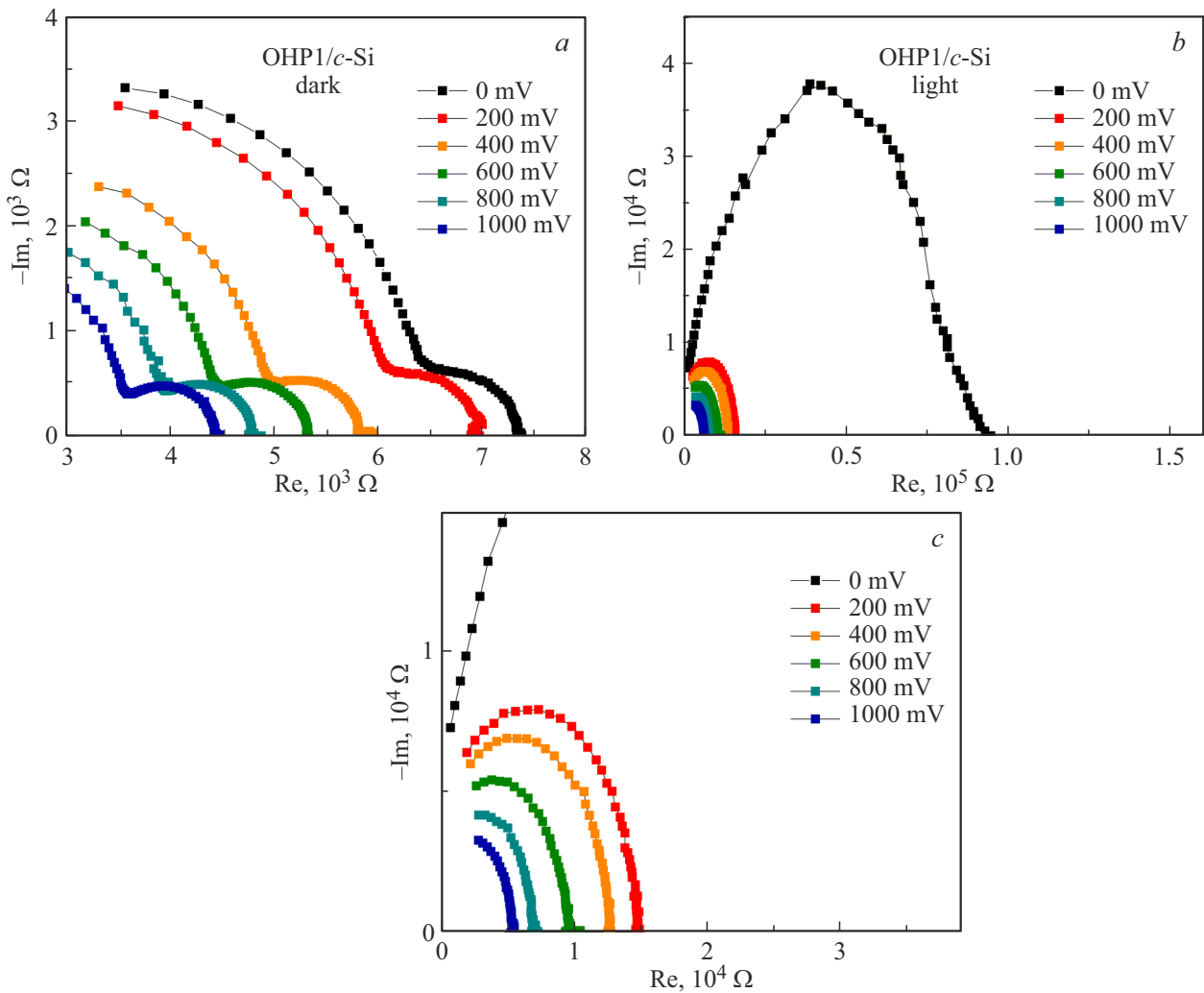
**Рис. 3.** ВАХ образцов ОНР1/*c*-Si (а), ОНР2/*c*-Si (b) и *c*-Si (с) полученные в темноте и при освещении имитатором солнечного света.

неровности, имеющие ширину около 100 nm и высоту в диапазоне 20–30 nm (RMS шероховатость составляет 30 nm). Анализ поверхности образца ОНР2/*c*-Si с помощью АСМ показал наличие частично гладких участков с неровностями размерами от 200 до 300 nm в ширину и от 40 до 80 nm в высоту (RMS шероховатость составляет 15 nm).

По сравнению с образцом ОНР2/*c*-Si, образец ОНР1/*c*-Si характеризуется более сложной и неравномерной морфологией. Такие неровности и гетерогенность могут влиять на электронный транспорт, создавая препятствия, которые потенциально снижают электрическую проводимость. Образец ОНР2/*c*-Si, наоборот, обладает относительно гладкой поверхностью с меньшей шероховатостью, что может благоприятно влиять на проводимость. Более ровная поверхность может способствовать уменьшению рассеяния электронов и, как следствие, обеспечивать более эффективный транспорт носителей заряда. Это, в свою очередь, может приво-

дить к повышению электрической проводимости образца ОНР2/*c*-Si по сравнению с образцом ОНР1/*c*-Si.

ВАХ образцов ОНР1/*c*-Si, ОНР2/*c*-Si и *c*-Si, полученные при прямом и обратном смещении, в темноте и при освещении имитатором солнечного света, представлены на рис. 3, а–с. Как следует из рис. 3, а–с, линейность ВАХ наблюдается только для образца ОНР1/*c*-Si в условиях отсутствия освещения, в остальных случаях ВАХ демонстрируют нелинейность при обоих знаках смещения. Все три образца демонстрируют заметную фотопроводимость, причем для образцов ОНР1/*c*-Si и ОНР2/*c*-Si она значительно превышает аналогичные характеристики для образца *c*-Si. Это может указывать на то, что слой перовскита значительно улучшает фотопроводимость исходной подложки. Также были обнаружены различия в электрической проводимости: проводимость образцов ОНР1/*c*-Si и ОНР2/*c*-Si при прямом смещении значительно увеличивается, в то время как при обратном смещении она снижается по сравнению с образцом *c*-Si. При этом, проводимость образца ОНР2/*c*-Si при обоих



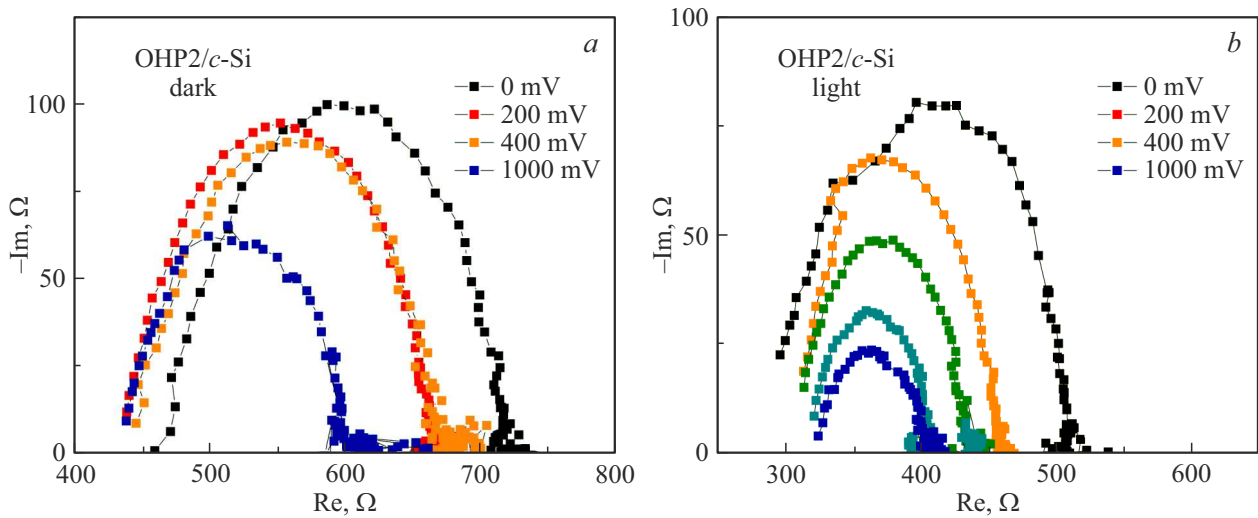
**Рис. 4.** Импеданс характеристики образца ОНР1/с-Si при приложении различного напряжения в темноте (*a*) и при освещении (*b, c*) в условиях окружающей среды.

типах смещения значительно превосходит показатели образца ОНР1/с-Si, что согласуется с выводами, полученными в ходе АСМ-исследований.

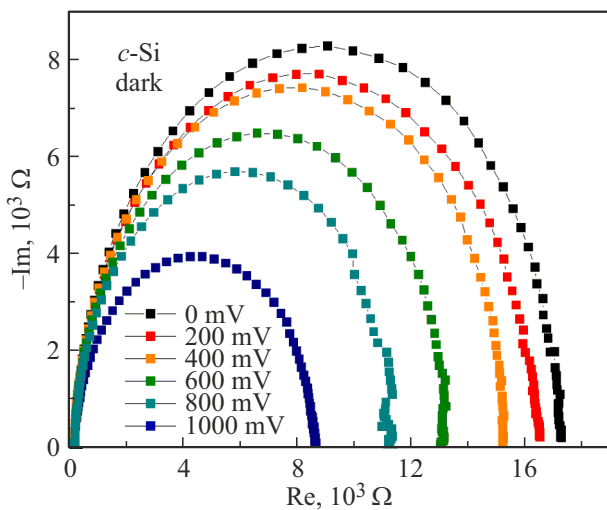
Графики Коула-Коула для образца ОНР1/с-Si, измеренные в темноте и при освещении, представлены на рис. 4, *a, b* и *c*. Аналогичные графики для образца ОНР2/с-Si в разных условиях можно показаны на рис. 5, *a* и *b*. График Коула-Коула для чистого образца с-Si в темноте представлен на рис. 6. Эти графики отражают данные импедансной характеристики, где  $\text{Im}(\Omega)$  обозначает мнимую часть реактивного сопротивления, а  $\text{Re}(\Omega)$  — действительную часть сопротивления. Полуокруг на графиках при высокой частоте связан с переносом заряда и рекомбинацией через структуру/контакты, в то время как полуокруг на графиках на низких частотах связан с рекомбинацией носителей заряда, релаксацией диэлектрика и миграцией ионов в слоях структуры. Импедансная характеристика образца ОНР1/с-Si в темноте характеризуется наличием двух полуокруг, что может указывать на два различных механизма, определяющих

процессы переноса в образце. Каждая полуокруга может представлять отдельный механизм, например, перезарядку или диффузию ионов, происходящую в разных временных масштабах или на разных уровнях энергии. При освещении количество полуокруг сокращается до одной, что говорит об изменении доминирующих механизмов транспорта в материале. Это может быть связано с изменением концентрации носителей заряда и скорости рекомбинации при освещении образца.

Можно было ожидать, что проводимость образца ОНР1/с-Si увеличится при освещении из-за фотогенерации дополнительных носителей заряда (электронов и дырок). Однако, в данном случае наблюдалась обратная ситуация: проводимость образца ОНР1/с-Si при освещении оказалась ниже, чем в темноте. Это может быть обусловлено фотоиндуцированными дефектами (дефекты в структуре перовскита, образованные под действием света, которые действуют как центры захвата для носителей заряда, увеличивая рекомбинацию и уменьшая проводимость) и ионной миграцией (этот процесс может



**Рис. 5.** Импеданс характеристики образца OHP2/c-Si при приложении различного напряжения в темноте (a) и при освещении (b) в условиях окружающей среды.



**Рис. 6.** Импеданс характеристики образца c-Si под приложением различного напряжения в темноте в условиях окружающей среды.

изменять локальное электрическое поле и влиять на проводимость).

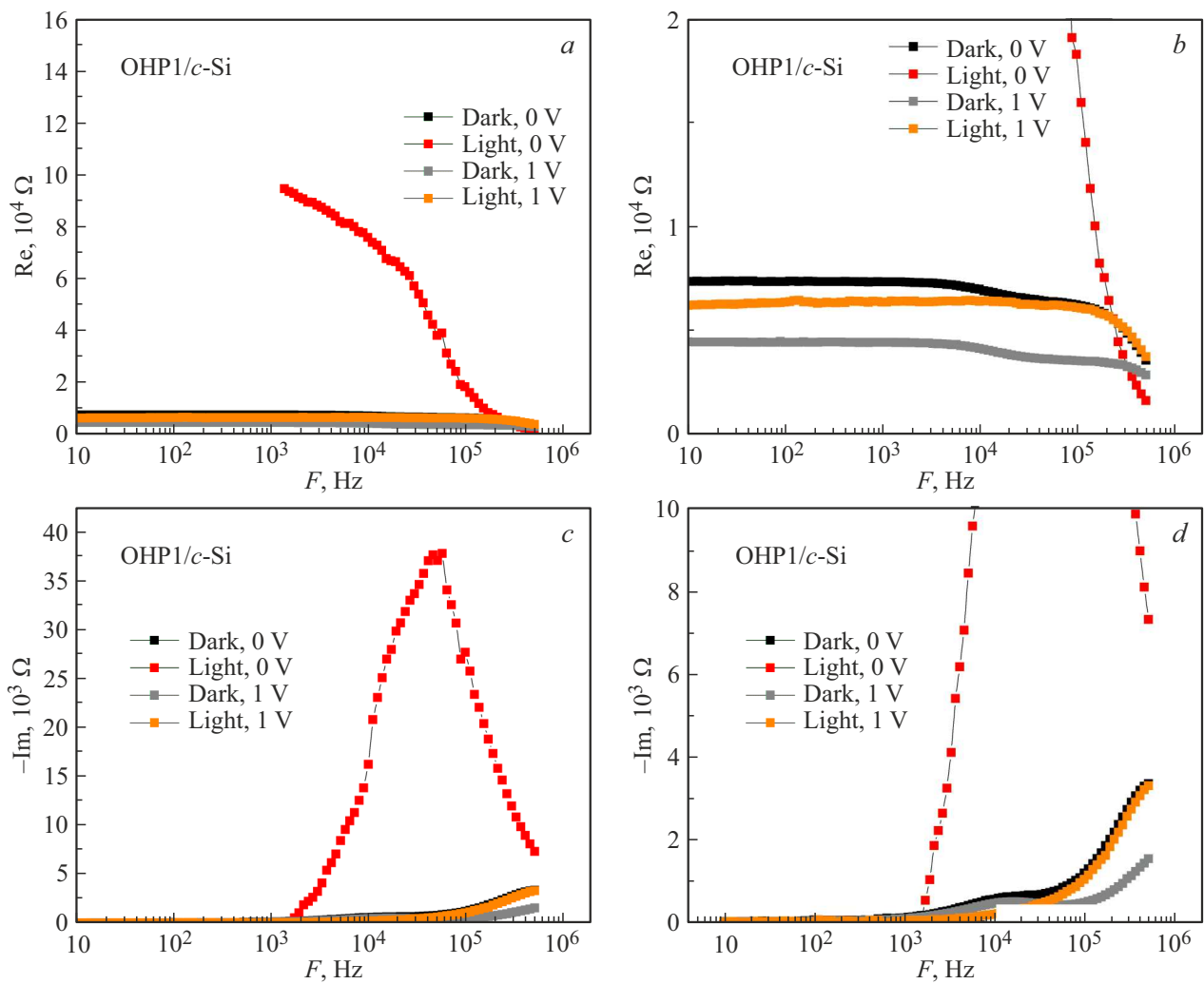
По сравнению с образцом c-Si, образец OHP1/c-Si демонстрирует лучшую проводимость в темноте, что согласуется с результатами ВАХ. В отличие от образца c-Si, полулуга на импедансном графике для образца OHP2/c-Si начинается не с 0 Ω. Это может указывать на присутствие дополнительного сопротивления или барьера на границе между металлоорганическим перовскитом и кремнием. Причиной этого дополнительного сопротивления могут быть поверхностные состояния на границе раздела между перовскитом и кремнием, окислительные процессы или образование изолирующего слоя на этой границе. Возможно также наличие неоднородностей и

дефектов в структуре перовскита. Гетерогенные интерфейсы между перовскитом и кремнием могут вызывать различные механизмы переноса заряда, что, в свою очередь, может привести к ломаной форме полулуги на диаграмме импеданса образца OHP2/c-Si. В то же время, плавная полулуга на импедансном графике образца c-Si может свидетельствовать о стабильном и однородном процессе переноса заряда в таком материале. Стоит отметить, что проводимость образца OHP2/c-Si значительно превосходит проводимость образца c-Si, что согласуется с результатами ВАХ. Как и ожидалось, проводимость образца OHP2/c-Si повышается при его освещении.

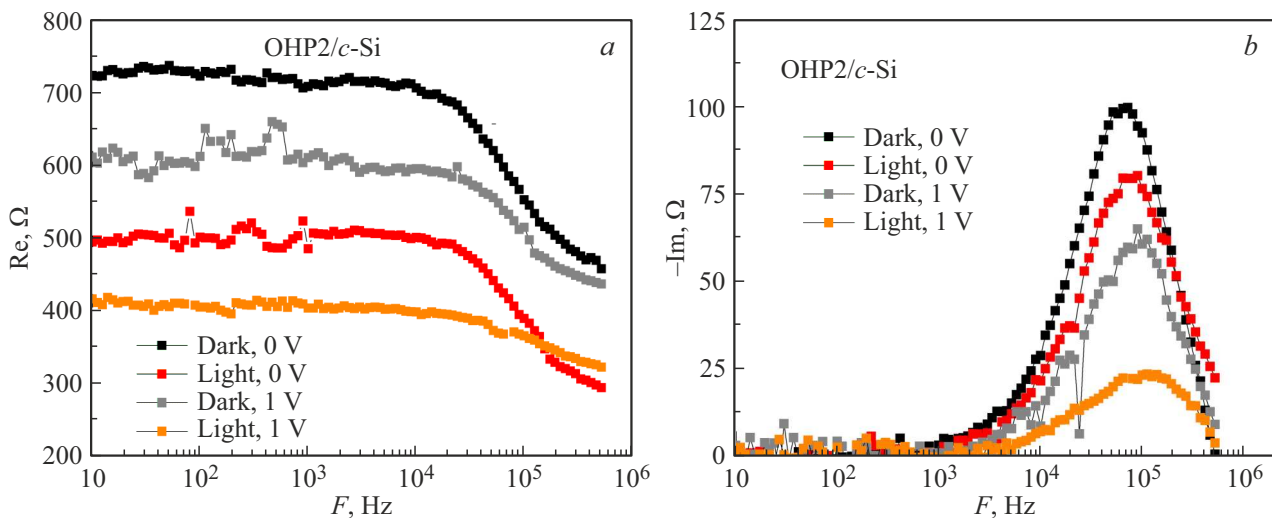
Частотные зависимости действительной (a) и мнимой (b) части импеданс характеристики структуры OHP1/c-Si, OHP2/c-Si и c-Si при приложении напряжения в темноте и при освещении, измеренные в условиях окружающей среды, представлены на рис. 7, 8 и 9. Как видно из рис. 7–9, образец OHP1/c-Si демонстрирует лучший фотоклик в сравнении с другими образцами, но его проводимость при освещении ниже, чем в темноте; также его частотные зависимости демонстрируют нестандартный вид. Лучшую проводимость демонстрирует образец OHP2/c-Si в сравнении с другими образцами. Для всех трех образцов заметно влияние освещения и напряжения смещения на проводимость.

Результаты АСМ-исследований образцов OHP1/c-Si и OHP2/c-Si выявили различия в морфологии их поверхностей. Образец OHP1/c-Si имеет более сложную и шероховатую морфологию, что может создавать дополнительные барьеры для движения электронов и снижать общую проводимость. В то время как образец OHP2/c-Si имеет более гладкую поверхность, что способствует более высокой проводимости.

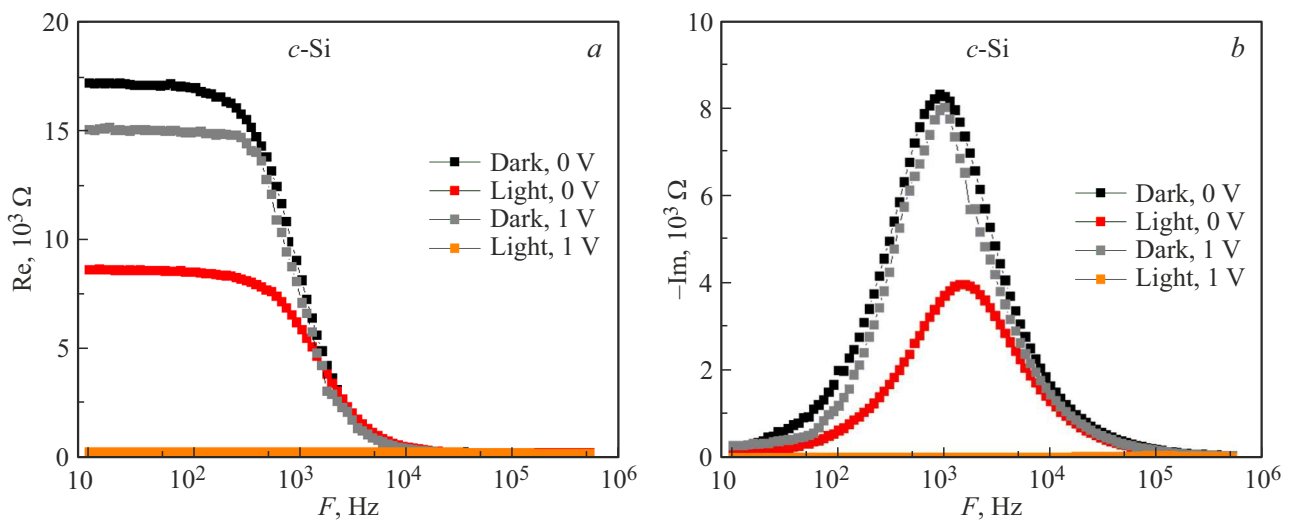
ВАХ образцов показали, что образцы OHP1/c-Si и OHP2/c-Si имеют более высокую фотопроводимость по



**Рис. 7.** Частотные зависимости действительной (a, b) и мнимой (c, d) части импеданс характеристики образца OHP1/c-Si при приложении напряжения в темноте и при освещении в условиях окружающей среды.



**Рис. 8.** Частотные зависимости действительной (a) и мнимой (b) части импеданс характеристик образца OHP2/c-Si при приложении различного напряжения в темноте и при освещении в условиях окружающей среды.



**Рис. 9.** Частотные зависимости действительной (а) и мнимой (б) части импеданс характеристик образца *c*-Si при приложении различного напряжения в темноте и при освещении в условиях окружающей среды.

сравнению с образцом *c*-Si, что указывает на улучшение фотопроводимости благодаря дополнительному слою перовскита. Импедансные характеристики образцов также различаются. Образец ОНР1/*c*-Si в темноте имеет две полудуги на импедансном графике, что может указывать на наличие двух различных механизмов транспорта в образце, таких как перезарядка или диффузия ионов. При освещении число полудуг сокращается до одной, что указывает на изменение доминирующих механизмов в структуре, возможно, связанное с изменением концентрации носителей заряда.

#### 4. Заключение

В работе исследованы многослойные структуры на основе тонких пленок металлоорганических галогенидных перовскитов  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ , нанесенных на поверхность СЭ на основе кристаллического кремния. Морфология и электрические свойства данных структур были исследованы методами АСМ, ВАХ и импеданс-спектроскопии. Исследованные образцы демонстрировали фотопроводимость, причем для образцов со слоями перовскитов ОНР1/*c*-Si и ОНР2/*c*-Si она значительно превышала показатели для чистого образца *c*-Si. Это указывает на то, что слой металлоорганического перовскита значительно улучшает фотопроводимость структуры СЭ на основе *c*-Si. Показано, что различия в условиях синтеза перовскитов могут привести к значительным различиям в морфологии поверхности и электрических свойствах образцов. Полученные результаты позволяют улучшить эксплуатационные характеристики следующего поколения tandemных *c*-Si СЭ с верхними слоями металлоорганических галогенидных перовскитов.

#### Благодарности

Авторы благодарны Е.И. Терукову и исследовательскому центру тонкопленочных технологий в энергетике за предоставленные *c*-Si солнечные элементы. Авторы также благодарят И.А. Врублевского и А.К. Тучковского за помощь в синтезе металлоорганических перовскитных материалов. В части синтеза металлоорганических перовскитов работа выполнена при поддержке гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований № Ф23РНФ-160 и Российского научного фонда № 23-42-10029 (<https://rscf.ru/project/23-42-10029/>) от 20.12.2022.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] S. Jung, J.H. Kim, J.W. Choi, J.-W. Kang, S.H. Jin, Y. Kang, W. Song. *Nanomaterials* **10**, 710 (2020).
- [2] Q. Chen, N. De Marco, Y. Yang, T.-B. Song, C.-C. Chen, H. Zhao, Z. Hong, H. Zhou, Y. Yang. *Nano Today* **10**, 355 (2015).
- [3] J.H. Noh, S.H. Im, J.H. Heo, T.N. Mandal, S.I. Seo. *Nano Lett.* **13**, 1764 (2013).
- [4] H. Oga, A. Sacki, Y. Ogomi, S. Hayase, S. Seki. *J. Am. Chem. Soc.* **136**, 13818 (2014).
- [5] Z. Fang, Q. Zeng, C. Zuo, L. Zhang, H. Xiao, M. Cheng, L. Ding. *Sci. Bull.* **6**, 621 (2021).
- [6] X.Y. Chin, D. Turkay, J. A. Steele, S. Tabean, S. Eswara, M. Mensi, P. Fiala, C. M. Wolff, A. Paracchino, K. Artuk, D. Jacobs, Q. Guesnay, F. Sahli, G. Andreatta, M. Boccard, Q. Jeangros, C. Ballif. *Science* **381**, 59 (2023).
- [7] A. Guerrero, J. Bisquert, G. Garcia-Belmont. *Chem. Rev.* **121**, 14430 (2021).
- [8] E. Hauff, D. Klotz. *J. Mater. Chem. C* **10**, 742 (2022).



- [9] S. Ravishankar, O. Almora, C. Echeverría-Arrondo. *J. Phys. Chem. Lett.* **8**, 915 (2017).
- [10] G. Xing, N. Mathews, S. Sun, S.S. Lim, Y.M. Lam, M. Grätzel, T.C. Sum. *Science* **342**, 344 (2013).
- [11] E. Terukov, A. Kosarev, A. Abramov, E. Malchukova. *Solar Panels Photovoltaic Materials* **5** (2018).
- [12] M. Masuko, M. Shigematsu, T. Hasiguchi, D. Fujishima, M. Kai, N. Yoshimira, T. Yamaguchi, Y. Ichihashi, T. Mishima, N. Matsubara, T. Yamanishi, T. Takahama, M. Taguchi, E. Maruyama, S. Okamoto. *IEEE J. Photovoltaics* **4**, 1433 (2014).
- [13] L. Boudjemila, A.N. Aleshin, V.M. Malyshkin, P.A. Aleshin, I.P. Shcherbakov, V.N. Petrov, E.I. Terukov. *Phys. Solid State* **11**, 1670 (2022).
- [14] A.V. Arkhipov, G.V. Nenashev, A.N. Aleshin. *Phys. Solid State* **63**, 525 (2021).
- [15] A.M. Ivanov, G.V. Nenashev, A.N. Aleshin. *J. Mater. Sci: Mater. Electron.* **33**, 21666 (2022).

*Редактор К.В. Емцев*