

Исследование методом импедансной спектроскопии tandemных солнечных элементов на основе *c*-Si с верхним слоем нанокристаллов перовскитов CsPbBr₃ и CsPbI₃

© Л. Буджемила,^{1,2} Г.В. Ненашев,² В.Г. Малышкин,² Е.И. Теруков,² А.Н. Алешин²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251 Санкт-Петербург, Россия

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: aleshin@transport.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 19 февраля 2024 г.

В окончательной редакции 19 февраля 2024 г.

Принято к публикации 22 февраля 2024 г.

Представлены результаты исследований с использованием импедансной спектроскопии многослойных структур, состоящих из пленок нанокристаллов неорганических перовскитов CsPbI₃ и CsPbBr₃, которые были нанесены на поверхность солнечных элементов на основе кристаллического кремния (*c*-Si). Показано, что при одинаковых условиях графики импедансного отклика для обеих структур хорошо соответствуют модели эквивалентной схемы и включают последовательное сопротивление, сопротивление рекомбинации и геометрическую емкость, которая описывает параметры, возникающие из-за накопления заряда, сопротивления переноса заряда и/или наличия дополнительных межфазных электронных состояний. Обнаружено, что добавление слоя нанокристаллов CsPbI₃ усиливает фотоотклик при смещении, однако этот эффект сопровождается уменьшением проводимости. В свою очередь, добавление слоя нанокристаллов CsPbBr₃ подавляет фотоотклик при увеличении напряжения смещения, но улучшает фотоотклик при отсутствии напряжения смещения.

Ключевые слова: импедансная спектроскопия, солнечные элементы, перовскиты, нанокристаллы, кристаллический кремний.

DOI: 10.61011/JTF.2024.04.57535.43-24

Введение

В последнее время проводятся обширные исследования с целью повышения эффективности tandemных *c*-Si солнечных элементов (СЭ) на основе гетероструктур путем нанесения пленок металлоорганических перовскитов. Модификация поверхности *c*-Si СЭ пленками металлоорганических перовскитов считается одним из наиболее перспективных направлений [1] благодаря высокому коэффициенту поглощения в этих материалах в видимом спектре [2], способности формировать на их основе многослойные гетероструктуры [3], достаточно высокой подвижности носителей заряда [4], а также относительно низкой стоимости их производства. С другой стороны, оптические резонансные наноструктуры такие, как нанокристаллы (НК) неорганических перовскитов, также могут улучшить свойства *c*-Si СЭ [5].

Импедансная спектроскопия (ИС) является универсальным методом характеристики СЭ для оценки их электрических свойств и определения электрохимических процессов, а также профилирования электронной структуры в твердотельных устройствах [6–8]. Оптоэлектронные исследования этих структур были проведены в предыдущей работе [5]. Морфологические исследования, проведенные методом атомно-силовой микроскопии (АСМ), выявили сферические белые точки различ-

ной плотности, формы и размера [5]. В настоящей работе авторы представляют результаты ИС для структур *c*-Si/CsPbBr₃ (НК) и *c*-Si/CsPbI₃ (НК) и обсуждают их вольт-амперные характеристики. Результаты ИС демонстрируют, что при идентичных условиях измеренные графики Найквиста хорошо соответствуют смоделированным. Предложена модель эквивалентной схемы, учитывающая омическое сопротивление, сопротивление рекомбинации и геометрическую емкость, которые возникают из-за накопления заряда, сопротивления передаче заряда и/или дополнительных межфазных электронных состояний. Мы обнаружили, что добавление слоя НК CsPbI₃ улучшает фотоотклик в условиях смещения, но это улучшение приводит к снижению проводимости по постоянному току. И наоборот, включение слоя НК CsPbBr₃ блокирует фотоотклик при смещении, но значительно усиливает фотоотклик при отсутствии приложенного напряжения.

1. Детали эксперимента

1.1. Приготовление образцов

В настоящей работе были использованы СЭ, изготовленные из монокристаллического кремния *c*-Si, представленные исследовательским Центром тонкопленоч-

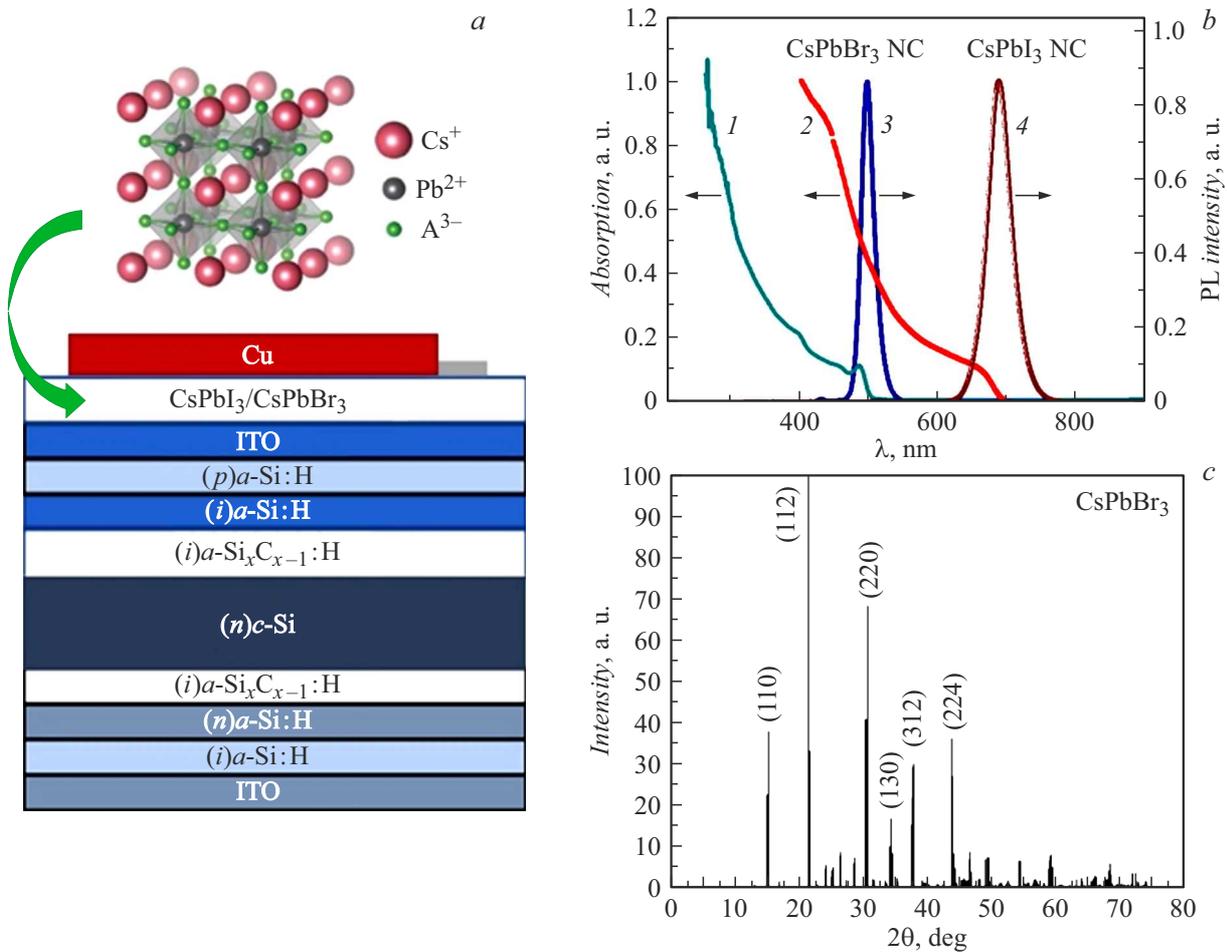


Рис. 1. *a* — структура СЭ и НК Cs⁺Pb²⁺A₃⁻ перовскитов, где А — I, Br; *b* — спектры поглощения чистых пленок НК CsPbBr₃ (линия 1), и CsPbI₃ (линия 2) на кварцевых подложках; на том же графике показаны спектры ФЛ чистых НК CsPbBr₃ (линия 3) и CsPbI₃ (линия 4), кривые 1 и 3, а также 2 и 4 представлены в работах [11,12] соответственно; *c* — результаты XRD — исследования пленки НК CsPbBr₃.

ных технологий в энергетике при ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Структура стандартизированного СЭ, показанного на рис. 1, *a*, включает в себя кристаллическую подложку из кремния *n*-типа (*c*-Si) ориентированную (100), на обе стороны которой последовательно нанесен слой аморфного гидрогенизированного карбида кремния в виде твердого раствора Si_xC_{x-1}:H (где 0.8 < *x* < 0.90) с толщиной 0.5–2 nm; нелегированный слой аморфного гидрогенизированного кремния толщиной 2–5 nm, на лицевую сторону (сторону излучения) которого нанесен *p*-легированный слой аморфного гидрогенизированного кремния толщиной 5–20 nm; слой оксида индия-олова (ITO) толщиной 90–110 nm. На тыльную сторону кристаллической подложки последовательно нанесен легированный *n*-слой аморфного гидрогенизированного кремния толщиной 10–20 nm, а также слой ITO толщиной 40–80 nm [9,10].

Растворы толуола, содержащие НК CsPbI₃ или НК CsPbBr₃, были синтезированы методом горячей инъекции, аналогичным нашим предыдущим исследова-

ниям [11,12] и в соответствии с [13,14]. При методе горячей инъекции соединения-прекурсоры растворяются в растворителе с высокой температурой кипения и нагреваются до температуры, превышающей температуру кипения растворителя. Для обоих НК использовалась одинаковая температура роста. Затем в смесь добавляют растворитель с более низкой температурой кипения для быстрого охлаждения и образования зародышей материала квантовых точек, что приводит к образованию мелких однородных частиц. Реакционную смесь выдерживают при более низкой температуре в течение некоторого времени для выращивания квантовых точек, после чего можно добавить укрупнительный агент для стабилизации частиц. Впоследствии квантовые точки промывались растворителем для удаления избытка лигандов и побочных продуктов и могли быть повторно диспергированы в желаемом растворителе для дальнейшего применения. Наконец, эти растворы NCs были нанесены на подложки из *c*-Si методом центрифугирования с использованием центрифуги Chemat Technology spin-

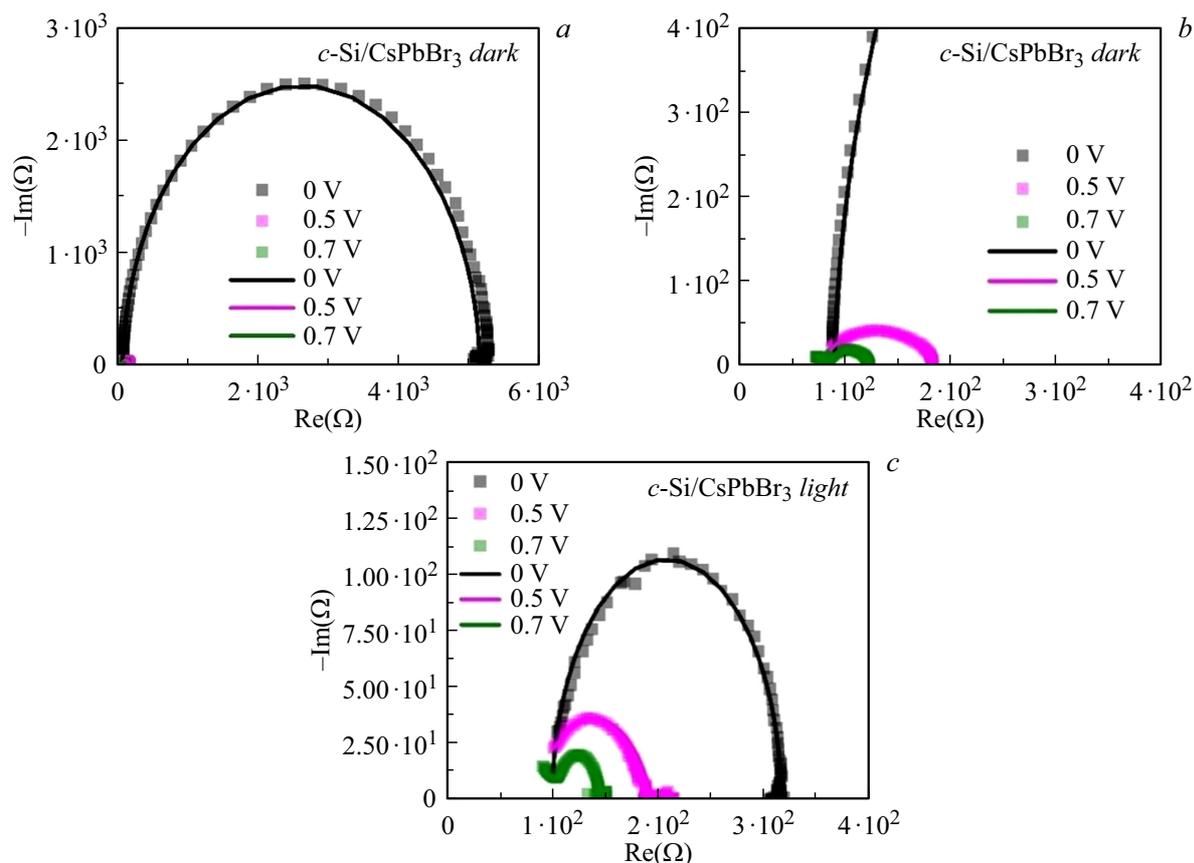


Рис. 2. Импедансная диаграмма для *a* — *c*-Si/CsPbBr₃ в темноте; *b* — меньший масштаб в высокочастотной области (*c*-Si/CsPbBr₃ в темноте); *c* — *c*-Si/CsPbBr₃ при освещении и при разных напряжениях смещения. Точки — реальный импеданс, линии — имитация импеданса.

coater KW-4A при 2000 rpm в течение 30 s. Толщина пленки для образца CsPbI₃ и образца CsPbBr₃ составляла 30–40 nm и 100–150 nm соответственно [5]. Для изучения оптических характеристик мы ранее провели измерения поглощения и фотолюминесценции (ФЛ). На рис. 1, *b* представлены спектры поглощения и ФЛ чистых пленок CsPbI₃ НК [11] и CsPbBr₃ НК [12] на кварцевых подложках. На рис. 1, *c* представлены результаты XRD-исследования пленки НК CsPbBr₃.

1.2. Измерения ИС

Измерения ИС проводились в темноте и при освещении имитатором солнечного света с использованием импедансометра Elins Z-500PX методом, описанным в нашей предыдущей работе [15]. Верхний электрод был изготовлен из меди. Измерения проводились при прямом смещении в диапазоне от 0 до 1 В в диапазоне частот от 10 Hz до 0.5 MHz. Данные ИС были проанализированы с использованием лицензионного программного обеспечения Z-View. Чтобы подавить внешние помехи, исследуемые образцы были помещены в медный ящик.

2. Результаты и обсуждение

Для лучшего понимания особенностей механизма переноса в наших образцах было проведено исследование ИС в одинаковых условиях (в темноте и при освещении имитатором солнечного света) для образцов *c*-Si СЭ с верхними слоями НК CsPbBr₃ и CsPbI₃, а также для чистого образца *c*-Si СЭ (без нанесенного верхнего слоя НК). На рис. 2, *a, b* показаны графики импедансного отклика для образца *c*-Si/CsPbBr₃ в темноте (рис. 2, *a*) и при освещении (рис. 2, *b*). Аналогично на рис. 3 показаны графики импедансного отклика для образца *c*-Si/CsPbI₃ в темноте (рис. 3, *a*) и при освещении (рис. 3, *b*), а на рис. 4, *a, b* — графики импедансного отклика для чистого образца *c*-Si в темноте (рис. 4, *a*) и при освещении (рис. 4, *b*). Эти графики представляют данные импедансного отклика, где $\text{Im}(\Omega)$ — мнимая часть комплексного сопротивления, а $\text{Re}(\Omega)$ — действительная часть комплексного сопротивления. Полуокруг на более высокой частоте связан с переносом заряда и рекомбинацией через структуру/контакты, а полуокруг на более низкой частоте — с рекомбинацией носителей заряда, релаксацией диэлектрика и миграцией ионов в слоях структуры [16]. Паразитный индуктивный хвост

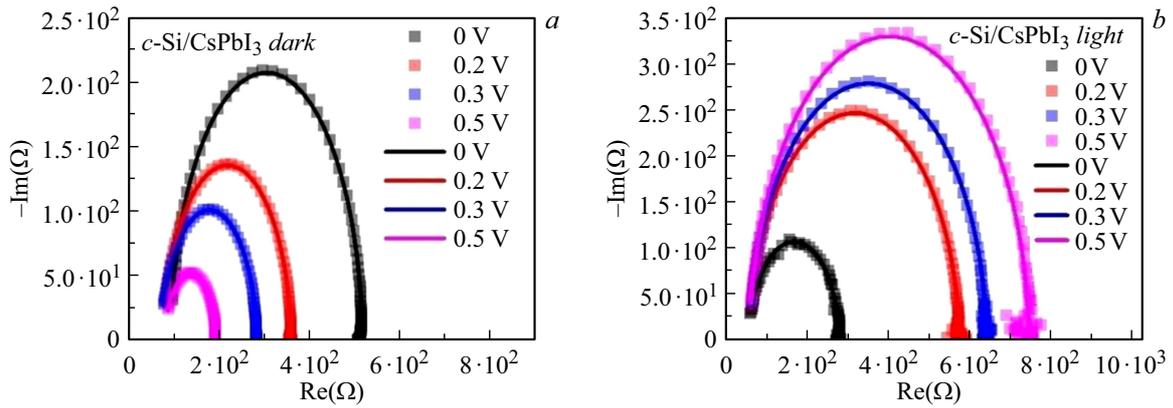


Рис. 3. Импедансная диаграмма для *a* — *c*-Si/CsPbI₃ в темноте и *b* — *c*-Si/CsPbI₃ при освещении и при разных напряжениях смещения. Точки — реальный импеданс; линии — имитация импеданса.

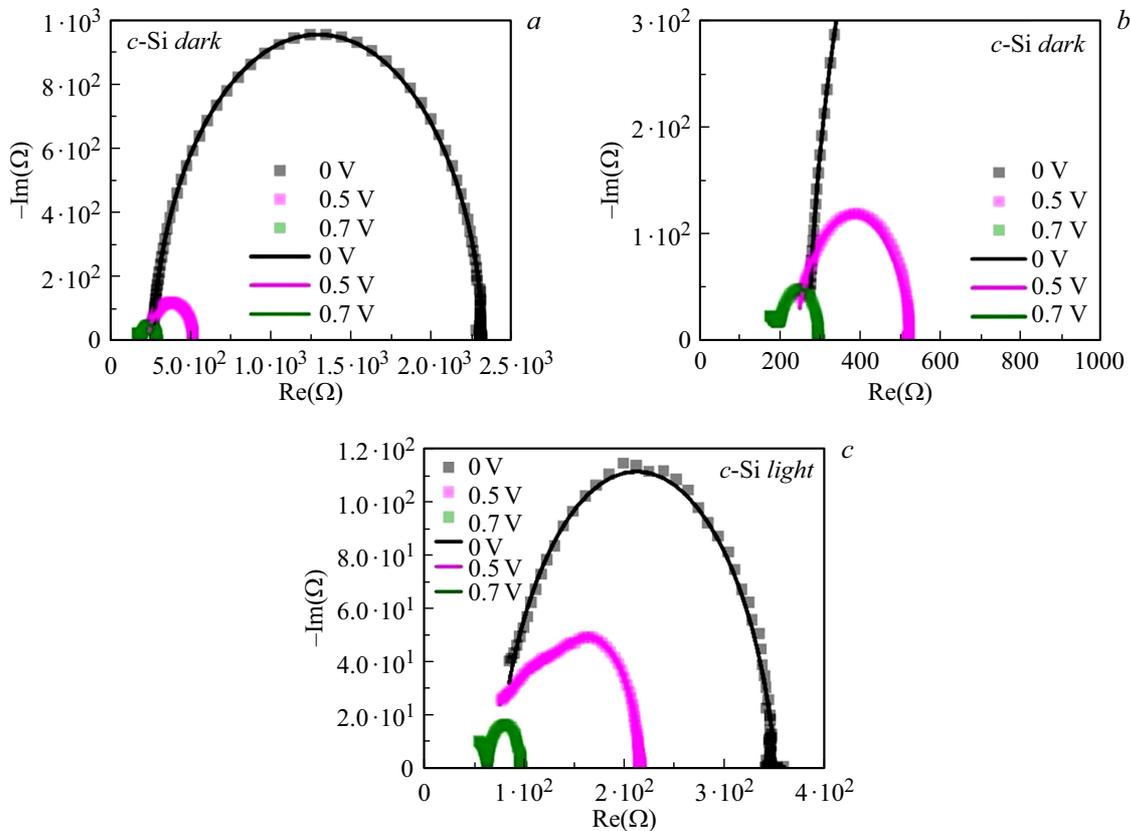


Рис. 4. Импедансная диаграмма для *a* — *c*-Si в темноте; *b* — меньший масштаб в высокочастотной области (*c*-Si в темноте); *c* — *c*-Si при освещении и при разных напряжениях смещения. Точки — реальный импеданс; линии — имитация импеданса.

на графиках импедансного отклика на высоких частотах приписывается паразитной индуктивности, исходящей от кабелей и электродов [17].

Графики импедансного отклика с различными напряжениями смещения были смоделированы с помощью эквивалентных схем, показанных на рис. 5 (для двух случаев: при напряжении 0.5 В и ниже и при напряжении 0.7 В и выше). На рис. 5, *a* эквивалентная схема состоит из резистора R_1 , включенного последовательно с параллельной комбинацией элемента постоянной

фазы CPE_1 , и сопротивлением R_2 . Эта эквивалентная схема обеспечивает превосходную подгонку данных по

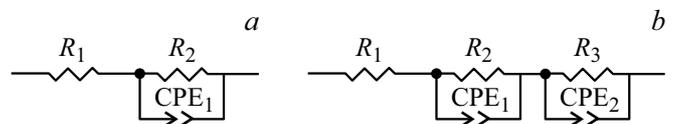


Рис. 5. Модель эквивалентной схемы для *a* — при напряжении 0.5 В и ниже; *b* — при напряжении 0.7 В и выше.

Числовые значения параметров для каждой модели

| Верхний слой | R_1 | R_2 | T_1 | P_1 | R_3 | T_2 | P_2 |
|-------------------------------|-------|-------|----------------------|----------------------|---------|----------------------|---------|
| CsPbBr ₃ _0_dark | 89.6 | 5065 | $1.32 \cdot 10^{-8}$ | 0.98691 | | | |
| CsPbBr ₃ _light | 100 | 218 | $1.61 \cdot 10^{-8}$ | 0.9907 | | | |
| CsPbBr ₃ _05_dark | 76.9 | 106.5 | $1.26 \cdot 10^{-7}$ | 0.84964 | | | |
| CsPbBr ₃ _05_light | 84.1 | 111.1 | $5.13 \cdot 10^{-7}$ | 0.73349 | | | |
| CsPbBr ₃ _07_dark | 46.9 | 38.36 | $5.48 \cdot 10^{-7}$ | 0.69104 | 37.11 | $8.44 \cdot 10^{-7}$ | 0.99971 |
| CsPbBr ₃ _07_light | | 111.2 | $1.57 \cdot 10^{-6}$ | 0.49134 | 35.64 | $6.43 \cdot 10^{-7}$ | 0.99792 |
| CsPbI ₃ _0_dark | 92.83 | 424.2 | $1.30 \cdot 10^{-8}$ | 0.98431 | | | |
| CsPbI ₃ _0_light | 57.35 | 219.8 | $1.62 \cdot 10^{-8}$ | 0.97827 | | | |
| CsPbI ₃ _02_dark | 77.69 | 281.3 | $1.59 \cdot 10^{-8}$ | 0.97545 | | | |
| CsPbI ₃ _02_light | 58.44 | 513.6 | $1.37 \cdot 10^{-8}$ | 0.97318 | | | |
| CsPbI ₃ _03_dark | 73.02 | 210 | $1.73 \cdot 10^{-8}$ | 0.97325 | | | |
| CsPbI ₃ _03_light | 58.55 | 581.2 | $1.30 \cdot 10^{-8}$ | 0.97284 | | | |
| CsPbI ₃ _05_dark | 80.3 | 111.6 | $2.37 \cdot 10^{-8}$ | 0.95978 | | | |
| CsPbI ₃ _05_light | 58.66 | 684.8 | $1.15 \cdot 10^{-8}$ | 0.97567 | | | |
| CsPbI ₃ _07_dark | 60.89 | 32.4 | $3.53 \cdot 10^{-7}$ | 1 | 43.74 | $1.08 \cdot 10^{-6}$ | 0.7 |
| c-Si pure_0_dark | 270 | 2044 | | $1.27 \cdot 10^{-8}$ | 0.95275 | | |
| c-Si pure_0_light | 73.66 | 276.8 | $6.92 \cdot 10^{-8}$ | 0.86319 | | | |
| c-Si pure_05_dark | 239.1 | 281.7 | $5.54 \cdot 10^{-8}$ | 0.8839 | | | |
| c-Si pure_05_light | 52.7 | 62.01 | $1.12 \cdot 10^{-7}$ | 1 | 101 | $9.90 \cdot 10^{-7}$ | 0.6774 |
| c-Si pure_07_dark | 103.2 | 103.5 | $8.56 \cdot 10^{-7}$ | 0.58 | 88.79 | $2.45 \cdot 10^{-7}$ | 1 |
| c-Si pure_07_light | 36.93 | 26.62 | $3.61 \cdot 10^{-8}$ | 0.90097 | 33.35 | $2.87 \cdot 10^{-6}$ | 0.99822 |

целому ряду применяемых напряжений смещения [18]. Элемент R_1 представляет собой резистивные потери на электродах и соответствует сдвигу от нуля до пересечения полукруга с осью Re на высоких частотах. Элемент R_2 соответствует диаметру полукруга и уменьшается в ответ на увеличение смещения образца. Это можно объяснить уменьшением объемного сопротивления в результате введения носителей заряда [19,20]. СРЕ является неидеальным конденсатором и связан с $p^+ - n$ переходом в слое Si [18] и неравномерным распределением времени релаксации диэлектрика, проявляющимся из-за неоднородностей в слое перовскита [21]. При увеличении напряжения смещения наблюдается значительное уменьшение диаметра дуги полукруга. Однако для образца c-Si/CsPbI₃ диаметр дуги увеличивается, что объясняется эффектом отрицательного фотоотклика [22–24]. Рис. 5, b дополнительно содержит элемент постоянной фазы СРЕ₂ и сопротивление R_3 , которые описывают хвост на графиках импедансного отклика в высокочастотной области при высоких напряжениях смещения. Наличие таких стандартных полукругов на

графиках импедансного отклика означает, что исследуемые СЭ обладают идеальным электрическим откликом, не демонстрируют явной деградации и характеризуются хорошей стабильностью [25].

По сравнению с чистым образцом c-Si образец c-Si/CsPbBr₃ демонстрирует более значительное изменение отклика импеданса в темноте при приложении напряжения смещения из-за большего полукруга при нулевом напряжении смещения и меньшего полукруга при других напряжениях смещения. Никаких существенных изменений в характеристике импеданса при освещении имитатором солнечного света для этого образца обнаружено не было.

Образец c-Si/CsPbI₃ по сравнению с образцом c-Si демонстрирует менее значительное изменение импедансной характеристики в темноте, но гораздо лучшую проводимость. Воздействие света на образец c-Si/CsPbI₃ приводит к появлению эффекта отрицательной фотопроводимости [22–24].

Расчеты параметров подгонки элементов цепи для всех образцов без приложения напряжения смещения

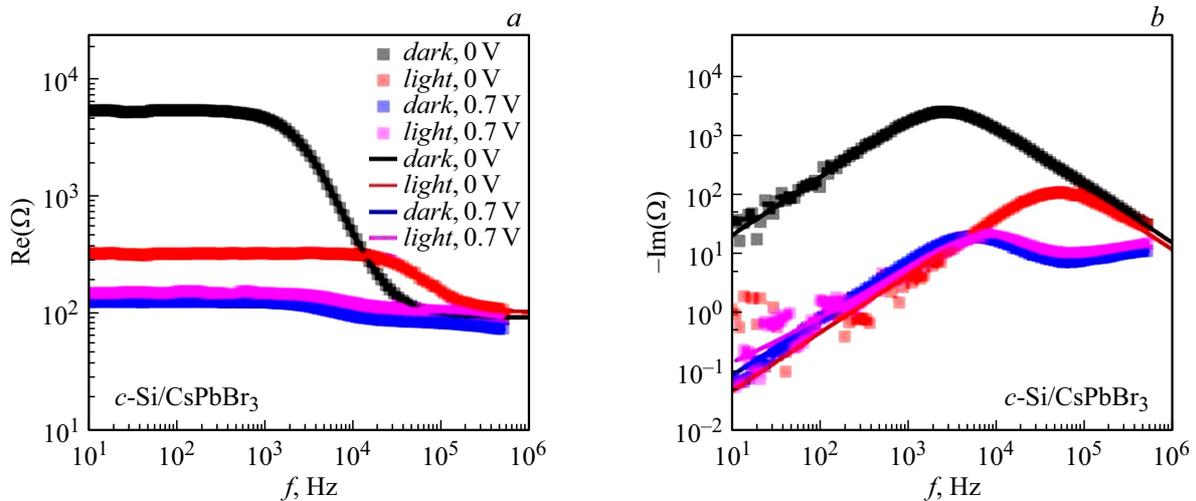


Рис. 6. Частотные зависимости действительной (a) и мнимой (b) частей комплексного сопротивления для *c*-Si/CsPbBr₃ образца в темноте и при освещении при разных напряжениях смещения. Точки — реальный импеданс, линии — имитация импеданса.

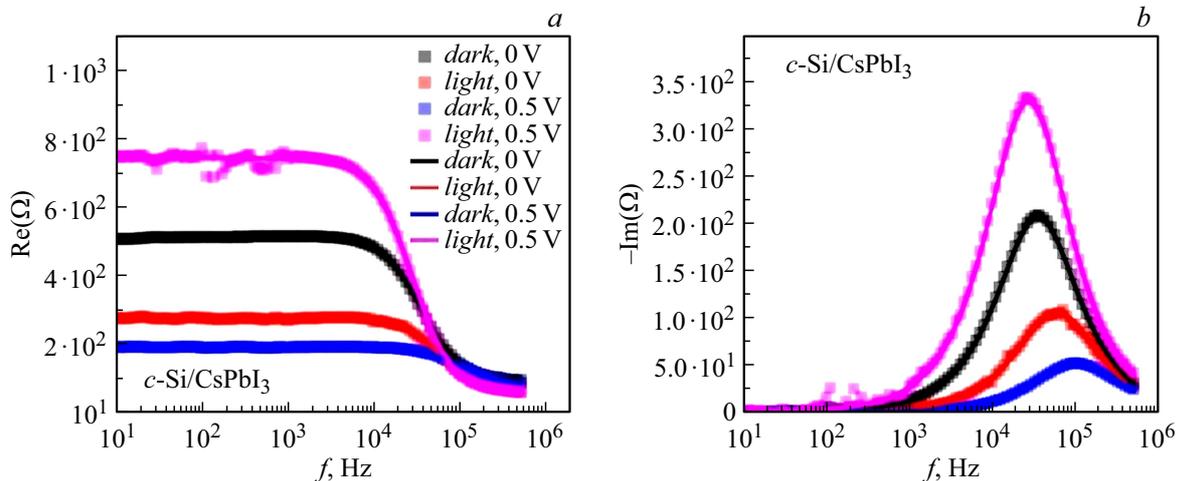


Рис. 7. Частотные зависимости действительной (a) и мнимой (b) частей комплексного сопротивления для *c*-Si/CsPbI₃ образца в темноте и при освещении при разных напряжениях смещения. Точки — реальный импеданс, линии — имитация импеданса.

были выполнены с помощью программы ZView. Каждый график импедансного отклика описывается четырьмя параметрами: R_1 , R_2 , T и P (для емкости $C = T, P = 1$). Численные значения этих параметров приведены в таблице. Погрешности всех результирующих параметров составляют менее 5%.

Отклик импеданса в различных условиях (в темноте и при освещении при различных напряжениях смещения) для всех образцов сравнивался с частотными зависимостями действительной (a) и мнимой (b) частей на рис. 6 (для образца *c*-Si/CsPbBr₃), на рис. 7 (для образца *c*-Si/CsPbI₃) и на рис. 8 (для образца *c*-Si). Для образца *c*-Si/CsPbBr₃ заметно влияние света на проводимость при нулевом напряжении смещения, что приводит к уменьшению сопротивления и значительному смещению пика сопротивления в высокочастотную область (уменьшение емкости). При приложении смещения эффект

фотопроводимости становится незначительным. Кроме того, смещение характеризуется появлением второго пика в высокочастотной области на рис. 6, b. Это можно объяснить появлением паразитной индуктивности, которая становится заметной при высоких значениях напряжения смещения [16]. Для образца *c*-Si/CsPbI₃ влияние света на проводимость заметно при любых напряжениях смещения. Но высокие значения смещения приводят к эффекту отрицательной фотопроводимости [19–21]. По сравнению с образцом *c*-Si/CsPbBr₃ пики мнимой части комплексного сопротивления для образца *c*-Si/CsPbI₃ более резкие и демонстрируют меньшие сдвиги по оси частот.

Для образца *c*-Si влияние света на проводимость заметно при любых напряжениях смещения по сравнению с образцом *c*-Si/CsPbBr₃, а также эффект отрицательной

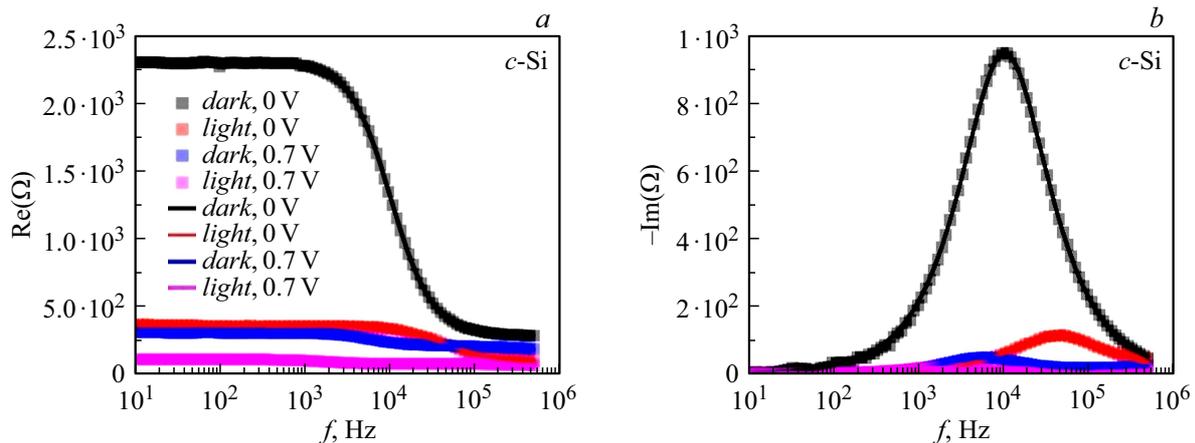


Рис. 8. Частотные зависимости действительной (а) и мнимой (б) частей комплексного сопротивления для *c*-Si образца в темноте и при освещении при разных напряжениях смещения. Точки — реальный импеданс, линии — имитация импеданса.

фотопроводимости не наблюдается по сравнению с образцом *c*-Si/CsPbI₃.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что СЭ с нанесенными пленками НК неорганического перовскита демонстрируют свойства, которые приблизительно аналогичны свойствам чистого *c*-Si СЭ, но при этом были отмечены некоторые различия.

Сопротивление рекомбинации образца *c*-Si/CsPbBr₃ и чистого образца *c*-Si изменяется похожим образом в зависимости от приложенного напряжения смещения. Как сопротивление рекомбинации, так и последовательное сопротивление уменьшаются с увеличением приложенного напряжения смещения. С другой стороны, образец *c*-Si/CsPbI₃ демонстрирует совершенно иное поведение. Сопротивление рекомбинации и последовательное сопротивление образца *c*-Si/CsPbI₃ увеличиваются с увеличением приложенного напряжения. Неидеальный конденсатор демонстрирует динамику носителей заряда в тандеме *a*-Si:H/*a*-Si_xC_x:H/*c*-Si СЭ. Следует отметить, что пленка НК CsPbI₃ усиливает фотоотклик при увеличении напряжения смещения, однако такой фотоотклик приводит к снижению проводимости по постоянному току. Пленка НК CsPbBr₃, напротив, блокирует фотоотклик при приложенном напряжении смещения, но немного улучшает фотоотклик при нулевом напряжении смещения. Когда приложенное напряжение превышает 0.6 V, образуются новые полукруги. Этот эффект был объяснен второй эквивалентной схемой.

Заключение

В работе были представлены результаты исследований ИС в многослойных структурах на основе пленок НК неорганических перовскитов CsPbI₃ и CsPbBr₃, нанесенных на поверхность СЭ на основе *c*-Si. Результаты ИС показывают, что при идентичных условиях графики импедансного отклика для обеих структур хорошо согласуются с моделями эквивалентных схем. Данные

модели эквивалентных схем представлены элементами сопротивления и постоянной фазы (которая описывает эффекты, возникающие из-за накопления заряда, сопротивления переносу заряда и/или дополнительных межфазных электронных состояний). Численные значения параметров *R*, *T* и *P* были получены для каждой модели эквивалентной схемы (погрешности всех результирующих параметров составляют менее 5%). Было обнаружено, что добавление слоя НК CsPbI₃ усиливает фотоотклик при увеличении напряжения смещения, но такой фотоотклик приводит к снижению проводимости (эффект отрицательной фотопроводимости). Напротив, добавление слоя НК CsPbBr₃ блокирует фотоотклик при увеличении напряжения смещения, но немного улучшает фотоотклик при нулевом напряжении смещения.

Данное исследование дает представление о процессах в тандемных СЭ на основе *c*-Si с верхними слоями НК неорганических перовскитов CsPbBr₃ (CsPbI₃) путем анализа спектров импеданса в различных условиях. Полученные результаты позволяют улучшить эксплуатационные характеристики следующего поколения тандемных *c*-Si СЭ с верхними слоями неорганических перовскитных НК.

Благодарности

Авторы благодарны И.П. Щербакову за помощь в исследовании фотолюминесценции.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] G. Eperon, M. Hörantner, H. Snaith. *Nat. Rev. Chem.*, **1**, 0095 (2017). DOI: 10.1038/s41570-017-0095

- [2] C. Gao, D. Du, W. Shen. *Carb Neutrality*, **1**, 9 (2022). DOI: 10.1007/s43979-022-00003-x
- [3] A. Al-Ashouri, A. Magomedov, M. Roß, M. Jošt, M. Talaikis, G. Chistiakova, R. Schlattmann. *Science*, **366** (6468), 857 (2019). DOI: 10.1126/science.abd4016
- [4] F. Sahli, J. Werner, B.A. Kamino, M. Bräuninger, R. Monnard, B. Paviet-Salomon. *Nature Mater.*, **17** (9), 820 (2018). DOI: 10.1038/s41563-018-0115-4
- [5] Л. Буджемила, А.Н. Алешин, В.Г. Малышкин, П.А. Алешин, И.П. Щербачков, В.Н. Петров, Е.И. Теруков. *ФТП*, **64** (11), 1695 (2022). DOI: 10.21883/FTT.2022.11.53322.418 [L. Boudjemila, A.N. Aleshin, V.G. Malyshekin, P.A. Aleshin, I.P. Shcherbakov, V.N. Petrov, E.I. Terukov. *Physics Solid State*, **64**, 1670 (2022). DOI:10.21883/PSS.2022.11.54189.418]
- [6] E. Hauff, D. Klotz. *J. Mater. Chem. C*, **10**, 742 (2022). DOI: 10.1039/D1TC04727B
- [7] M.M. Shehata, T.N. Truong, R. Basnet, H.T. Nguyen, D.H. Macdonald, L.E. Black. *Solar Energy Materials Solar Cells*, **251**, 112167 (2023). DOI: 10.1016/j.solmat.2022.112167
- [8] B. Hailegnaw, N.S. Sariciftci, M.C. Scharber. *Phys. Status Solidi A*, **22**, 2000291 (2020). DOI: 10.1002/pssa.202000291
- [9] E. Terukov, A. Kosarev, A. Abramov, E. Malchukova. *Solar Panels and Photovoltaic Materials*, **5** (2018). DOI: 10.5772/intechopen.75013
- [10] 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). DOI: 10.1109/JPHOTOV.2014.2352151
- [11] A.N. Aleshin, I.P. Shcherbakov, E.V. Gushchina, L.B. Matyushkin, V.A. Moshnikov. *Organic Electron.*, **50**, 213 (2017). DOI: 10.1016/j.orgel.2017.08.004
- [12] A.N. Aleshin, I.P. Shcherbakov, O.P. Chikalova-Luzina, L.B. Matyushkin, M.K. Ovezov, A.M. Ershova, I.N. Trapeznikova, V.N. Petrov. *Synthetic Metals*, **260**, 116291 (2020). DOI: 10.1016/j.synthmet.2020.116291
- [13] L. Protesescu, S. Yakunin, M.I. Bodnarchuk, F. Krieg, R. Caputo, C.H. Hendon, M.V. Kovalenko. *Nano Lett.*, **15**, 3692 (2015). DOI: 10.1021/nl5048779
- [14] A.K. Soni, R. Joshi, R.S. Ningthoujam. *Hot Injection Method for Nanoparticle Synthesis: Basic Concepts, Examples and Applications*. In: A.K. Tyagi, R.S. Ningthoujam (eds). *Handbook on Synthesis Strategies for Advanced Materials* (Indian Institute of Metals Series. Springer, Singapore, 2021), DOI: 10.1007/978-981-16-1807-9_13
- [15] A.M. Ivanov, G.V. Nenashev, A.N. Aleshin. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, **33**, 21666 (2022). DOI: 10.1007/s10854-022-08955-7
- [16] H. Zhang, X. Qiao, Y. Shen, T. Moehl, S.M. Zakeeruddin, M. Gratzel, M. Wang. *J. Mater. Chem. A*, **3**, 11762 (2015). DOI: 10.1039/C5TA02206A
- [17] J. Panigrahi, R. Singh, N. Batra, J. Gope, M. Sharma, P. Pathi, S. Srivastava, C. Rauthan, P. Singh. *Sol. Energy*, **136**, 412 (2016). DOI: 10.1016/j.solener.2016.06.041
- [18] Y. Yorozu, M. Hirano, K. Oka, Y. Tagawa. *IEEE Transl. J. Magn. Jpn.*, **2**, 740 (1987).
- [19] J. Li, R. Gao, F. Gao, J. Lei, H. Wang, X. Wu, J. Li, H. Liu, X. Hua, S. Liu. *J. Alloys Comp.*, **818**, 152903 (2020). DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.152903
- [20] G. Tong, T. Chen, H. Li, W. Song, Y. Chang, J. Liu, L. Yu, J. Xu, Y. Qi, Y. Jiang. *Solar RRL*, **3**, 1900030 (2019). DOI: 10.1002/solr.201900030
- [21] V. Srivastava, A. Alexander, B. Anitha, M.A.G. Namboothiry. *Sol. Energy Mat. Sol. Cells*, **237**, 111548 (2022). DOI: 10.1016/j.solmat.2021.111548
- [22] N.K. Tailor, C.A. Aranda, M. Saliba, S. Satapathi. *ACS Mater. Lett.*, **4**, 2298 (2022). DOI: 10.1021/acsmaterialslett.1c00242
- [23] H. Jin, Y. Chen, L. Zhang, R. Wan, Z. Zou, H. Li, Y. Gao. *Nanotechnology*, **32**, 085202 (2020). DOI: 10.1088/1361-6528/abc850
- [24] Q. He, G. Chen, Y. Wang, X. Liu, D. Xu, X. Xu, Y. Liu, J. Bao, X. Wang. *Small*, **17**, 2101403 (2021). DOI: 10.1002/sml.202101403
- [25] M.M. Shehata, T.G. Abdel-Malik, K. Abdelhady. *J. Alloys Comp.*, **736**, 225 (2018). DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.11.097