

ОБЛУЧЕНИЕ ПЛЕНОК СТРУКТУРЫ ПЕРОВСКИТА ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ

А.П. Букреев, Е.Н. Муратова, В.А. Мошников

*ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5
bukreevalbert@mail.ru*

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.075

Аннотация. Гибридные галогенидные перовскиты состава ABX_3 являются перспективные материалы для использования в оптоэлектронике и фотовольтаике. Для повышения эффективности работы структур на основе перовскита актуальной задачей становится имитация в лабораторных условиях влияние среды на структуры, облучение их различными заряженными частицами. В работе рассмотрены возможные варианты облучения пленок структуры перовскита различными заряженными частицами, такими как альфа- и гамма частицы, протоны и электроны, а также оценено влияние этих процессов на свойства и области применения таких структур. Результаты исследований показали, что пленки на основе перовскитов (например, $CsPbBr_3$) имеют очень быстрый отклик ($\tau \sim 5$ нс) на облучении их как альфа-частицами (с энергией ~ 5 МэВ), так и протонами. При этом обладают возможностью полного восстановления до исходных условий через несколько сотен миллисекунд после прекращения облучения. Показано, что органо-неорганические гибридные перовскиты более чувствительны к воздействию электронного пучка по сравнению с неорганическими. Увеличение дозы гамма-облучения приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны (с 2,35 до 2,14 эВ), смещению пики фотолюминесценции в сторону более длинных волн, уменьшению сопротивления границ зерен. Влияние дозы гамма-излучения на свойства делает тонкие пленки перовскитов весьма полезными в качестве сенсорных материалов.

Ключевые слова: перовскиты, облучение, заряженные частицы, солнечная энергетика, фотолюминесценция, ионные пучки, детекторы.

1. Введение

В современном мире все большую тенденцию набирает поиск и освоение альтернативных и экологичных способов получения энергии. Поиски разнообразных вариантов «зеленой» энергетики привели человечество к освоению солнечной энергии. Сегодня солнечные элементы находят все больше и больше разнообразных сфер применения, начиная от частных нужд человека и заканчивая космической промышленностью [1]. В связи с расширением областей использования солнечных элементов возникает необходимость их адаптации для той или иной среды. Часто возникают проблемы использования солнечных элементов, созданных с определенным типом структуры, для которых новая среда может оказаться враждебной и вызывать какие-либо дефекты, искажающие работу приборов, созданных на основе этих элементов. Для решения этой проблемы ученые предпринимают разнообразные подходы в создании солнечных элементов перебирая, как и разнообразные основы,

на которых создаются солнечные элементы, так и меняя саму структуру солнечных панелей. Используя самые разные материалы, инженеры стремятся достичь наибольшей эффективности, а также устойчивости солнечных элементов. Так в последнее время были разработаны солнечные элементы на основе перовскитов. Буквально за несколько лет такие элементы показали хорошие результаты увеличения эффективности преобразования энергии [2]. Солнечные элементы из перовскита привлекают внимание не только своей эффективностью, а также благодаря относительно не дорогой технологии изготовления за счет тонкопленочной архитектуры. Однако кроме изменения структуры создания солнечных элементов, возникает необходимость исследовать их пригодность на применение для разнообразных сред, условия которых могут влиять на работу приборов на их основе. Например, в космосе солнечные элементы подвержены возникновению радиационных дефектов, которые создавая локализованные состояния внутри запрещенной зоны, увеличивают потери рекомбинации. Происходит это из-за солнечного ветра, который является потоком высокоэнергетических частиц таких как α -частицы, электроны и протоны [1]. Для этого при создании солнечных элементов используемых в космической промышленности необходимо использовать материалы с высокой радиационной стойкостью. И это далеко не первый случай, где необходимо адаптировать структуры под сферы их применения. Именно поэтому существует необходимость в лабораторных условиях имитировать влияние среды на структуры, облучать их различными заряженными частицами или создавать условия, воздействующие на структуры самыми различными способами. Однако интерес вызывает не только адаптация солнечных структур под ту или иную сферу их применения, но и возможность возникновения новых или изменения уже существующих свойств этих структур под воздействием облучения разными энергетическими частицами [3] или под влиянием окружающей среды. Так, например благодаря резкой реакции перовскитных пленочных структур на облучение они могут быть интересны в качестве детекторов излучения [4, 5].

В данной работе мы предлагаем рассмотреть возможные варианты облучения пленок структуры перовскита различными заряженными частицами, а также влияние этих процессов на свойства и области применения этих структур.

2. Теоретическая часть

2.1. Облучение альфа-частицами

Исследования реакции тонких перовскитных пленок на основе $CsPbBr_3$ на поток альфа-частиц, испускаемых калибровочным альфа-

источником Am-241 ($E_{\alpha} \sim 5,5$ МэВ, активность ~ 30 кБк) дали в результате данные с высоким выходом сцинтилляций и быстрым откликом на α -частицы. Источник альфа-излучения находился на одной стороне перовскитного образца, который в свою очередь с другой стороны был оптически присоединён к фотоумножителю Hamamatsu H6524 (см. рис. 1). Между источником и образцом был воздушный зазор – 4 мм.

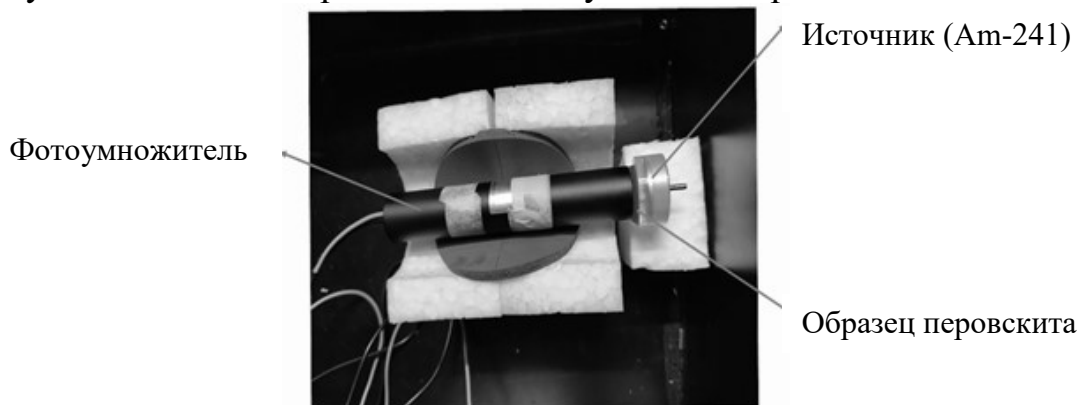


Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования реакции тонких перовскитных пленок на основе CsPbBr₃ на поток альфа-частиц

Сигналы ФЭУ были получены и предварительно обработаны с помощью цифрового преобразователя CAEN Desktop DT5725 (разрешение АЦП 14 бит и частота дискретизации 250 МГц). Прошивка, установленная на дигитайзере, а именно, цифровая обработка импульсов для интегрирования заряда и дискриминации по форме импульса (Digital Pulse Processing for Charge Integration and Pulse Shape Discrimination), позволяет предварительно обрабатывать данные, определение временных меток событий и интегрирование сигналов. Спектр амплитуд импульсов может быть сгенерирован с использованием полного интеграла сигналов. Для определения времени затухания сцинтилляционных сигналов набор осциллограмм был оцифрован с использованием осциллографа Teledyne LeCroy модели HDO4104, имеющего 12-разрядное разрешение АЦП, полосу пропускания 1 ГГц и частоту дискретизации до 2,5 Гвыб/с. Фотоэлектронный умножитель работал при напряжении 1600 В. Напряжение смещения подавалось с помощью высоковольтного модуля питания CAEN V6533 VME. Мост CAEN V2718 VME-PCI Optical Link использовался для управления блоком питания высокого напряжения. Контроллер CAEN A3818 PCI Express CONET2, установленный на настольном ПК, использовался для настройки и управления дигитайзером и блоком питания ВН (посредством оптоволоконных соединений по протоколу CAEN CONET2). Все параметры электроники, а также сбора данных управлялись с помощью программного обеспечения ABCD (Acquisition and Broadcast of Collected Data) в качестве проекта с открытым исходным кодом 1. Для количественного сравнения светоотдачи

продемонстрированной образцом перовскита на основе $CsPbBr_3$, аналогичный эксперимент был проведен с использованием стандартного неорганического сцинтиллятора, легированного таллием иодида цезия ($CsI:Tl$) (12 мм × 19 мм × 20 мм).

Чтобы получить время затухания, связанное с альфа-индуцированным сцинтилляционным событием, набор сигналов был получен с использованием осциллографа Teledyne LeCroy. Затем была рассчитана усредненная форма сигнала, и одна экспоненциальная функция затухания была подогнана к убывающей части этого сигнала (см. рис. 2). Была протестирована множественная экспоненциальная функция затухания, но лучшие результаты были получены при использовании только одной экспоненциальной функции. В результате была получена постоянная времени $\tau = (5,5 \pm 1,9)$ нс. Важно отметить, что в ядерной физике и физике элементарных частиц самыми быстрыми сцинтилляторами обычно являются органические вещества, которые имеют константы распада в несколько наносекунд. Кроме того, обычные неорганические сцинтилляторы, используемые в спектроскопических измерениях, гораздо медленнее (с константами затухания в несколько десятков или сотен наносекунд) [4].

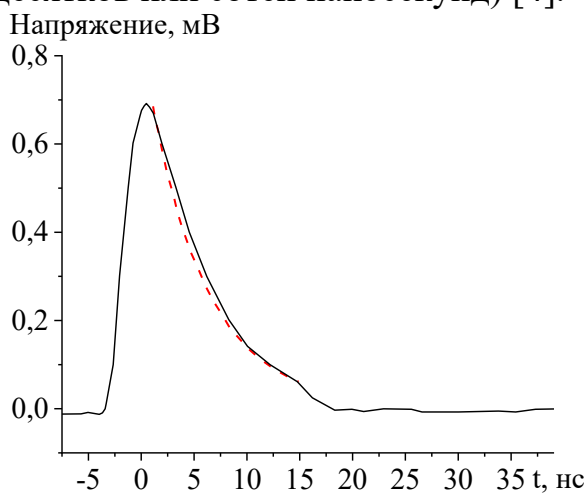


Рис. 2. Средняя форма волны альфа-индуцированных сцинтилляций образца перовскита на основе $CsPbBr_3$. Пунктиром показана одноэкспоненциальная подгонка затухания.

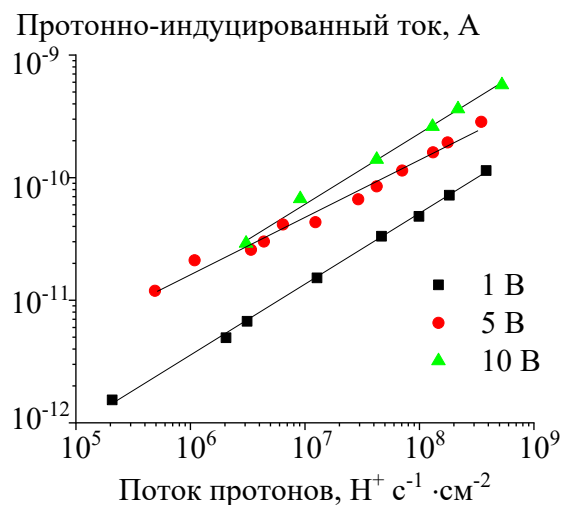


Рис. 3. Зависимость амплитуды сигнала от потока, индуцированного протонами, 10-секундным облучением протонами, при 1 В, 5 В и 10 В.

Следует отметить, что общий интеграл сигнала пропорционален общему световыходу в этом событии. Источник $Am-241$ испускает альфа-частицы с энергией $\sim 5,5$ МэВ в 4 мм воздуха, и эта энергия снижается до ~ 5 МэВ. Затем в 1 мкм перовскита на основе $CsPbBr_3$ эти альфа-частицы выделяют энергию от 0,15 до 0,30 МэВ (в зависимости от угла падения).

Несмотря на тонкую толщину пленки (1 мкм), было

продемонстрировано, что сцинтиллятор на основе $CsPbBr_3$ имеет очень быстрый отклик ($\tau \sim 5$ нс), который превосходит обычные неорганические сцинтилляторы ($\tau \sim$ десятки или сотни нс) и демонстрирует высокий световой выход ($\sim 39\%$ по отношению к $CsI:Tl$). Этот результат весьма примечателен и открывает путь для разработки инновационных гибких сцинтилляторов, которые будут вставлены в сложные и интегрируемые архитектуры для обнаружения источников альфа-излучения с низкой дозой, например, в области обнаружения тепловых нейтронов [4].

2.2. Облучение пучком протонов

Для исследования облучения перовскитных структур пучком протонов были использованы смешанные 3D-2D-пленки перовскитов на основе $MAPbBr_3$ (3D) и $(PEA)_2PbBr_4$ (2D) в соотношении 2D:3D с 35% 2D-компонента, были объединены лучшие характеристики обоих материалов [6]. Наличие двумерного перовскита позволяет значительно снизить темновой ток и получить слои толщиной в микрометр, однородно покрывающие активную область детектора, что очень сложно достичь с активным слоем из чистого $MAPbBr_3$. С другой стороны, трехмерный перовскит позволяет поддерживать хорошее значение чувствительности, довольно низкое у чистых двумерных перовскитов из-за его низкой плотности ($2,27$ г/см³). Отклик под протонными пучками смешанных 3D-2D пленочных детекторов был охарактеризован с использованием протонного пучка с энергией 5 МэВ, выведенного в атмосферу ускорителем мощностью 3 МВ. Поток протонов в диапазоне $[10^5 - 10^9]$ Н⁺ с⁻¹ см⁻², настраивался путем изменения тока протонного пучка в пределах от 0,01 Па до 49 Па. Вращающийся прерыватель, перехватывающий пучок между окном извлечения и образцом, использовался для контроля и измерения таких низких значений протонного тока. Линейная передача энергии, выделяемая каждым протоном внутри смешанного 3D-2D слоя перовскита толщиной 4 мкм и внутри полиэтилентерефталат-подложки толщиной 125 мкм, была рассчитана с помощью моделирования SRIM (Stopping and Range of Ions in Matter) [7], в результате чего получилось около 59 кэВ и 1550 кэВ соответственно. Реакция детектора на протонный пучок характеризовалась измерением тока, протекающего между электродами при 10-секундных циклах облучения при различных напряжениях смещения, т. е. 10, 5 и 1 В, совместимых с работой от батарей, что позволяет предусмотреть применение носимых персональных дозиметров (см. рис. 3). Индуцированный протонами ток пропорционален потоку падающих протонов для всех протестированных напряжений смещения [8].

Для оценки стабильности и надежности срабатывания детектора

проводили 10 повторных циклов облучения. Изменение сигнала произошло в пределах 12% по отношению к среднему значению за 10 повторений. Из-за внутренних флуктуаций потока протонов в различных циклах облучения точки данных были нормализованы по относительному падающему потоку для сравнения, а затем по среднему значению. Радиационная стойкость детектора также оценивалась путем измерения его отклика в исходном состоянии и после 40-минутных испытаний на облучение, что соответствует общему количеству $1,7 \cdot 10^{12}$ протонов, падающих на площадь пятна пучка. Через несколько минут после пробных облучений измерение повторяли в тех же условиях. Было зафиксировано максимальное отклонение в 14%, что подчеркивает устойчивость детектора к излучению и дополнительно оценивает его надежность в качестве дозиметра протонного пучка.

Таким образом, предлагаемый здесь смешанный 3D-2D-детектор перовскита может отслеживать поток падающих протонов в режиме реального времени с полным восстановлением исходных условий через несколько сотен миллисекунд после предыдущего облучения [9].

2.3. Облучение пучком электронов

Органо-неорганические гибридные перовскиты (ОНГП) стали перспективными материалами для оптоэлектроники благодаря их большому коэффициенту светопоглощения, высокой подвижности носителей и большой длине диффузии носителей [10]. Эффективность преобразования энергии (КПД) солнечных элементов ОНГП была улучшена с 3,8% до 25,5%, достигнув эффективности, сравнимой с эффективностью КПД лучших аналогов на основе кристаллического кремния. Однако ОНГП, такие как $MAPbI_3$ ($MA = CH_3NH_3^+$), уязвимы для различных факторов окружающей среды, включая влагу, кислород, тепло и световое облучение, которые обычно деформируют кристаллическую решетку или приводят к химическому разложению. Пассивация дефектов на поверхности и границах зерен играет важную роль в минимизации безызлучательной рекомбинации и поддержании стабильности обработанных раствором поликристаллических пленок ОНГП. Сфокусированный электронный пучок, создаваемый в сканирующем электронном микроскопе или просвечивающем электронном микроскопе, может быть использован для регулирования кристаллических структур, а также оптоэлектронных свойств материалов. $MAPbI_3$ был выбран в качестве подходящего кандидата для изучения структурных и композиционных изменений, вызванных электронным облучением, поскольку это многообещающий фотогальванический материал и более чувствительный к электронному лучу, чем все неорганические

перовскиты. Пленки MAPbI_3 были приготовлены на стекле ITO (оксид индия и олова) с использованием одностадийного процесса центрифугирования. Лазер с длиной волны 532 нм и низкой плотностью мощности $0,2 \text{ мВт/см}^2$ применяли для уменьшения фотоповреждения. Интенсивность фотолюминесценции (ФЛ) образцов, облученных электронным пучком, быстро возрастает с увеличением дозы облучения. Наибольший результат излучения ФЛ был примерно в шесть раз больше по сравнению с необлученным образцом. Улучшение фотолюминесценции связано с эффектом нокаута бомбардировки электронами поверхности MAPbI_3 , что вызывает обнажение свежей поверхности с меньшей плотностью ловушек, в то время как радиолиз играет основную роль в ухудшении кристаллических структур и, таким образом, ослабляет эмиссию фотолюминесценции. Считается, что воздействие электронного луча в какой-то момент помогает получить перовскитные пленки более высокого качества, и, соответственно, производительность устройства улучшается [11].

2.4. Гамма-облучение

Исследования влияния гамма-облучения на структурные, морфологические, оптические и электрические свойства были проведены с образцом тонкой пленки CsPbBr_3 . Тонкая пленка CsPbBr_3 была синтезирована методом термического напыления. Осажденные тонкие пленки подвергались воздействию различных доз гамма-излучения (0, 25, 50, 75 и 100 Гр) с использованием гамма-источника ^{60}Co с активностью 7,328 Гр/ч. Рентгеноструктурный анализ тонких пленок подтвердил орторомбическую кристаллическую структуру, а также показал увеличение размеров кристаллов и кристаллитов, тогда как плотность дислокаций и микронапряжения уменьшались с увеличением дозы гамма-излучения [12]. Результаты автоэмиссионной сканирующей электронной микроскопии показали, что морфология поверхности значительно изменилась из-за гамма-облучения. Оптические свойства показали уменьшение ширины запрещенной зоны (с 2,35 до 2,14 эВ) по мере увеличения дозы облучения, что может быть связано с увеличением размера кристаллитов и индуцированных дефектов. Пики ФЛ смещались в сторону более длинных волн и интенсивности, а полноширинные полумаксимумы пиков ФЛ увеличивались вместе с дозой гамма-излучения, что объяснялось спектральным уширением и увеличением скорости рекомбинации электронно-дырочных пар. Импедансная спектроскопия всех облученных образцов показала единственную полуокружность, что аналогично наблюдаемому в случае необлученных образцов. Сопrotивление границ зерен постепенно уменьшалось по мере

увеличения дозы гамма-излучения. Полученные результаты показали, что структурные дефекты, индуцированные гамма-облучением, оказывали поверхностное влияние на структурные, морфологические, оптические, фотолюминесцентные и импедансные свойства тонких пленок $CsPbBr_3$. Влияние дозы гамма-излучения на свойства делает тонкие пленки перовскитов весьма полезными в качестве сенсорных материалов [13].

3. Заключение

Принимая во внимание большое разнообразие интересных свойств перовскитов, можно предположить, что этот класс материалов имеет еще много неизвестных свойств, заслуживающих дальнейшего изучения. Превосходная эффективность в сочетании с тонкопленочной архитектурой и недорогими технологиями изготовления делают солнечные элементы из перовскита очень привлекательными. Хотя область солнечных элементов является наиболее популярным применением перовскитных материалов, их использование в приложениях для обнаружения излучения становится все более популярным. Успех перовскитов в качестве детекторов излучения частично основан на тех же свойствах материала, которые привели к успешным применениям в оптоэлектронике, а это означает, что другие специфические свойства, такие как большая тормозная способность, высокая подвижность, время жизни, быстрый отклик и большое объемное сопротивление, играют немаловажную роль. В этом отношении неорганические перовскиты привлекают большое внимание как сцинтилляционные материалы с характеристиками, чувствительными к форме материала и методам выращивания. Потребность в высокоэффективных детекторах излучения с широким охватом имеет важное значение в таких областях, как ядерная медицина, мониторинг радиоактивности окружающей среды и применение в космической промышленности. Для этих приложений материал детектора должен сильно взаимодействовать с высокоэнергетическими частицами или фотонами, должен быть способен работать в сильных электрических полях с пренебрежимо малым током утечки, должен обладать высоким удельным сопротивлением и должен быть масштабируемым. Все это говорит о широких возможностях перовскитных структур и о важности исследований свойств и неограниченного потенциала этих структур для самых разных областей и сфер их применения.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-42-10029, <https://rscf.ru/project/23-42-10029/>)).

Библиографический список:

1. **Khudyakov, D.V.** Thin films of $MAPbI_3$ and $MA_0.15FA_0.75Cs_0.1PbI_3$ perovskites under femtosecond laser

- irradiation: nonlinear optical absorption and kinetics of photodegradation / D.V. Khudyakov, D.V. Ganin, A.D. Lyashedko et al. // *Mendeleev Communications*. – 2021. – V. 31. – I. 4. – P. 456-458. DOI: 10.1016/j.mencom.2021.07.006.
2. **Матюшкин, Л.Б.** Фотолюминесценция нанокристаллов перовскитов CsPbX₃ (X = Cl, Br, I) и твердых растворов на их основе / Л.Б. Матюшкин, В.А. Мошников // *Физика и техника полупроводников*. – 2017. – Т. 51. – Вып. № 10. – С. 1387-1392. DOI:10.21883/FTP.2017.10.45018.8575.
 3. **Verma, С.Р.** Photonic cavity mode tuning in porous silicon-based microcavities by He⁺ and H⁺ ion irradiation / С.Р. Verma, A. Kandasami, D. Kanjilal, G.V. Prakash // *Special Collection: Radiation Effects in Materials*. – 2022. – V. 131. – I. 19. – Art. id. 195703. – 10 p. DOI: 10.1063/5.0087632.
 4. **Caricato, А.Р.** High scintillation yield and fast response to alpha particles from thin perovskite films deposited by pulsed laser deposition / А.Р. Caricato, S. Moretto, M.R. Guascito et.al. // *Frontiers in Physics*. – 2022. – V. 10. – Art. № 957991. – 12 p. DOI: 10.3389/fphy.2022.957991.
 5. **Spivak, Y.** Improving the conductivity of the PEDOT: PSS layers in photovoltaic cells based on organometallic halide perovskites / Y. Spivak, E. Muratova, V. Moshnikov et al. // *Materials*. – 2022. – V. 15. – I. 3. – Art. № 990. – 11 p. DOI: 10.3390/ma15030990.
 6. **Brus, V. V.** Defect dynamics in proton irradiated CH₃NH₃PbI₃ perovskite solar cells / V.V. Brus, F. Lang, J. Bundesmann et al. // *Advanced Electronic Materials*. – 2017. – V. 3. – I. 2. – Art. № 1600438. – 9 p. DOI: 10.1002/aelm.201600438.
 7. Stopping and range of ions in matter. – Режим доступа: <http://www.srim.org/index.htm>. – 01.09.2023.
 8. **Basiricò, L.** Mixed 3D–2D perovskite flexible films for the direct detection of 5 MeV protons / L. Basiricò, I. Fratelli, M. Verdi et al. // *Advanced Science*. – 2022. – V. 10. – I. 1. – Art. № 2204815. – 8 p. DOI: 10.1002/advs.202204815.
 9. **Martínez, W.O.H.** Effect of high energy proton irradiation on MAPbI₃ films for space applications observed by micro-Raman / W.O.H. Martínez, P. Giudici, N.B.C. Guerrero et al // *Materials Advances*. – 2020. – V. 1. – I. 6. – P. 2068-2073. DOI: 10.1039/d0ma00583e.
 10. **Jin, B.** Electron-beam irradiation induced regulation of surface defects in lead halide perovskite thin films / B. Jin, D. Zhao, F. Liang et al. // *Science and Technology*. – 2021. – V. 2021. – Art. id 9797058. – 11 p. DOI: 10.34133/2021/9797058.
 11. **Jin, B.** Suppression of phase transitions in perovskite thin films through cryogenic electron beam irradiation / B. Jin, F. Liang, D. Zhao et al. // *Nano Letters*. – 2022. – V. 22. – I. 18. – P. 7449-7456. DOI: 10.1021/acs.nanolett.2c02368.
 12. **Aldawood, S.** Gamma ray-induced effects on the properties of CsPbBr₃ perovskite thin film / S. Aldawood, S.A. Ali, S.M.U. Qaid et al. // *Journal of King Saud University – Science*. – 2021. – V. 34. – I. 2. – Art. № 101802. – 13 p. DOI: 10.1016/j.jksus.2021.101802.
 13. **Aldawood, S.** Study and characterization of γ -ray doses dependent properties of CuPbI₃ perovskite thin films / S. Aldawood, W.M. Bannoob, M.S. Garawi et al. // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2021. – V. 14. – P. 108-120. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.06.034.

References:

1. Khudyakov D.V., Ganin A.V., Lyashedko A.D. et al. Thin films of MAPbI₃ and MA_{0.15}FA_{0.75}Cs_{0.1}PbI₃ perovskites under femtosecond laser irradiation: nonlinear optical absorption and kinetics of photodegradation, *Mendeleev Communications*, 2021, vol. 31, issue 4, pp. 456-458. DOI: 10.1016/j.mencom.2021.07.006.
2. Matyushkin L.B., Moshnikov V.A. Photoluminescence of perovskite CsPbX₃ (X = Cl, Br, I) nanocrystals and solid solutions on their basis, *Semiconductors*, 2017, vol. 51, issue 10, pp. 1337-1342. DOI: 10.1134/S106378261710013X.
3. Verma С.Р., Kandasami А., Kanjilal D., Prakash G.V. Photonic cavity mode tuning in porous silicon-based microcavities by He⁺ and H⁺ ion irradiation, *Special Collection: Radiation Effects in Materials*, 2022, vol. 131, issue 19, art. id. 195703, 10 p. DOI: 10.1063/5.0087632.
4. Caricato А.Р., Moretto S., Guascito M.R. et.al. High scintillation yield and fast response to alpha particles from thin perovskite films deposited by pulsed laser deposition, *Frontiers in Physics*, 2022, vol. 10, art. no. 957991, 12 p. DOI: 10.3389/fphy.2022.957991.
5. Spivak Y., Muratova E., Moshnikov V. et al. Improving the conductivity of the PEDOT: PSS layers in photovoltaic cells based on organometallic halide perovskites, *Materials*, 2022, vol. 15, issue 3, art. № 990, 11 p. DOI: 10.3390/ma15030990.
6. Brus V.V., Lang F., Bundesmann J. et al. Defect dynamics in proton irradiated CH₃NH₃PbI₃ perovskite solar cells, *Advanced Electronic Materials*, 2017, vol. 3, issue 2, art. № 1600438, 9 p. DOI: 10.1002/aelm.201600438.
7. Stopping and range of ions in matter. Available at: <http://www.srim.org/index.htm>. (accessed 01.09.2023).

8. Basiricò L., Fratelli I., Verdi M. et al. Mixed 3D–2D perovskite flexible films for the direct detection of 5 MeV protons, *Advanced Science*, 2022, vol. 10, issue 1, art. no. 2204815, 8 p. DOI: 10.1002/advs.202204815.
9. Martínez W.O.H., Giudici P., Guerrero N.B.C. et al. Effect of high energy proton irradiation on MAPbI₃ films for space applications observed by micro-Raman, *Materials Advances*, 2020, vol. 1, issue 6, pp. 2068-2073. DOI: 10.1039/d0ma00583e.
10. Jin B., Zhao D., Liang F. et al. Electron-beam irradiation induced regulation of surface defects in lead halide perovskite thin films, *Science and Technology*, 2021, vol. 2021, art. id 9797058, 11 p. DOI: 10.34133/2021/9797058.
11. Jin B., Liang F., Zhao D. et al. Suppression of phase transitions in perovskite thin films through cryogenic electron beam irradiation, *Nano Letters*, 2022, vol. 22, issue 18, pp. 7449-7456. DOI: 10.1021/acs.nanolett.2c02368.
12. Aldawood S., Ali S.A., Qaid S.M.U. et al. Gamma ray-induced effects on the properties of CsPbBr₃ perovskite thin film, *Journal of King Saud University – Science*, 2021, vol. 34, issue 2, art. no. 101802, 13 p. DOI: 10.1016/j.jksus.2021.101802.
13. Aldawood S., Bannoob W.M., Garawi M.S. et al. Study and characterization of γ -ray doses dependent properties of CuPbI₃ perovskite thin films, *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, vol. 14, pp. 108-120. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.06.034.

Short Communication

FILM IRRADIATION OF PEROVSKITE STRUCTURES WITH CHARGED PARTICLES

A.P. Bukreev, E.N. Muratova, V.A. Moshnikov

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI» named after V.I. Ulyanov (Lenin)

St. Petersburg, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.075

Abstract: Hybrid halide perovskites of the ABX₃ composition are promising materials for use in optoelectronics and photovoltaics. To enhance the efficiency of structures based on perovskite, simulating the influence of the environment on the structures in laboratory conditions, irradiating them with various charged particles, has become a relevant task. This study explores possible irradiation methods for films with perovskite structures using various charged particles, such as alpha and gamma particles, protons, and electrons. Additionally, the impact of these processes on the properties and application domains of such structures is assessed. The research results showed that films based on perovskites (for example, CsPbBr₃) have a very fast response ($\tau \sim 5$ ns) to irradiation with both alpha particles (with energy of ~ 5 MeV) and protons. At the same time, they have the ability to fully restore to the initial conditions in a few hundred milliseconds after the cessation of irradiation. It has been shown that organic-inorganic hybrid perovskites are more sensitive to the action of an electron beam than inorganic ones. An increase in the dose of gamma irradiation leads to a decrease in the band gap (from 2,35 to 2,14 eV), a shift in the photoluminescence peak towards longer wavelengths and a decrease in the resistance of the grain boundaries. The effect of the gamma radiation dose on properties makes perovskite thin films very useful as sensor materials.

Keywords: perovskites, irradiation, charged particles, solar energy, photoluminescence, ion beams, detectors.

*Букреев Альберт Павлович – студент 6 курса кафедры микро- и нанoeлектроники «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет имени В.И. Ульянова (Ленина)»
Muratova Екатерина Николаевна – к.т.н., доцент кафедры микро- и нанoeлектроники «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет имени В.И. Ульянова (Ленина)»
Мошников Вячеслав Алексеевич – д.ф.-м.н., профессор кафедры микро- и нанoeлектроники «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет имени В.И. Ульянова (Ленина)»*

*Albert P. Bukreev – 6th year student, Department of Micro- and Nanoelectronics, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI» named after V.I. Ulyanov (Lenin)
Ekaterina N. Muratova – Ph. D., Associate Professor, Department of Micro- and Nanoelectronics, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI» named after V.I. Ulyanov (Lenin)
Vyacheslav A. Moshnikov – Dr. Sc., Professor, Department of Micro- and Nanoelectronics, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI» named after V.I. Ulyanov (Lenin)*

Поступила в редакцию/received: 12.09.2023; после рецензирования/revised: 22.09.2023; принята/accepted: 05.10.2023.