Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

УДК 621.315.592.9

Будник
Валерия Сергеевна

Синтез металлорганических перовскитов для приборов оптоэлектроники

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра

по специальности 7-06-0717-01 «Нанотехнологии и наноматериалы»

Научный руководитель
Степанов Андрей Анатольевич
кандидат технических наук,
доцент

Минск 2026

ВВЕДЕНИЕ

Рост мирового потребления электроэнергии – одна из наиболее характерных черт деятельности человечества на современном этапе. До 1950–х годов развитие энергетики испытывало некоторые трудности, так как увеличение производства энергии происходило в основном за счёт роста добычи полезных ископаемых, которые перерабатываются при помощи эффективных тепловых электростанций. В наши дни более 85 % электроэнергии вырабатывается сжиганием минерального и органического топлива (например, бензина), что существенно уменьшает его содержание в земных недрах.

Энергетика уже сегодня сталкивается с истощением своих традиционных сырьевых запасов. Одна из причин такого явления – ограниченность ископаемых энергетических природных ресурсов. Сохранять высокие темпы прироста производства электроэнергии путём использования лишь традиционных ископаемых источников энергии с годами становится всё сложнее.

Загрязнение окружающей среды продуктами сгорания и переработки ископаемых источников энергии, главным образом, каменного угля, является причиной ухудшения экологической обстановки на Земле. Уже при современных масштабах производства энергии возможны необратимые и небезопасные изменения климата. Подобными нюансами обусловлен неугасающий интерес к возобновляемым и неисчерпаемым источникам энергии, широкое использование которых в будущем не создаст нарушения экологического баланса.

Когда речь заходит об энергетике, базирующейся на возобновляемых источниках энергии (альтернативной энергетике), то в первую очередь говорят именно про солнечную энергетику. Внимание учёных и специалистов уже давно привлечено к разработке эффективных средств преобразования солнечной энергии в электроэнергию. Использование этого типа энергии никак не связано с загрязнением окружающей среды и нарушением теплового баланса планеты. Повышенный интерес к фотоэлектрическому методу преобразования энергии обусловлен реальной возможностью создания стабильных в эксплуатации, дешёвых и высокоэффективных солнечных элементов с большим коэффициентом полезного действия.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объекты исследования: плёнки трийодсодержащих и смешанных I/Cl перовскитов, модифицированные добавками арил- и алкиламмониевых солей в различных концентрациях, перовскитные солнечные элементы.

Цель работы: синтез металлорганических перовскитов с арил- и алкиламмониевыми ($R\text{-}NH_3^+$) катионами и конструкция солнечных элементов с их использованием.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Исследовать особенности синтеза металлорганических перовскитов с арил- и алкиламмониевыми катионами.
2. Исследовать металлорганические перовскитные плёнки с вводимыми катионами на сплошность методами оптической микроскопии;
3. Исследовать оптические характеристики исследуемых плёнок методом спектрофотометрии;
4. Установить закономерности влияния состава и концентрации вводимых катионов на структурные и оптические свойства исследуемых плёнок;
5. Разработать технологию создания и конструкцию солнечного элемента с исследуемыми плёнками в качестве активных слоёв;
6. Исследовать электрические характеристики и параметры разработанного солнечного элемента.

Методы исследований: рентгенофазовый анализ, спектральное сканирование (спектрофотометрия), оптическая микроскопия, вольт-амперная характеристика.

Разработаны составы жидкофазных прекурсоров перовскитов на основе диметилформамида. Методом центрифугирования были получены плёнки йодного и смешанного I/Cl перовскитов с добавлением различных йодидалкиламмониевых солей в широком диапазоне концентраций. Выявлено, что при различных типах добавок могут образовываться кристаллические, аморфные и зернистые плёнки толщиной 0,8–1,0 мкм.

С точки зрения морфологического и оптического исследований пригодны к использованию ячейки на основе йодных перовскитов, допированных моноэтаноламином и этилендиамином, а также смешанных I/Cl с добавлением этилендиамина. Рентгенофазовый анализ выявил усиление деградации перовскитных образцов при допировании аммиаком, моноэтаноламином и анилином из-за повышенной гидрофильности этих соединений. По этой причине нельзя допускать вышеуказанные допанты к работе в солнечных элементах. Исследование вольт-амперных характеристик этилендиаминовых перовскитов позволило выявить зависимость электрических характеристик от

типа поверхности.

Исходя из всех выполненных исследований и полученных результатов, пригодными для использования в солнечной энергетике оказались перовскиты, модифицированные этилендиаминовой добавкой (C = 10 и 30 г/л для йодных и C = 10, 20 и 30 для смешанных).

Научная значимость результатов исследования состоит в установлении и контроле факторов, влияющих на свойства, состав, структуру и качество поверхности тонкоплёночных материалов на основе смешанных органических галоидных перовскитов $CH_3NH_3PbCl_XI_{(3-X)}$ (X = 0; 1), используемых в изготовлении фотовольтаических элементов.

Практическая значимость заключается в разработке составов жидкофазных прекурсоров трийодсодержащих и монохлорпроизводных перовскитов с добавлением различных арил- и алкиламмониевых катионов в широком диапазоне концентраций для изготовления солнечных элементов с улучшенными эффективностью и стабильностью.

Экономическая значимость: результаты выполнения проекта позволят увеличить стабильность во времени и процент светопоглощения перовскитных плёнок в технологии изготовления солнечных элементов, что приведёт к повышению срока службы готовых солнечных ячеек более чем в 2 раза.

При светопоглощении энергия солнечного света преобразуется в электрическую форму энергии. Увеличение показателя светопоглощения (A,a.u. – absorbance unit) приводит к росту эффективности преобразования энергии (PCE – power conversion efficiency). Данный параметр является показателем КПД перовскитного солнечного элемента.

Результаты работы были апробированы на научных конференциях (дипломы и сертификаты конференций) и опубликованы в журналах и сборниках нижеуказанных конференций:

Новые горизонты – 2024: сборник материалов XI Белорусско-китайского молодёжного инновационного форума, Минск, 21–22 ноября 2024 года.

60-я юбилейная научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»: материалы конференции, Минск, 22–26 апреля 2024 г.

Актуальные проблемы физики, электроники и энергетики: электронный сборник статей II Международной научно-практической конференции, Новополоцк, 14 ноября 2024 г.

Сборник научных статей по итогам работы Международного научного форума НАУЧНЫЙ ДИАЛОГ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА (г. Москва, 5 июня 2025 г.). Том 2.

Материалы и структуры современной электроники [Электронный ресурс]:

материалы XI Междунар. науч. конф., Минск, 16–18 окт. 2024 г.

Научный диалог: теория и практика : сборник научных статей по итогам работы Международного научного форума, Москва, 9 апреля 2026 г.

Физика конденсированного состояния: материалы XXXIV Международной научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных, Гродно, 23–24 апреля 2026 г.

Сборник статей участников VIII Республиканской школы молодого китаеведа, Минск, 28 февраля 2025.

Микро-, Опто- и СВЧ-Электроника – 2025 : сборник трудов III международной научно-технической конференции, Минск, 14–17 октября 2025 года.

Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы XXV Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Гомель, 24–25 апреля 2025 г.: в 2 ч. Ч. 1.

Менделеевские чтения – 2025: электронный сборник материалов Республиканской научно-практической конференции по химии и химическому образованию Брест, 20 февраля 2025 года.

Современные проблемы физики – 2026: сборник научных трудов XII Международной школы-конференции молодых учёных и специалистов, Минск, 18–22 мая 2026 г.

Мокеровские чтения: сборник трудов 15-ой Международной научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники, Москва, 22–23 мая 2024 г.

Радиотехника и электроника: сборник материалов 61-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 22–23 апреля 2025.

Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковая опто- и наноэлектроника: тезисы докладов Всероссийской научной молодежной конференции, Санкт-Петербург, 24–28 ноября 2025 г.

Физика конденсированного состояния: материалы XXXIII Международной научно-практической конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 3–4 апреля 2025 г.

Сборник материалов II Международного молодёжного научно-культурного форума студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных, Гомель, 22–24 января 2025 г.

Всероссийская конференция по люминесценции LUMOS-2026: сборник материалов, Санкт-Петербург, 18–22 мая 2026 года.

Результаты работы были отмечены следующими наградами:

Диплом XI белорусско-китайского молодёжного инновационного форума «Новые горизонты–2024» за лучший доклад.

Вторая категория XXXI Республиканского конкурса научных работ студентов (2025 год).

Результаты исследования были внедрены в образовательный процесс учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в 2024/2025 учебном году на кафедре микро- и наноэлектроники в качестве материалов лекционного курса и лабораторных занятий по дисциплине «Актуальные проблемы нанотехнологий и новых материалов в электронике» для магистрантов специальности «Нанотехнологии и наноматериалы в электронике»; в 2025/2026 учебном году на кафедре микро- и наноэлектроники в качестве материалов лекционного курса и лабораторных занятий по дисциплине «Приборы оптоэлектроники» для магистрантов специальности «Нанотехнологии и наноматериалы в электронике».

Положения, выносимые на защиту.

Пригодны к использованию в солнечных ячейках пленки на основе йодных перовскитов, допированных аммиаком, моноэтаноламином и этилендиамином, а также смешанных I/Cl с добавлением этилендиамина. Данное заключение основано на результатах исследования морфологии и спектров пропускания/поглощения плёнок.

Наименьшая скорость деградации перовскитов наблюдается у немодифицированного перовскита либо при допировании перовскита этилендиамином, что приводит к угнетению нежелательных химических процессов, возникающих под воздействием окружающей среды (паров воды).

Исследование вольт-амперных характеристик этилендиаминовых перовскитов позволило выявить зависимость электрических характеристик от типа поверхности (морфологии плёнки) и концентрации внедрённой соли. При наличии проколов в сплошной плёнке либо участков, не покрытых плёнкой, электрические характеристики снижаются до неприемлемых значений.

Исходя из всех выполненных исследований и полученных результатов, наиболее перспективными для применения в солнечной энергетике оказались перовскиты, модифицированные этилендиаминовой добавкой. Оптимальная концентрация этилендиамина составила 10 и 30 г/л для йодных, а также 10, 20, 30 г/л для смешанных I/Cl перовскитов.

Структура и объём работы. Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, трёх глав и заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем диссертации − 99 страниц. Работа содержит 9 таблицы и 61 рисунок. Библиографический список включает 55 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено современное состояние солнечной энергетики, определены основные направления исследований, а также даётся обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В **общей характеристике работы** сформулированы её цель и задачи, обоснована научная, практическая и экономическая значимость работы, даны сведения об объекте и методах исследования и обоснован их выбор, а также описаны перспективы использования результатов магистерской диссертации.

В **первой главе** представлена общая характеристика перовскитных солнечных элементов, описаны физико-химические свойства и применение перовскитов, подробно показаны проблемы стабильности и механизмы деградации перовскитов, а также способы повышения эффективности и стабильности устройств на гибридных перовскитах путём добавления органических соединений в структуру перовскита.

Во **второй главе** представлена методика эксперимента, подробно показаны синтез и модификация перовскитов, подготовка подложек и получение перовскитных плёнок, а также методики исследования полученных образцов.

В **третьей главе** представлены результаты структурных, спектрально-оптических, рентгенофазовых и электрических (вольт-амперные характеристики) свойств сформированных структур.

В **приложении** приведены дипломы и сертификаты конференций, награды и акты внедрения в образовательный процесс результатов работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Особенности синтеза металлорганических перовскитов с арил- и алкиламмониевыми катионами заключались в добавлении в раствор на основе диметилсульфоксида соответствующих йодидалкиламмониевых солей при комнатной температуре небольшими порциями при перемешивании.

Сплошные плёнки получаются при модификации металлорганических перовскитов катионом этилендиаммония (С = 10, 30 и 40 г/л для йодных и С = 10, 20 и 30 для смешанных);

В диапазоне длин волн 400 – 600 нм при введении в перовскиты катиона этилендиаммония наблюдается значительное повышение светопоглощения и понижение светопропускания;

Зернистый характер поверхности для трийодсодержащих перовскитов достигается при введении катионов диэтиламмония (5 – 30 г/л), моноэтаноламмония (5 – 30 г/л), фениламмония (5 – 10 г/л), этилендиаммония (30 – 60 г/л); для монохлорзамещённых – после введение только катиона этилендиаммония во всём исследуемом диапазоне. В остальных случаях покрытия приобретают кристаллический характер. Образование зернистых покрытий за счёт большого количества зёрен приводит к уменьшению размеров и количества микропор в плёнках, приводящих к световым потерям, и, следовательно, к увеличению светопоглощения и уменьшению светопропускания;

Был создан перовскитный солнечный элемент, содержавший активный слой – перовскит, электрон-транспортный слой – TiOx, дырочно-транспортный слой – NiOx;

Наиболее оптимальные фотовольтаические параметры выявлены для трийодсодержащих перовскитов с содержанием дииодида этилендиаммония С = 10; С = 30 г/л и для смешанных (монохлорзамещённых) с С = 10, 20 и 30 г/л.

По теме диссертации было опубликовано 16 работ в международных и республиканских научных изданиях, материалах и тезисах конференций.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

[1 – А.] Будник, В. С. Влияние внедрения алкиламмониевых солей на свойства металлорганических перовскитов = The influence of alkylammonium salts introduction on the properties of organometallic perovskites / В. С. Будник, А. К. Тучковский // Материалы и структуры современной электроники: материалы XI Международной научной конференции, Минск, 16–18 октября 2024 г. / Белорусский государственный университет ; редкол.: В. Б. Оджаев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2025. – С. 47–52.

[2 – А.] Будник, В. С. Влияние модификации малыми концентрациями аминосодержащих соединений на морфологические и оптические свойства металлорганических перовскитов / В. С. Будник, И. А. Кашко, В. А. Лабунов // Актуальные проблемы физики, электроники и энергетики : электронный сборник статей II Международной научно-практической конференции, Новополоцк, 14 ноября 2024 г. / Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой ; редкол.: В. А. Богуш (пред.) [и др.]. – Новополоцк, 2025. – С. 316–320.

[3 – А.] Будник, В. С. Влияние добавки дииодида этилендиаммония на морфологию и светопоглощение металлорганических перовскитов = The effect of ethylenediammonium diiodide additive on the morphology and light absorption of organometallic perovskites / В. С. Будник, А. К. Тучковский, В. В. Филиппов, В. А. Лабунов // Мокеровские чтения: сборник трудов 15-ой Международной научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники, Москва, 22–23 мая 2024 г. / Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». – Москва, 2024. – С. 147–148.

[4 – А.] Будник, В. С. Исследование воздействия введения катиона этилендиаммония на структуру и светопоглощение перовскита / В. С. Будник, А. К. Тучковский, И. А. Врублевский // Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковая опто- и наноэлектроника : тезисы докладов Всероссийской научной молодёжной конференции, Санкт-Петербург, 24–28 ноября 2025 г. / Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. – Санкт-Петербург, 2025. – С. 21.

[5 – А.] Будник, В. С. Воздействие высоких концентраций алкиламмониевых катионов на структуру и светопоглощение металлорганических перовскитных пленок / В. С. Будник, А. К. Тучковский // Микро-, Опто- и СВЧ-Электроника – 2025 : сборник трудов III международной научно-технической конференции, Минск, 14–17 октября 2025 года / Государственное научно-производственное объединение «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»; редкол.: М. В. Богданович [и др.]. –

Минск, 2025. – С. 82–85.

[6 – А.] Будник, В. С. Влияние модификации катионами моноэтаноламмония и этилендиаммония на структуру и светопоглощение металлорганических перовскитных пленок / В. С. Будник, А. К. Тучковский, И. А. Врублевский // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы XXV Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 24–25 апреля 2025 г. : в 2 ч. Ч. 1 / Министерство образования Республики Беларусь, Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2025. – С. 97–100.

[7 – А.] Будник, В. С. Влияние модификации высокими концентрациями этилендиаммониевого включения на структуру и светопоглощение металлорганических перовскитов / В. С. Будник // Радиотехника и электроника: сборник материалов 61-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 22–23 апреля 2025 / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2025. – С. 253–254.

[8 – А.] Будник, В. С. Структура и светопоглощение монохлорзамещённых металлорганических перовскитов, допированных катионами RNH3+ в малых количествах / В. С. Будник // Научный диалог: теория и практика : сборник научных статей по итогам работы Международного научного форума, Москва, 5 июня 2025 г. : в 2 т. Т.2 / отв. ред. Д. Р. Хисматуллин. – Москва : Издательство Инфинити, 2025. – С. 167–172.

[9 – А.] Будник, В. С. Влияние модификации малыми концентрациями аммония иодида на процесс деградации монохлорзамещенных металлорганических перовскитов / В. С. Будник // Менделеевские чтения – 2025 : электронный сборник материалов Республиканской научно-практической конференции по химии и химическому образованию Брест, 20 февраля 2025 года. / Брестский государственный университет им. А. С. Пушкина ; редкол.: Н. С. Ступень, И. В. Бульская, Е. Г. Артемук. – Брест : БрГУ, 2025. – С. 24–28.

[10 – А.] Будник, В. С. Структурное и оптическое преобразование смешанного I/Cl перовскита после введения малого количества катиона этилендиаммония / В. С. Будник, А. А. Степанов // Всероссийская конференция по люминесценции LUMOS-2026 : сборник материалов, Санкт-Петербург, 18–22 мая 2026 года / Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербургский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова. – Санкт-Петербург: ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2026. – С. 307.

[11 – А.] Будник, В. С. Влияние строения вводимых в раствор катионов на поверхностную морфологию и светопоглощение хлорсодержащих перовскитов / В. С. Будник // Научный диалог: теория и практика: сборник научных статей

по итогам работы Международного научного форума, Москва, 9 апреля 2026 г. / отв. ред. Д. Р. Хисматуллин. – Москва : Издательство Инфинити, 2026. – С. 40–47.

[12 – А.] Будник, В. С. Структурные и оптические преобразования металлорганического перовскита после введения аммониевых соединений / В. С. Будник, К. Е. Буксанов // Современные проблемы физики – 2026 : сборник научных трудов XII Международной школы-конференции молодых учёных и специалистов, Минск, 18–22 мая 2026 г. / Национальная академия наук Беларуси ; под ред.: Д. С. Василевской [и др.]. – Минск : БГУИР, 2026. – С. 98–100.

[13 – А.] Будник, В. С. Воздействие катионов состава $RNH3+$ на структуру поверхности и светопропускание монохлорзамещённых металлорганических перовскитов / В. С. Будник, К. Е. Буксанов // Физика конденсированного состояния : материалы XXXIV Международной научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных, Гродно, 23–24 апреля 2026 г. / Гродненский государственный университет имени Янки Купалы ; редкол.: А. С. Воронцов (гл. ред.) [и др.]. – Гродно, 2026. – С. 26–29.

[14 – А.] Будник, В.С. Влияние переосаждения при помощи диметилформамида на морфологию и светопоглощение металлорганических перовскитов / В.С. Будник, В.А. Лабунов // Новые горизонты – 2024 : сборник материалов XI Белорусско-китайского молодёжного инновационного форума, Минск, 21-–2 ноября 2024 года / Белорусский национальный технический университет. – Минск, 2024. – Т. 2. – С. 12–14.

[15 – А.] Будник, В. С. Влияние переосаждения при помощи диметилформамида на структуру и светопропускание металлорганических перовскитов / В. С. Будник, В. А. Лабунов // Физика конденсированного состояния: материалы XXXIII Международной научно-практической конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 3–4 апреля 2025 г. / Гродненский государственный университет имени Янки Купалы; редкол.: Г. А. Гачко (гл. ред.) [и др.]. – Гродно, 2025. – С. 17–18.

[16 – А.] Будник, В. С. Влияние переосаждения из жидкофазного прекурсора на морфологию и оптические свойства металлорганических перовскитов / В. С. Будник // сборник материалов II Международного молодёжного научно-культурного форума студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных, Гомель, 22–24 января 2025 г. / Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Таизский университет, Научная организация исследований и инноваций ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2025. – С. 147.