

**Квантовые точки перовскита, легированные ионом неодима: синтез,
оптические свойства**

А.М. Пшуков, А.А. Кокоева, Ю.Ф. Якуба, А.З. Кашежев
ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет
им. Х.М. Бербекова»

360004, Россия, Кабардино-Балкарская Республика, Нальчик, ул. Чернышевского, 173
al-aneta@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.742

Аннотация: В работе представлена разработка методики синтеза, структурная и оптическая характеристика, а также сравнительный анализ свойств коллоидных квантовых точек на основе галогенидных перовскитов, легированных ионами Nd^{3+} с 20% замещением ионов свинца. Нанокристаллы с контролируемым содержанием редкоземельного элемента были синтезированы методом горячей инъекции, что обеспечило получение стабильных коллоидных структур с заданным уровнем легирования. Структурный анализ с использованием автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа подтвердил поликристаллическую природу наночастиц с размером зерен от ~30 до 200 нм. Элементный состав соответствует исходным материалам, что свидетельствует о контролируемости процесса легирования. Квантовый выход фотолюминесценции составил 40%, что является высоким показателем для Nd -легированных перовскитных систем. Спектр излучения с максимумом при 458 нм демонстрирует выраженный синий сдвиг, обусловленный влиянием Nd^{3+} на ширину запрещенной зоны. Для получения достоверных спектральных данных рекомендуется использовать разбавленные дисперсии. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного подхода и открывают перспективы применения легированных перовскитных нанокристаллов в оптоэлектронике, фотонике и сцинтилляционных технологиях.

Ключевые слова: перовскитные квантовые точки, неодим, легирование неодимом, синтез, световой выход, элементный состав, морфология нанокристаллов, оптические свойства, квантовый выход, жидкий органический сцинтиллятор.

Пшуков Адам Музарифович – к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, директор центра новых детекторных технологий и регистрации нейтрино, ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

Кокоева Анета Ахмедовна – к.х.н., старший научный сотрудник центра новых детекторных технологий и регистрации нейтрино, ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

Якуба Юрий Федорович – д.х.н., ведущий научный сотрудник центра новых детекторных технологий и регистрации нейтрино, ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

Кашежев Алим Заурбекович - стажер-исследователь центра детекторных технологий регистрации нейтрино, ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

Original paper

Perovskite quantum dots doped with neodymium ions: synthesis and optical properties

А.М. Pshukov, А.А. Kokoeva, Y.F. Yakuba, А.З. Kashezhev
Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.742

Abstract: The work presents a synthesis method, structural and optical characteristics as well as a comparative analysis of properties of colloidal quantum dots based on halide perovskites doped with Nd^{3+} ions with 20% substitution of lead ions. Nanocrystals with a controlled content of a rare-earth element were synthesized by a hot injection method, which ensured the production of stable colloidal structures with a specified level of doping. The structural analysis using an auto-emission scanning electron microscope confirmed the polycrystalline nature of the nanoparticles with the grain size of ~30 to 200 nm. The elemental composition corresponds to the initial materials, which indicates the

© А.М. Пшуков, А.А. Кокоева, Ю.Ф. Якуба, А.З. Кашежев, 2025

controllability of the doping process. The quantum yield of photoluminescence was 40%, which is a high value for Nd-doped perovskite systems. The emission spectrum with a maximum at 458 nm shows a pronounced blue shift due to the effect of Nd^{3+} on the band gap. Diluted dispersions are recommended to obtain reliable spectral data. The obtained results confirm the effectiveness of the proposed approach and open up prospects for the application of doped perovskite nanocrystals in optoelectronics, photonics, and scintillation technologies. *Keywords: perovskite quantum dots, neodymium, neodymium doping, synthesis, light output, elemental composition, nanocrystal morphology, optical properties, quantum yield, liquid organic scintillator.*

Adam M. Pshukov – Ph. D., Leading Researcher, Director of the Center for New Detector Technologies and Neutrino Regulation, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, ORCID: 0000-0003-2849-1238

Aneta A. Kokoeva – Ph. D., Senior Researcher, Center for New Detector Technologies and Neutrino Registration, Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov, ORCID: 0000-0002-6583-8555

Yuri F. Yakuba – Dr. Sc., Leading Researcher, Center for New Detector Technologies and Neutrino Registration, Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov, ORCID: 0000-0003-2711-2419

Alim Z. Kashezhev – Research Intern, Center for Neutrino Detection Technologies, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov,

Поступила в редакцию/received: 01.07.2025; после рецензирования/ revised: 03.09.2025; принята/accepted 07.09.2025.

1. Введение

Современные технологии требуют разработки новых материалов с контролируруемыми оптическими и электронными свойствами. Особый интерес в этом контексте представляют перовскитные квантовые точки (КТ) благодаря их превосходным характеристикам, таким как высокая фотолюминесценция, узкая полоса излучения и возможностью тонкой настройки ширины запрещённой зоны. В частности, неодим-допированные перовскитные КТ привлекают внимание благодаря их уникальным оптическим свойствам, включая эффективное поглощение в видимой и ближней инфракрасной областях спектра, что делает их перспективными для применения в солнечных элементах [1], светодиодах [2, 3] и биовизуализации [4].

Квантовые точки перовскита, легированные ионом неодима (Nd^{3+}), так же представляют собой перспективный материал для разработки высокоэффективных жидких сцинтилляторов, применяемых в нейтринной физике, особенно в экспериментах по поиску безнейтринного двойного бета-распада ($\beta\beta 0\nu$). Они обладают уникальными оптическими свойствами, такими как высокая фотолюминесценция, узкая спектральная ширина эмиссии и высокая стабильность, что делает их привлекательными кандидатами для различных приложений, включая детектирование низкоэнергетических частиц, таких как антинейтрино и гамма-кванты.

Жидкие сцинтилляторы, содержащие квантовые точки перовскита, демонстрируют высокую эффективность преобразования энергии взаимодействия частицы со сцинтиллятором в видимый свет. Это свойство

крайне важно для регистрации слабых сигналов, характерных для процесса $\beta\beta 0\nu$. Эмиссионный спектр излучения квантовых точек перовскита, легированных ионом неодима, хорошо согласуется с чувствительностью фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), применяемых в детекторах нейтринных экспериментов. Такое спектральное согласование способствует повышению эффективности сбора света и точности измерения энергии. Легирование ионов неодима обеспечивает дополнительную защиту материала от радиационного повреждения, возникающего при длительном воздействии интенсивных потоков нейтронов и гамма-излучений. Благодаря этому увеличивается срок службы сцинтиллятора и повышается надежность измерений. Высокая сцинтилляционная эффективность в сочетании с низким уровнем собственной флуоресценции позволяет существенно уменьшить фоновую компоненту сигнала, обусловленную внешними источниками радиации. Снижение фоновых шумов напрямую повышает чувствительность системы и облегчает регистрацию редких событий, таких как $\beta\beta 0\nu$.

Современные эксперименты по исследованию $\beta\beta 0\nu$, такие как KamLAND (Kamioka Liquid Scintillator Antineutrino Detector) [5] и Borexino [6], Double Chooz [7], Daya Bay [8] и RENO [9] активно используют жидкие сцинтилляторы для достижения высоких разрешений по энергии и низкой чувствительности к фону. В этом контексте перовскитные квантовые точки, легированные ионами неодима (Nd^{3+}), представляют собой перспективное направление для улучшения сцинтилляционных свойств детектирующих материалов и могут стать основой для создания детекторов нового поколения.

Однако синтез перовскитных КТ с включением редкоземельных элементов, таких как неодим, остается сложной задачей из-за необходимости точного контроля размеров, морфологии и кристаллической структуры нанокристаллов. Химические методы синтеза, включая горячее инжектирование и лигандо-обменные реакции, позволяют регулировать состав и оптические свойства КТ, но требуют оптимизации параметров синтеза, таких как температура, время реакции и состав прекурсоров.

Целью работы являлась изучение влияния состава перовскитной матрицы на эффективность включения Nd^{3+} , механизмы передачи энергии и характеристики ближней инфракрасной люминесценции. В данной работе представлен систематический подход к синтезу неодим-содержащих перовскитных КТ $CsPbBr_3:Nd^{3+}$, методом горячей инъекции, а так же проанализированы оптические свойства с целью использования для получения жидкого органического сцинтиллятора.

2. Характеристики материалов и приборов

В работе были использованы следующие реактивы: карбонат цезия (Cs_2CO_3 , 99,99%, Aldrich), бромид свинца ($PbBr_2$, 99,999%, Aldrich), гексагидрат бромида неодима ($NdBr_3 \cdot 6H_2O$, 99,9%, Alfa Aesar), олеиновая кислота (OA , 90%, Aldrich), олеиламин (OLA , 80-90%, Acros), толуол (C_7H_8 , 99,8%, HPLC grade, Fisher Chemical), 1-октадецен (ODE , 99,8%, Sigma), ацетон (C_3H_6O , чда, Химмед). Все используемые реагенты и органические растворители дополнительной очистке не подвергались. Морфология полученных кристаллов изучена с помощью автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-7500F. Для измерения спектров возбуждения и излучения в работе использовался люминесцентный спектрофотометр PerkinElmer LS 55, управление которым осуществляется с персонального компьютера с помощью программы FL WinLab. Все измерения проводились при комнатной температуре в интервале 18-25°C в кварцевых кюветах.

3. Методы синтеза наночастиц перовскита

Синтез проводился по методу горячей инъекции. Прежде всего готовили прекурсор Cs -олеата. Для этого 0,2 г Cs_2CO_3 растворяли в 10 мл ODE и 0,6 мл OA при 120°C под инертной атмосферой. Получали прозрачный раствор Cs -олеата. Далее готовили раствор $PbBr_2 / NdBr_3$ следующим образом: 0,188 г $PbBr_2$ (0,5 ммоль) и $NdBr_3$ в эквиваленте 5% замещения растворяли в 10 мл ODE с добавлением 1 мл OA и 1 мл OLA при 120°C до прозрачности раствора. Раствор $PbBr_2 / NdBr_3$ нагревали до 160°C и вводили 1 мл прекурсора Cs -олеата быстрым впрыском. Раствор моментально становился зелёно-жёлтым (формирование $CsPbBr_3 : Nd$ нанокристаллов). Реакцию останавливали через 5-10 секунд охлаждением. Дисперсию осаждали добавлением этанола (1:2) и центрифугированием (6000 об/мин, 5 мин). Осадок (нанокристаллы) редиспергировали в толуоле и процедуру повторяли 2 раза. Образцы $CsPbBr_3 : Nd^{3+}$ получили в объёме 40 мм³ в ксилоле. Полученный жёлто-зелёный коллоидный раствор делили на части и добавляли антирастворитель ацетон (1:2 по объёму). Раствор центрифугировали при 6000 об/мин в течение 5 минут и осадок (нанокристаллы) отделяли от супернатанта. Осадок редиспергировали в ксилоле. Важно отметить, что при увеличении концентрации нанокристаллов свыше 5% по массе наблюдается их агрегация, что приводит к интенсивному рассеянию света, перепоглощению фотолюминесценции и снижению точности спектральных измерений. Для оптических экспериментов использовались рабочие дисперсии с

концентрацией 1-3%. Готовые растворы хранились при температуре +4°C в тёмных герметичных флаконах.

4. Результаты и их обсуждение

Морфологию полученных образцов перовскита изучали на автоэмиссионном сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-7500F. Микроскопические исследования подтвердили наличие поликристаллических областей с чётко выраженными границами между отдельными фрагментами материала. Размеры отдельных фрагментов на изображении, полученном на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) (см. рис. 1), варьировались от примерно 30 до 200 нм, что указывает на формирование нанокристаллического ансамбля.

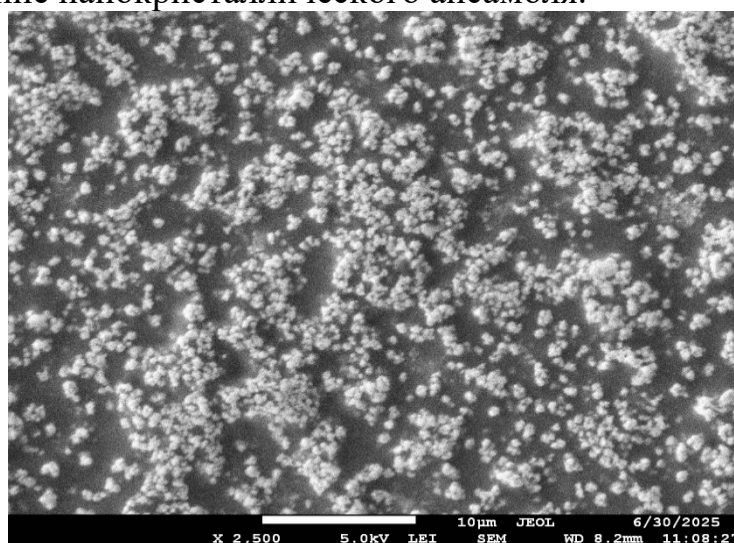


Рис. 1. СЭМ-изображение поверхности кристаллов перовскита.

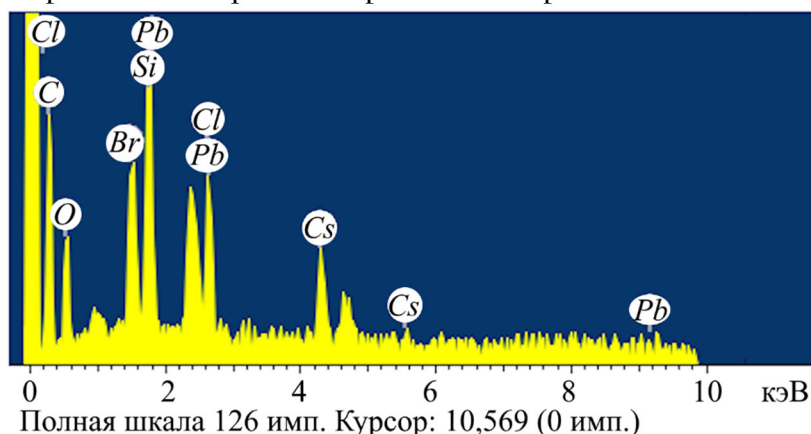


Рис. 2. Суммарный спектр элементного состава КТ.

Такой широкий диапазон размеров указывает на гетерогенность структуры, что может влиять на свойства материала, такие как проводимость и фотолюминесценция.

В целом структура удовлетворительная, но наблюдаются агломераты

и локальные поры, вероятно связанные с процессом сушки коллоидного раствора в ксилоле.

Изучение элементного состава (см. рис. 2) подтвердило полное соответствие исходному составу $CsPbBr_3 : Nd^{3+}$, дополнительно обогащённому неодимом. Численные значения приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Элементный состав образца $CsPbBr_3 : Nd^{3+}$.

Элемент	Весовой, %	Атомный, %
<i>C</i>	36,99	67,92
<i>O</i>	11,60	15,99
<i>Si</i>	7,58	5,95
<i>Cl</i>	6,21	3,86
<i>Br</i>	8,05	2,22
<i>Cs</i>	15,18	2,52
<i>Pb</i>	14,40	1,53
Итого	100,00	–

Распределение концентрации неодима в структуре квантовых точек было подтверждено путем сопоставления теоретически рассчитанных значений с экспериментально наблюдаемыми результатами. Это обеспечивает уверенность в том, что материал обладает необходимыми характеристиками для потенциального использования в оптоэлектронных приложениях. Равномерное распределение неодима в квантовых точках $CsPbBr_3$ означает, что каждый отдельный участок материала характеризуется одинаковым уровнем допирования. Это свойство критично для обеспечения стабильных оптических и электронных характеристик, необходимых для функционирования устройств на основе квантовых точек.

Одним из ключевых факторов, влияющих на структуру и свойства перовскитов, является замещение одного металла другим в кристаллической решетке. В частности, частичное замещение катиона свинца (Pb^{2+}) на ион неодима (Nd^{3+}) оказывает значительное влияние на энергетическую структуру и оптические характеристики перовскита $CsPbBr_3$. Замещение катиона свинца на неодим приводит к изменению симметрии и геометрии кристаллической решетки, что создает локальные деформации и формирует центры ловушек электронов и дырок. Такие изменения приводят к смещению энергетических уровней, что отражается в изменении спектра излучения материала.

При замещении свинца неодимом наблюдается синий сдвиг (или голубое смещение) максимума излучения. Для чистого перовскита $CsPbBr_3$ максимум излучения находится около 520 нм [10-12], тогда как введение 5% неодима приводит к смещению максимума в область 458 нм (см. рис. 3). Такое изменение объясняется увеличением ширины

запрещённой зоны и изменением плотности состояний вблизи края зоны проводимости.

Несмотря на создание дефектов и центров ловушек вследствие введения неодима, значение квантового выхода остаётся достаточно высоким и составляет 40%. Это свидетельствует о сохранении значительной части радиативного канала рекомбинации электронов и дырок, несмотря на появление дефектов. Высокий уровень квантового выхода показывает, что процессы поверхностной пассивации эффективны и препятствуют образованию ненаблюдаемых путей рекомбинации, которые могли бы снизить общую эффективность излучения.

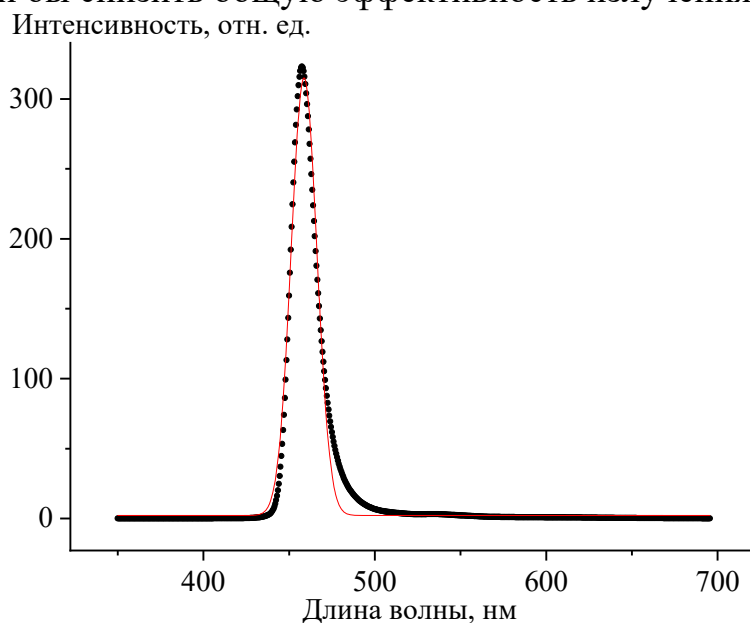


Рис. 3. Спектр излучения нанокристаллов $CsPbNdBr_3$ при возбуждении на длине волны 380 нм (чёрные точки – средняя интенсивность, красная линия – аппроксимация распределение Гаусса).

Стабильное положение пика излучения независимо от длины волны возбуждения указывает на монодисперсную структуру частиц и низкое содержание дефектов, что подтверждает однородность популяции нанокристаллов.

Измеренный спектр при $\lambda_{ex} = 380$ нм подтверждает высокое качество синтезированных нанокристаллов $CsPbNdBr_3$. Основными характеристиками являются чёткий максимум эмиссии в области синего–голубого диапазона, отсутствие побочных центров люминесценции и спектральная форма, типичная для однородных перовскитных квантовых точек с прямым межзонным переходом.

Контурные и трёхмерные графики (см. рис. 4, 5) подтверждают, что исследуемые квантовые точки характеризуются узкой зоной возбуждения (~370-390 нм), стабильным и симметричным пиком излучения (~458 нм) и высокой спектральной чистотой при минимальном числе вторичных

центров рекомбинации. Такое распределение характерно для качественно синтезированных перовскитных нанокристаллов, что делает данный материал перспективным для применения в синих светодиодах, лазерных источниках и сцинтилляционных системах.

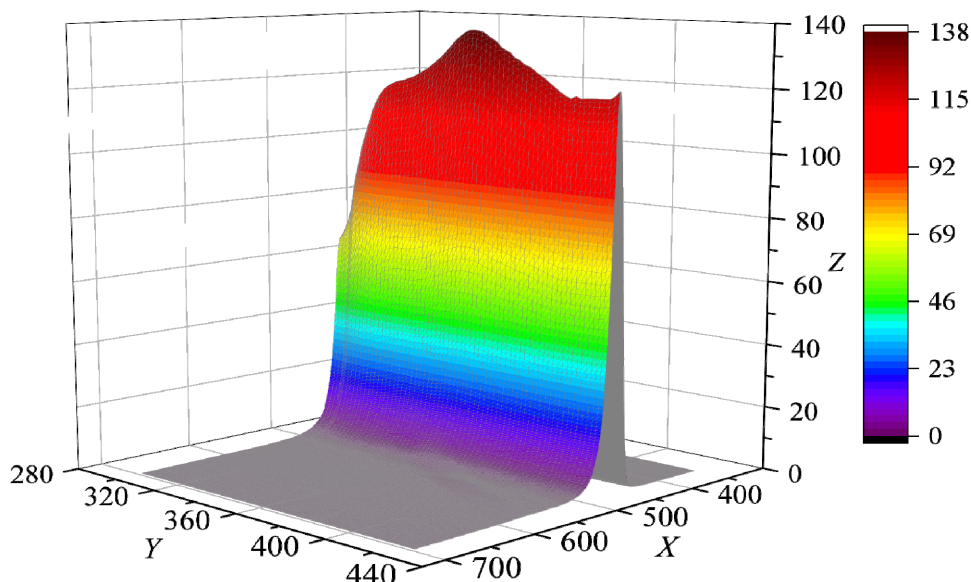


Рис. 4. 3D поверхность спектра излучения перовскита. Здесь ось X : λ_{em} , нм – длина волны излучения, диапазон 400-700 нм; ось Y : λ_{exc} , нм – длина волны возбуждения, диапазон 300-430 нм; ось Z : нормированная интенсивность эмиссии, отн. ед. Шаг сканирования: 2 нм по обеим осям.

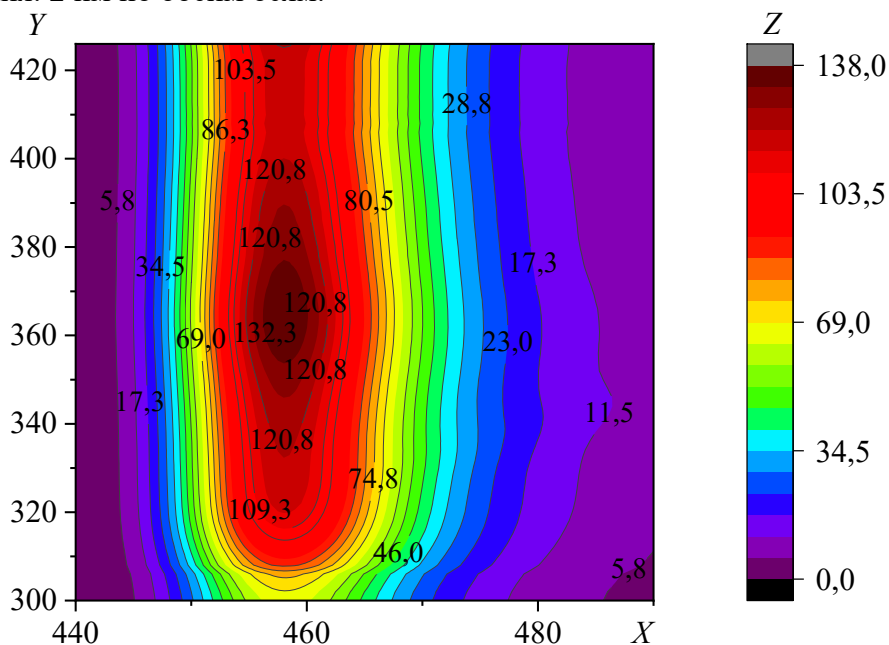


Рис. 5. 3D поверхность в режиме картирования. Ось X : λ_{em} , нм – длина волны возбуждения область 440-490 нм; ось Y : λ_{exc} , нм – длина волны излучения 300-430 нм; ось Z : нормированная интенсивность излучения, отн. ед.

4. Заключение

В данной работе разработан и успешно реализован протокол синтеза нанокристаллов $CsPbBr_3$, легированных ионами Nd^{3+} , с 20% замещением ионов свинца. Синтез осуществлялся методом горячей инъекции Cs -олеата в раствор $PbBr_2$ в 1-октадеcene при температуре $160^\circ C$, что позволило получить стабильные коллоидные растворы объёмом 40 мм^3 . Полученные нанокристаллы продемонстрировали квантовый выход фотолюминесценции на уровне 40%, что является высоким значением для Nd -легированных перовскитных материалов. Излучение с максимумом на 458 нм указывает на выраженный синий сдвиг спектра, обусловленный влиянием Nd^{3+} на ширину запрещённой зоны, что подтверждает эффективность легирования. Проведённое исследование демонстрирует успешность предложенной методики синтеза коллоидных квантовых точек перовскитного типа, стабилизированных примесями редкоземельного элемента. Полученные наноструктуры сочетают в себе высокую стабильность, значительный квантовый выход и благоприятные спектральные характеристики, что делает их перспективными для применения в оптоэлектронике, фотонике и сцинтилляционных технологиях. Особое внимание в дальнейших исследованиях будет уделено разработке сцинтилляторов на основе синтезированных нанокристаллов для использования в качестве чувствительных элементов в экспериментах по поиску безнейтринного двойного бета-распада изотопа $Nd-150$. Предполагается оптимизация концентрации легирующего элемента, изучение временных характеристик возбуждённого состояния, а также оценка долгосрочной стабильности и радиационной стойкости полученных материалов в условиях работы нейтринных детекторов.

Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-12-00322).

Библиографический список:

1. **Zhou, Y.** Metal-doped lead halide perovskites: synthesis, properties, and optoelectronic applications / Y. Zhou, J. Chen, O.M. Bakr, H.-T. Sun // *Chemistry of Materials*. – 2018. – V. 30. – I. 19. – P. 6589-6613. DOI: 10.1021/acs.chemmater.8b02989.
2. **Zhang, Y.** Metal halide perovskite nanosheet for X-ray high-resolution scintillation imaging screens / Y. Zhang, R. Sun, X. Ou et al. // *ACS Nano*. – 2018. – V. 13 – I. 2. – P. 2520-2525. DOI: 10.1021/acsnano.8b09484.
3. **Parobek, D.** Exciton-to-dopant energy transfer in Mn-doped cesium lead halide perovskite nanocrystals / D. Parobek, B.J. Roman, Y. Dong et al. // *Nano Letters*. – 2016. – V. 16 – I. 12. – P. 7376-7380. DOI: 10.1021/acs.nanolett.6b02772.
4. **De La Rosa, E.** Strong green upconversion emission in Nd^{3+} - Yb^{3+} codoped ZrO_2 nanocrystals / E. De La Rosa, P. Salas, H., Desirena, C. Angeles, L.A. Diaz-Torres // *Applied Physics Letters*. – 2005. – V. 87. – I. 24. – P. 241912-1-241912-3. DOI: 10.1063/1.2142091.
5. **Suzuki, A.** Results from KamLAND reactor neutrino detection / A. Suzuki, KamLAND Collaboration // *Physica Scripta*. – 2005. – V. 2005. – № T121. – P. 33-38. DOI: 10.1088/0031-8949/2005/T121/004.

6. **Alimonti, G.** The Borexino detector at the Laboratori Nazionali del Gran Sasso / G. Alimonti, C. Arpesella, H. Back et al. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2009. – V. 600. – I. 3. – P. 568-593. DOI: 10.1016/j.nima.2008.11.076.
7. **Abe, Y.** Indication of reactor electron antineutrinos disappearance in the Double Chooz Experiment / Y. Abe, C. Aberle, T. Akiri et al. // *Physical Review Letters*. – 2012. – V. 108. – I. 13. – P. 131801-1-131801-7. DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.131801.
8. **An, F.P.** Observation of electron-antineutrino disappearance at Daya Bay / F.P. An, J.Z. Bai, A.B. Balantekin // *Physical Review Letters*. – 2012. – V. 108. – I. 17. – P. 171803-1-171803-7. DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.171803.
9. **Ahn, J.K.** Observation of reactor electron antineutrinos disappearance in the RENO experiment / J.K. Ahn, S. Chebotaryov, J.H. Choi et al. // *Physical Review Letters*. – 2012. – V. 108. – I. 19. – P. 191802-1-191802-6. DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.191802.
10. **Yingwen, P.** Progress in the preparation and application of CsPbX₃ perovskites / P. Yingwen, Z. Yaofang, K. Weimin et al. // *Materials Advances*. – 2022. – V. 3. – I. 10. – P. 4053-4068 DOI: 10.1039/D2MA00100D.
11. **Shamsi, J.** Metal halide perovskite nanocrystals: synthesis, post-synthesis modifications, and their optical properties / J. Shamsi, A.S. Urban, M. Imran, D.L. Trizio, L. Manna // *Chemical Reviews*. – 2019. – V. 119. – I. 5. – P. 3296-3348. DOI: 10.1021/acs.chemrev.8b00644.
12. **Wang, K.** Efficient perovskite solar cells by hybrid perovskites incorporated with heterovalent neodymium cations / K. Wang, L.Y. Zheng, T. Zhu et al. // *Nano Energy*. – 2019. – V. 61. – P. 352-360. DOI: 10.1016/j.nanoen.2019.04.073.

References:

1. Zhou Y., Chen J., Bakr O.M., Sun H.-T. Metal-doped lead halide perovskites: synthesis, properties, and optoelectronic applications, *Chemistry of Materials*, 2018, vol. 30, issue 19, pp. 6589-6613. DOI: 10.1021/acs.chemmater.8b02989.
2. Zhang, Y., Sun, R., Ou, X. et al. Metal halide perovskite nanosheet for X-ray high-resolution scintillation imaging screens, *ACS Nano*, 2018, vol. 13, issue 2, pp. 2520-2525. DOI: 10.1021/acsnano.8b09484.
3. Parobek D., Roman B.J., Dong Y. et al. Exciton-to-dopant energy transfer in Mn-doped cesium lead halide perovskite nanocrystals, *Nano Letters*, 2016, vol. 16, issue 12, pp. 7376-7380. DOI: 10.1021/acs.nanolett.6b02772.
4. De La Rosa E., Salas P., Desirena H., Angeles C., Diaz-Torres L. A. Strong green upconversion emission in Nd³⁺-Yb³⁺ codoped ZrO₂ nanocrystals, *Applied Physics Letters*, 2005, vol. 87 issue 24, pp. 241912-1-241912-3. DOI: 10.1063/1.2142091.
5. Suzuki A., KamLAND Collaboration Results from KamLAND reactor neutrino detection, *Physica Scripta*, 2005, vol. 2005, no. T121, pp. 33-38. DOI: 10.1088/0031-8949/2005/T121/004.
6. Alimonti G., Arpesella C., Back H. et al. The Borexino detector at the Laboratori Nazionali del Gran Sasso, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2009, vol. 600, issue 3, pp. 568-593. DOI: 10.1016/j.nima.2008.11.076.
7. Abe Y., Aberle C., Akiri T. et al. Indication of reactor electron antineutrinos disappearance in the Double Chooz Experiment, *Physical Review Letters*, 2012, vol. 108, issue 13, pp. 131801-1-131801-7. DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.131801.
8. An F.P., Bai J.Z., Balantekin A.B. et al. Observation of electron-antineutrino disappearance at Daya Bay, *Physical Review Letters*, 2012, vol. 108, issue 17, pp. 171803-1-171803-7. DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.171803.
9. Ahn J.K., Chebotaryov S., Choi J.H. et al. Observation of reactor electron antineutrinos disappearance in the RENO experiment, *Physical Review Letters*, 2012, vol. 108, issue 19, p. 191802-1-191802-6. DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.191802.
10. Yingwen P., Yaofang Z., Weimin K. et al. Progress in the preparation and application of CsPbX₃ perovskites, *Materials Advances*, 2022, vol. 3, issue 10, pp. 4053-4068 DOI: 10.1039/D2MA00100D.
11. Shamsi J., Urban A.S., Imran M., Trizio D.L., Manna L. Metal halide perovskite nanocrystals: synthesis, post-synthesis modifications, and their optical properties, *Chemical Reviews*, 2019, vol. 119, issue 5, pp. 3296-3348. DOI: 10.1021/acs.chemrev.8b00644.
12. Wang K., Zheng L.Y., Zhu T. et al. Efficient perovskite solar cells by hybrid perovskites incorporated with heterovalent neodymium cations, *Nano Energy*, 2019, vol. 61, pp. 352-360. DOI: 10.1016/j.nanoen.2019.04.073.