18

Хиральные свойства квазидвумерных перовскитов на основе S-BPEA

© Ю.А. Тимкина, И.А. Алейник, М.Д. Мирущенко, А.П. Литвин, А.А. Ведерникова, Д.И. Клименко, И.Д. Скурлов

МНОЦ физики наноструктур, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

e-mail: ivan.skurlov.23@gmail.com

Поступила в редакцию 23.05.2025 г.
В окончательной редакции 16.02.2025 г.
Принята к публикации 02.03.2026 г.

Для успешного интегрирования технологий, основанных на использовании циркулярно-поляризованного излучения, требуются эффективные, миниатюрные и хорошо масштабируемые детекторы оптического излучения, чувствительные к свету с левой и правой круговой поляризацией. Ключевым аспектом развития фотодетекторов данного класса является разработка новых хиральных фотоактивных слоев. В настоящей работе представлен протокол синтеза нового оптически активного квазидвумерного органо-неорганического перовскита на основе хиральной молекулы S-(4-бромфенил)этиламина. В работе исследованы фотоэлектрические и хироптические свойства полученных квази-двумерных перовскитов, а также проведен анализ морфологии их поверхности. Показано, что наличие дополнительного атома брома в составе хиральной молекулы на порядок повышает фотопроводимость пленки на основе хирального перовскита, а формирование смешанного анионного состава в квазидвумерном перовските позволяет существенно повысить фактор диссимметрии поглощения, который достигает значения $3.3 \cdot 10^{-4}$.

Ключевые слова: перовскиты, хиральность, круговой дихроизм, тонкие пленки.

DOI: 10.61011/OS.2026.04.63025.8189-25

Введение

Детектирование циркулярно-поляризованного излучения (ЦПИ) является важной технологией, широко применяемой в спинтронике [1], медицинских технологиях, передаче и кодировании информации, создании оптических радаров [2,3], квантовой оптике и квантовых коммуникациях [4,5], а также магнитной записи информации [6]. Современные системы детектирования ЦПИ зачастую основаны на комплексах оптических элементов — четвертьволновых пластинах, поляризационных фильтрах и сложных интерференционных модулях, которые требуют точного позиционирования компонентов, не являются вибрационно устойчивыми, а также имеют большие габариты. Поэтому необходимо искать пути решения данной проблемы в виде разработки высокочувствительных модульных устройств, лишенных недостатков существующих решений.

Оптоэлектронные свойства наноматериалов со структурой перовскита делают их перспективным материалом для разработки устройств прямого детектирования света с левой (L) и правой (R) круговой поляризацией [7]. Квазидвумерные перовскиты являются наиболее подходящими материалами для создания таких устройств ввиду относительной простоты их получения (в том числе с возможностью масштабирования на большие площади) и наличием фотоотклика в широком оптическом диапазоне (от неглубокого УФ до ближнего ИК). Общая формула таких квази-2D-перовскитов выражается как $(A_1)_2(A_2)_{n-1}(Pb)_nX_{3n+1}$ или $(A_1)(A_2)_{n-1}Pb_nX_{3n+1}$, где A_1 — крупный одновалентный или двухвалентный катион, A_2 — одновалентный катион малого размера, а X — галоген. Число неорганических слоев, n, варьируется от 1 (чистая 2D-структура) до ∞ (3D-структура), при этом промежуточные значения ($n = 2-5$) соответствуют квазидвумерным (квази-2D) перовскитам [8]. Индуцирование хиральности в квази-2D-перовскитах обычно достигается путем использования молекул R-/S-метилбензиламина (R-/S-MBA) и/или (R/S) — (1-(1-нафтил)этиламина) ((R/S)-1-NEA) [9,10] в качестве катиона A_1, что позволяет достигнуть факторов диссимметрии поглощения (g_{abs}) свыше $4 \cdot 10^{-3}$. Однако использование больших хиральных катионов, которые располагаются между слоями галогенидно-свинцовых октаэдров, значительно снижает эффективность переноса заряда в пленке перовскита, что приводит к ухудшению эффективности детектирования излучения в конечном устройстве [11]. Поэтому разработка квази-2D перовскитов, сочетающих высокие факторы диссимметрии и эффективный транспорт носителей заряда, является актуальной научной задачей. Сообщалось, что введение в состав ахиральных квази-2D перовскитов катионов на основе 2-(4-бромфенил)этиламина (BPEA) улучшает стабильность и улучшает межслоевой перенос заряда за счет сопряженной структуры молекулы [12], также была продемонстрирована возможность создания хирального перовскита на основе данной молекулы [13]. Использование хиральных энантиомеров молекул с сопряженной структурой для формирования фотоактивного слоя селективных детекторов ЦПИ на основе

Таблица 1. Молярные соотношения MAI к хиральной соли и массы реактивов, используемых для синтеза

Молярное соотношение MAI к хиральной соли	MAI, mg	PbI_2, mg	Хиральные соли, mg	
			S-BPEABr	S-BPEAI
1 : 0	9.5	18.4	0.0	0.0
5 : 1	7.9		2.8	3.3
2 : 1	6.3		5.6	6.5
1 : 1	4.8		8.4	9.8
1 : 2	3.2		11.3	13.1
1 : 5	1.6		14.1	16.4
0 : 1	0.0		16.9	19.6

квази-2*D* перовскитов может улучшить эксплуатационные характеристики получаемых устройств. Для этого требуется разработка новых протоколов синтеза пленок квази-2*D*-перовскитов и исследование их оптических и морфологических свойств.

В настоящей работе представлен протокол формирования пленок квази-2*D*-перовскита на основе галогенидных солей молекулы 2-(4-бромфенил)этиламина (S-BPEAX, где X = Br, I). Показано, что присутствие дополнительного атома брома в молекуле S-BPEA по сравнению с референтной молекулой S-MBA оказывает существенное влияние на фотоэлектрические свойства пленок перовскитов. Продемонстрированы изменения в спектрах кругового дихроизма пленок перовскита от количества хирального катиона и типа галогена в соли хиральной молекулы (S-BPEAX), используемой для синтеза перовскита. Показано, что увеличение количества хирального катиона приводит к ухудшению морфологии поверхности пленки.

Методы

Синтез хиральных солей

1 mL S-BPEA или S-MBA были смешаны с 3 mL этанола. Затем полученные смеси были помещены на ледяную баню, и при энергичном перемешивании к ним по каплям добавлялась бромводородная кислота (HBr) в количестве, обеспечивающем молярное соотношение амина к кислоте 1 : 1. После добавления кислоты раствор перемешивался в течение 12 h. По истечению указанного времени раствор был выпарен при температуре 80–100 °C до получения желтых кристаллов. Полученные кристаллы были промыты 3–5 раз диэтиловым эфиром до обесцвечивания кристаллов, а затем смесь была высушена методом лиофильной сушки (BK-FD10P, BIOBASE, КНР) в течение 12 h.

Формирование квази-2*D*-пленок хиральных перовскитов

Йодид метиламмония (MAI), хиральная соль брома или йода и PbI_2 смешивались со 150 μL диметилсульфоксида (ДМСО; расчет количества производится исходя из 1 M концентрации PbI_2 в ДМСО) в молярном соотношении катиона A к катиону B, равном 3 : 2, и перемешивались в течение часа при температуре 60 °C. Затем раствор фильтровался через гидрофобный фильтр из политетрафторэтилена (PTFE) с размерами пор 0.22 μm. Перовскиты на основе BPEAX также были синтезированы с различными соотношениями MAI/BPEAX, соотношения прекурсоров, используемых в различных синтезах, представлены в табл. 1. Исходя из стехиометрического соотношения прекурсоров, предполагаемая химическая формула получаемого перовскита A_2PbX_7 (A — MAI/S-BPEAI или MAI/S-BPEABr, X — I или Br).

Пленки перовскита формировались с помощью метода нанесения на вращающуюся подложку (spin-coating). На предварительно очищенную стеклянную подложку наносилось 50 μL отфильтрованного через PTFE-фильтр (размер пор 0.45 μL) раствора, после чего подложка раскручивалась на скорости 5000 RPM в течение 40 s с ускорением 1000 $RP(S)^2$. На 15-й секунде центрифугирования на подложку быстро вводилось 150 μL хлорбензола, выступающего в качестве антирастворителя. Затем подложки отжигались в течение 10 min при температуре 100 °C.

Характеризация пленок

Измерения спектров кругового дихроизма (КД) производились с помощью спектрофотометра J-1500 (Jasco, Япония). Фактор диссимметрии поглощения g_{abs} оценивался по формуле (1) [14]:

$$g_{\text{abs}} = \frac{D_L - D_R}{D} = \frac{\theta[\text{mdeg}]}{32980D}, \qquad (1)$$

где θ [mdeg] — интенсивность сигнала КД, D_L и D_R — оптическая плотность соответственно при левой и правой круговой поляризации падающего излучения, D — оптическая плотность для неполяризованного света.

Морфология поверхности пленок была исследована на атомно-силовом микроскопе (АСМ) Solver-Pro M (NT-MDT, Россия).

Исследование фотопроводимости

Для исследования фотопроводимости хиральных квази-2*D*-перовскитов была использована планарная архитектура ITO/перовскит/Ag. В качестве подложки применялось стекло с прозрачным проводящим слоем ITO, на который наносился слой хирального перовскита. На поверхность активного слоя методом термического

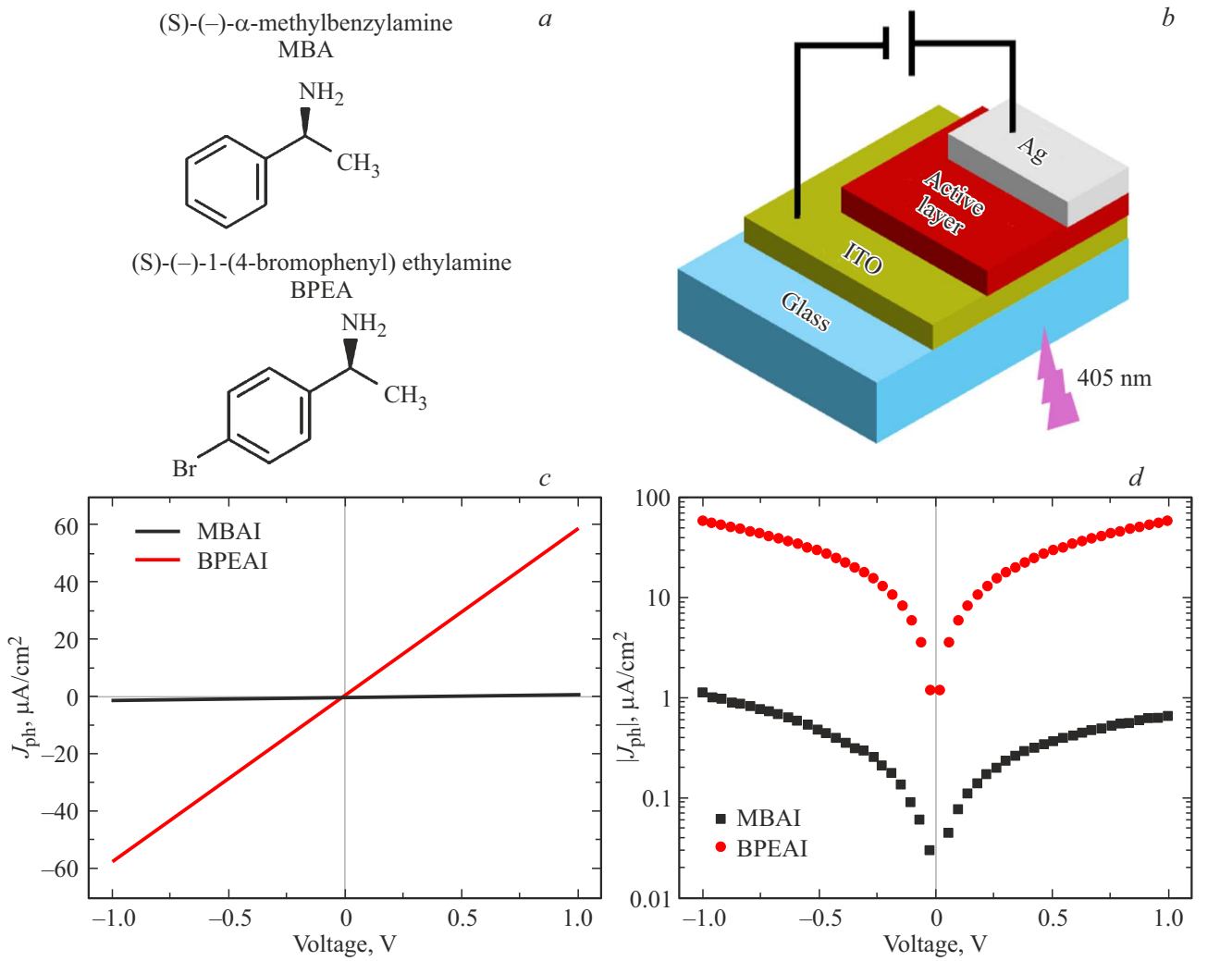


Рис. 1. Структурные формулы молекул S-MBA и S-BPEA (*a*); архитектура устройства для измерения фотопроводимости (*b*); зависимости плотности фототока J_{ph} перовскитных пленок на основе S-MBAI (черный) и S-BPEAI (красный) в линейном (*c*) и логарифмическом (*d*) масштабах.

вакуумного напыления были нанесены серебряные электроды толщиной 100 nm.

Фототоки были зарегистрированы при освещении лазером с длиной волны 405 nm и плотностью мощности 14 μW/cm^2. Измерения светового и темнового тока выполнялись с помощью пикоамперметра (2636B, Keithley, США) при изменении напряжения смещения в диапазоне от -1 до $+1$ V. Плотность фототока определялась по формуле (2)

$$J_{ph} = \frac{I_{light} - I_{dark}}{S}, \qquad (2)$$

где I_{light} — ток, измеренный при лазерной засветке, I_{dark} — темновой ток, S — площадь фотоактивной площадки (0.33 cm^2). Удельная фотопроводимость слоя (σ_{ph}) и вертикальная удельная проводимость слоя (σ^d_{ph}) вычислялись по формулам (3) и (4) соответственно

$$\sigma_{ph} = \frac{I_{light} - I_{dark}}{S \cdot V}, \qquad (3)$$

$$\sigma^d_{ph} = \frac{(I_{light} - I_{dark})d}{SV}, \qquad (4)$$

где V — напряжение смещения, d — толщина слоя.

Результаты

Для установления влияния дополнительного атома брома в хиральной молекуле (структуры соответствующих молекул показаны на рис. 1, *a*) на проводимость полученных квази-2*D* перовскитов были сформированы планарные структуры для измерения вертикальной фотопроводимости (рис. 1, *b*). На рис. 1, *c,d* представлены зависимости плотности фототока J_{ph} от приложенного напряжения V для хиральных квази-2*D*-перовскитных структур, содержащих хиральные катионы BPEAI (красные линии) и MBAI (черные линии). Молекула MBA была выбрана в качестве референтного образца ввиду ее идентичности с молекулой BPEA, за исключением

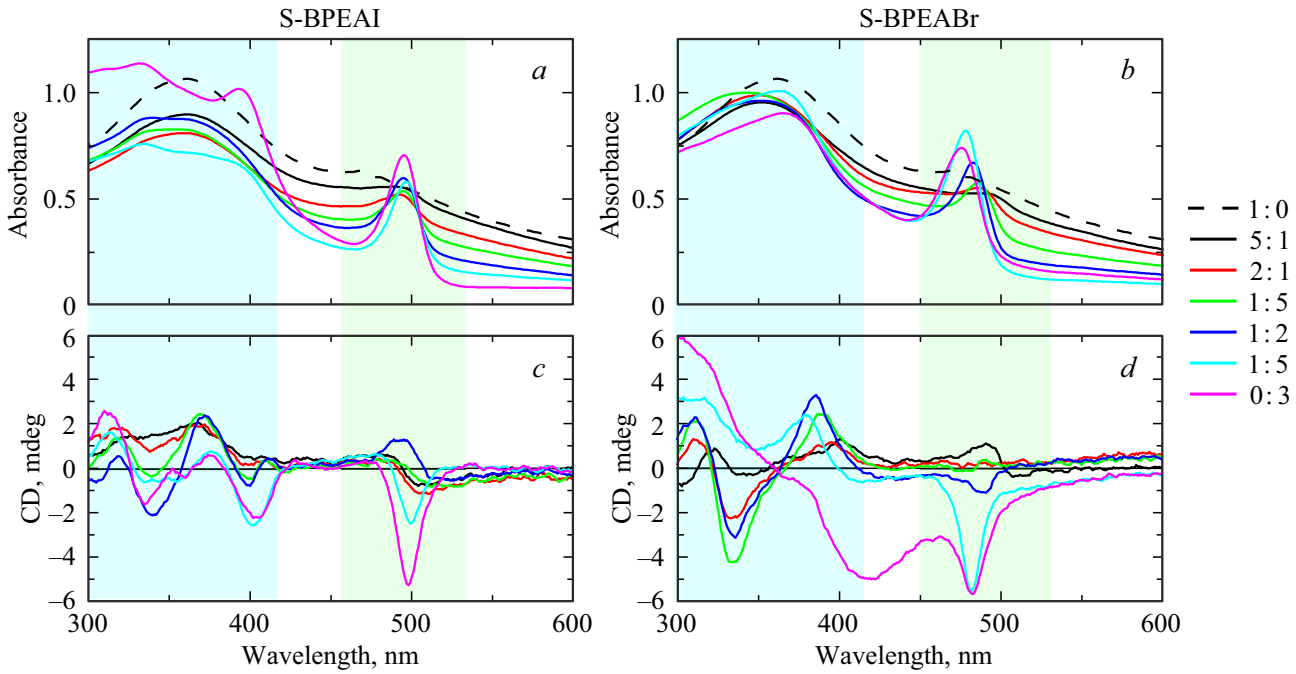


Рис. 2. Спектры оптической плотности (*a,b*) и кругового дихроизма (*c,d*) перовскитов S-BPEAI (*a,c*) и S-BPEABr (*b,d*) с различным молярным отношением хирального и ахирального катиона.

замещения одного атома водорода на атом брома в бензольном кольце с сохранением их хироптических характеристик.

Для структуры на основе BPEAI при приложении напряжения от -1 до $+1$ V плотность тока линейно изменяется от -57.3 до $58.5\,\mu$A/cm^2. Также форма вольтамперной характеристики симметрична относительно нулевого напряжения смещения, что является признаком симметричной проводимости. Для структуры на основе MBAI при аналогичном процессе измерения регистрируемые токи на два порядка ниже: от -1.1 до $1\,\mu$A/cm^2. Отдельно стоит отметить, что при использовании MBAI зависимость не является симметричной (рис. 1, *d*), с повышенным током при отрицательном напряжении смещения. Удельная фотопроводимость составила $8.8 \cdot 10^{-5}$ S/cm^2 для BPEAI и $8.6 \cdot 10^{-7}$ S/cm^2 для MBAI. Более информативной величиной для сравнения двух материалов является вертикальная удельная фотопроводимость (σ_{ph}), позволяющая учесть толщину слоя. Толщины слоя составили 52 nm и 100 nm для образцов с BPEAI и MBAI соответственно. Для структуры, содержащей BPEAI, σ_{ph} составила $(300 \pm 3) \cdot 10^{-12}$ S/cm, тогда как для образца с MBAI — $(8.6 \pm 1.6) \cdot 10^{-12}$ S/cm. Из полученных значений следует, что наличие дополнительного атома брома в структуре молекулы улучшает фотопроводимость хирального квази-2*D*-перовскита на ее основе, что может быть следствием повышения концентрации носителей заряда или повышению подвижности носителей заряда.

Для создания эффективных устройств с селективным откликом на ЦПИ также необходимо достижение максимальных значений фактора диссимметрии поглощения материала, а также установление влияния отношения хирального/ахирального катиона на величину фактора диссимметрии. Дополнительно необходимо изучить возможность смещения положения полос поглощения, в которых наблюдается круговой дихроизм. Для этого были созданы образцы квази-2*D*-перовскитов с различными отношениями хиральных и ахиральных катионов (табл. 1). Вместо хиральной соли S-BPEAI была также использована S-BPEABr для реализации частичного замещения йода на бром в кристаллической решетке перовскита [15]. При этом молярное отношение органических прекурсоров (суммарно MAI и S-BPEAX) к PbI_2 оставалось неизменным. В дальнейшем в данной работе будет рассматриваться только изменение молярного отношения MAI к S-BPEAX.

Для пленок, полученных с использованием различных молярных соотношений хиральных и ахиральных прекурсоров (MAI/S-BPEAX), были измерены спектры поглощения и КД (рис. 2). Сигналы КД в поглощении данных пленок можно разделить на две группы: одна в диапазоне 300–450 nm, вторая в диапазоне 480–500 nm. Сигналы КД в диапазоне длин волн 300–450 nm возникают по ряду различных причин, из которых основные — взаимодействие матрицы перовскита с молекулой и структурные деформации пленки [16] (что подтверждается результатом анализа морфологии поверхности

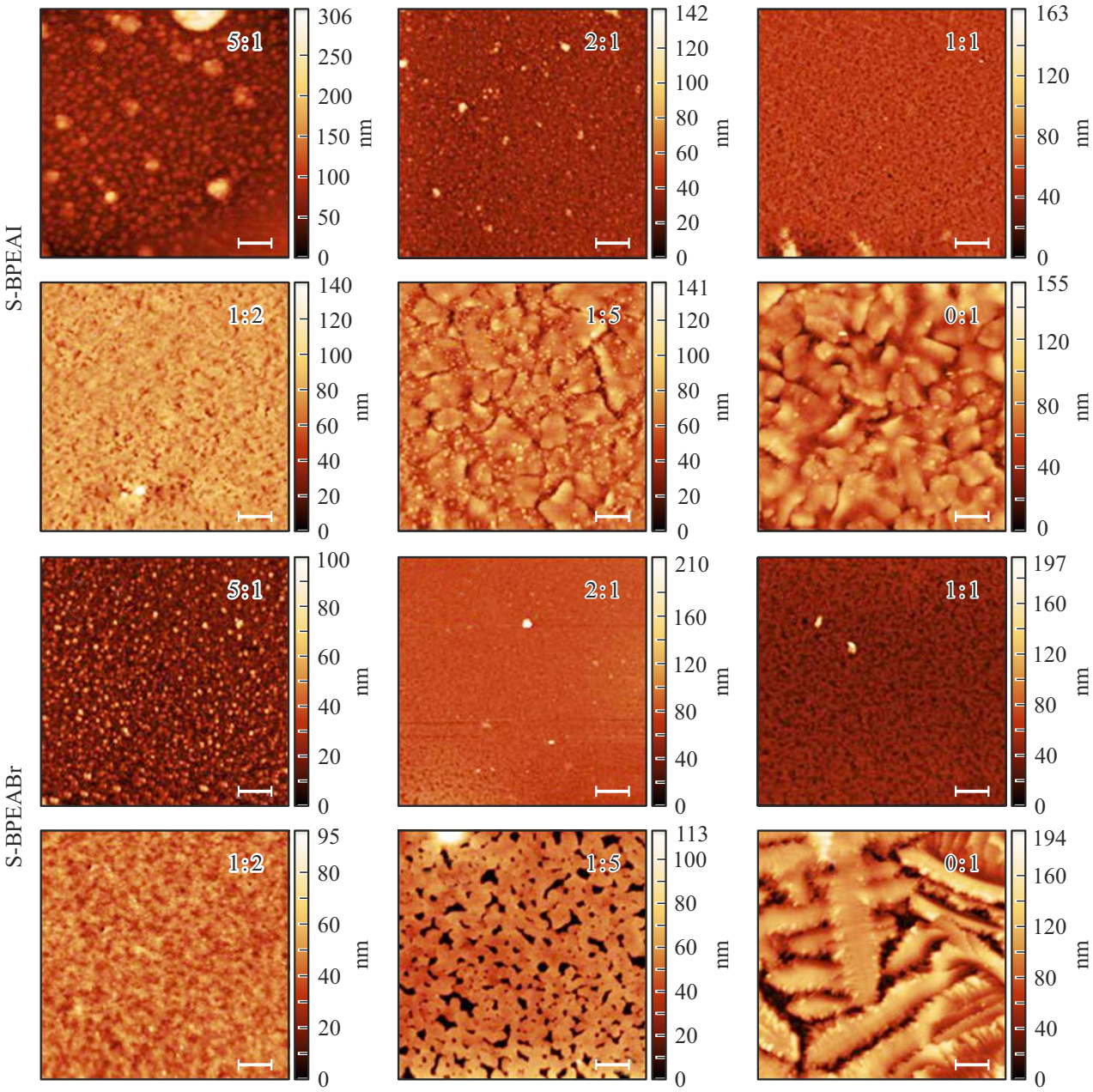


Рис. 3. АСМ-изображения поверхности квази-2*D*-перовскитов, полученных при различных соотношениях ахиральных и хиральных прекурсоров MAI/S-BPEAX. Размер метки 2 μm.

далее). Детальный анализ КД данной области выходит за рамки настоящей работы.

В диапазоне 480–500 nm в спектре поглощения наблюдается переход, возникающий ввиду эффекта квантового ограничения в квазидвумерных перовскитах [17,18]. При использования BPEAI не наблюдается значительного изменения положения полос поглощения и КД, а в случае добавления соли BPEABr наблюдается последовательный синий сдвиг данной полосы поглощения с 493 nm до 475 nm, что связано с появлением и постепенным увеличением количества ионов брома в анионной подструктуре перовскита, которое приводит к увеличению ширины запрещенной зоны материала [19]. В данном диапазоне наблюдается увеличение факторов диссимметрии поглощения с повышением содержания хиральной соли, добавляемой при синтезе (табл. 2). Кроме того, дополнительное внедрение ионов брома приводит к увеличению фактора диссимметрии поглощения ($2.2 \cdot 10^{-4}$ для BPEAI по сравнению с $3.3 \cdot 10^{-4}$ для BPEABr, что сопоставимо с данными, представленными в литературе для схожих материалов [20]). Стоит также отметить, что при использовании соли S-BPEABr наблюдается смена знака фактора диссимметрии при изменении соотношения хиральных и ахиральных ка-

Таблица 2. Коэффициенты диссимметрии поглощения и шероховатости поверхности пленок при разных молярных соотношениях хиральных и ахиральных катионов

Молярное соотношение MAI/S-BPEAX	Коэффициенты диссимметрии, 10^{-4}		Шероховатость поверхности, nm	
	S-BPEABr	S-BPEAI	S-BPEABr	S-BPEAI
1:0	–	–	29 ± 3	
5:1	-0.21 ± 0.05	0.45 ± 0.05	10 ± 2	16 ± 3
2:1	~ 0	0.85 ± 0.05	6 ± 2	8 ± 2
1:1	~ 0	0.78 ± 0.05	7 ± 2	14 ± 2
1:2	0.78 ± 0.05	0.81 ± 0.05	15 ± 3	11 ± 2
1:5	2.3 ± 0.1	1.1 ± 0.1	20 ± 3	14 ± 3
0:1	3.3 ± 0.1	2.2 ± 0.1	25 ± 3	15 ± 3

тионов. Для соотношения 5:1 знак отрицательный, что свидетельствует о большей чувствительности к *R*-поляризации, для концентраций 2:1 и 1:1 колеблется около нуля, а при 1:2 и выше становится положительным. Подобная смена знака фактора диссимметрии в зависимости от концентрации хирального катиона уже отмечалась для двумерных перовскитов и может быть связана с изменением процесса кристаллизации ввиду различной взаимной ориентации хиральных молекул в зависимости от их концентрации [21].

Для использования пленки хирального квазидвумерного перовскита в качестве активного слоя фотодетектора ЦПИ требуется высокая степень равномерности ее поверхности [22]. Как видно из АСМ-изображений, показанных на рис. 3, а также из табл. 2, морфологические характеристики исследованных образцов сильно зависят от соотношения MAI/S-BPEAX Значительный перевес молярного соотношения как в сторону MAI, так и в сторону S-BPEAX приводит к ухудшению морфологии поверхности. Наиболее однородные пленки получаются при соотношении прекурсоров 2:1, а соответствующие значения шероховатости поверхности составляют 6 ± 2 nm для S-BPEABr и 8 ± 2 nm для S-BPEAI. При увеличении количества хиральной соли сначала наблюдается появление мелкозернистой структуры, а затем к появление крупных кристаллитов (до 2μm) для S-BPEAI или формирование крупнозернистой структуры с выраженными гребнями и значительными перепадами высот для S-BPEABr, что свидетельствует о радикальном изменении механизма кристаллизации при высоких концентрациях хиральных солей. Вероятно, данные структурные изменения, происходящие при внедрении избыточного количества хирального катиона, и приводят к качественным изменениям в спектрах кругового дихроизма, показанных на рис. 2, *d*. Для формирования устройств на основе данного материала оптимальным вариантом является использование отношения 2:1 с использованием S-BPEAI, при котором получается минимальная шероховатость $(8 \pm 2$ nm), а также имеется наличие хироптического отклика, что отражается в значении фактора диссимметрии поглощения $0.85 \cdot 10^{-4}$. Стоит также отметить, что все образцы хиральных квази-2*D*-перовскитов, тем не менее, обладают меньшей шероховатостью по сравнению с референтным образцом, полученным без добавления хирального катиона.

Заключение

В данной работе представлены синтез и характеризация квазидвумерных перовскитов с различными соотношениями ахирального катиона MAI и хирального катиона S-BPEAI или S-BPEABr. Перовскиты, созданные с применением S-BPEAI/Br, обладают сигналом кругового дихроизма поглощения в двух диапазонах длин волн 480–500 и 300–450 nm. Наличие дополнительного атома брома в структуре молекулы S-BPEA (в сравнении с референтной S-MBA) приводит к увеличению фотопроводимости пленки на порядок, при этом факторы диссимметрии поглощения сохраняют величину, сопоставимую с литературными данными для подобных материалов. Величины фактора диссимметрии в полосе 480–500 nm при минимальной шероховатости поверхности пленки составляют $2.2 \cdot 10^{-4}$ для MAI/S-BPEAI и $3.3 \cdot 10^{-4}$ для MAI/S-BPEABr. Последующее увеличение содержания хирального катиона приводит к повышению фактора диссимметрии поглощения, но сопровождается ухудшением морфологии поверхности пленок.

Финансирование работы

Работа была выполнена при поддержке Университета ИТМО, программа поддержки НИР магистров и аспирантов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют о том, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Q. Wie, Z. Ning, ACS Mater. Lett., **3** (9), 1266–1275 (2021). DOI: 10.1021/acsmaterialslett.1c00274
[2] W. Yang, J. Yang, K. Zhao, Q. Gao, L. Liu, Z. Zhou, S. Hou, X. Wang, G. Shen, X. Pang et al. Adv. Sci., **8** (14), 2100075 (2021). DOI: /10.1002/advs.202100075
[3] X. Wang, F. Zhong, J. Kang, C. Liu, M. Lei, L. Pan, H. Wang, F. Wang, Z. Zhou, Y. Cui et al. Sci. China Mater., **64** (5), 1230-1237 (2021). DOI: 10.1007/s40843-020-1535-9
[4] J.F. Sherson, H. Krauter, R.K. Olsson, B. Julsgaard, K. Hammerer, I. Cirac, E.S. Polzik. Nature, **443** (7111), 557–560 (2006). DOI: 10.1038/nature05136

[5] N. Gisin, R. Thew. Nat. Photonics, **1** (3), 165–171 (2007). DOI: 10.1038/nphoton.2007.22
[6] Y. Imai. ChemPhotoChem, **5** (11), 969–973 (2021). DOI: 10.1002/cptc.202100142
[7] Z. Cao, F. Hu, C. Zhang, S. Zhu, M. Xiao, X. Wang. Adv. Photonics, **2** (05), 054001 (2020). DOI: 10.1117/1.AP.2.5.054001
[8] Q. Cao, P. Li, W. Chen, S. Zang, L. Han, Y. Zhang, Y. Song. Nano Today, **43**, 101394 (2022). DOI: 10.1016/j.nantod.2022.101394
[9] S. Yang, G. Jang, C. U. Lee, J. Son, J. Lee, W. Jeong, D.G. Roe, J.H. Cho, J. Moon. Adv. Funct. Mater., **34** (19), 2310917 (2024). DOI: 10.1002/adfm.202310917
[10] X. Zhang, X. Liu, L. Li, C. Ji, Y. Yao, J. Luo. ACS Cent. Sci., **7** (7), 1261–1268 (2021). DOI: 10.1021/ acscentsci.1c00649
[11] L. Gao, F. Zhang, C. Xiao, X. Chen, B.W. Larson, J.J. Berry, K. Zhu. Adv. Funct. Mater., **29** (47), 1901652 (2019). DOI: 10.1002/adfm.201901652
[12] X. Gan, W. Zhao, T. Xu, Y. Liang, L. Guo, H. Liu. J. Mater. Sci., **56** (30), 17167–17177 (2021). DOI: 10.1007/s10853-021-06330-1
[13] Y. Qin, F.-F. Gao, S. Qian, T.-M. Guo, Y.-J. Gong, Z.-G. Li, G.-D. Su, Y. Gao, W. Li, C. Jiang et al. ACS Nano, **16** (2), 3221–3230 (2022). DOI: 10.1021/acsnano.1c11101
[14] N. Berova, K. Nakanishi, R.W. Woody. *Circular Dichroism: Principles and Applications,* 2nd ed. (Wiley-VCH Verlag, 2000).
[15] Y.A. Timkina, I.D. Skurlov, D.A. Tatarinov, E.A. Batueva, A.O. Ismagilov, N.K. Kuzmenko, A.V. Koroleva, E.V. Zhizhin, J. Xie, H. Huang et al. J. Lumin., **275**, 120817 (2024). DOI: 10.1016/j.jlumin.2024.120817
[16] H. Lu, C. Xiao, R. Song, T. Li, A.E. Maughan, A. Levin, R. Brunecky, J.J. Berry, D.B. Mitzi, V. Blum et al. J. Am. Chem. Soc., **142** (30), 13030–13040 (2020). DOI: 10.1021/jacs.0c03899
[17] A. Shpatz Dayan, M. Wierzbowska, L. Etgar. Small Struct., **3** (8), 2200051 (2022). DOI: 10.1002/sstr.202200051
[18] H. Lu, J. Wang, C. Xiao, X. Pan, X. Chen, R. Brunecky, J.J. Berry, K. Zhu, M.C. Beard, Z.V. Vardeny. Sci. Adv., **5** (12), eaay0571 (2019). DOI: 10.1126/sciadv.aay0571
[19] S.A. Kulkarni, T. Baikie, P. P. Boix, N. Yantara, N. Mathews, S. Mhaisalkar. J. Mater. Chem. A, **2** (24), 9221–9225 (2014). DOI: 10.1039/C4TA00435C
[20] S. Liu, M. Kepenekian, S. Bodnar, S. Feldmann, M.W. Heindl, N. Fehn, J. Zerhoch, A. Shcherbakov, A. Pöthig, Y. Li et al. Sci. Adv., **9** (35), eadh5083 (2023). DOI: 10.1126/sciadv.adh5083
[21] M. Taddei, J. Zhang, M.A. Haque, C. McLeod, S.P. Harvey, Y. Dong, L.T. Schelhas, S. Barlow, J.L. Blackburn, J.M. Luther et al. J. Am. Chem. Soc., **147** (40), 36642–36649 (2025). DOI: 10.1021/jacs.5c11860
[22] C.M.M. Soe, W. Nie, C.C. Stoumpos, H. Tsai, J. Blancon, F. Liu, J. Even, T.J. Marks, A.D. Mohite, M.G. Kanatzidis. Adv. Energy Mater., **8** (1), 1700979 (2018). DOI: 10.1002/aenm.201700979