Письма в ЖЭТФ, том 124, вып. 7, с. 552 – 556 © 2026 г. 10 октября

Одномерные экситоны на границе монослоя и гетеробислоя дихалькогенидов переходных металлов

А. С. Бричкин, Г. М. Голышков, В. Е. Бисти[1)]

Институт физики твердого тела им. Ю. А. Осипьяна РАН, 142432 Черноголовка, Россия

Поступила в редакцию 13 июля 2026 г.
После переработки 1 сентября 2026 г.
Принята к публикации 4 сентября 2026 г.

В спектре фотолюминесценции в гетероструктурах на основе $WSe_2/MoSe_2$ (нижний слой $MoSe_2$), инкапсулированных гексагональным нитридом бора hBN, на границе монослоя WSe_2 и гетеробислоя обнаружена новая линия, расположенная по энергии выше, чем линия межслоевого экситона, и ниже, чем линия экситона в монослое $MoSe_2$. Линия интерпретируется как линия латерального интерфейсного экситона – одномерного экситона с пространственно разделенными электроном и дыркой, находящимися по разные стороны от границы в разных монослоях. Необходимым условием наблюдения является минимальный угол относительного поворота слоев WSe_2 и $MoSe_2$, образующих бислой.

DOI: 10.7868/S3034576626100070

Новый класс двумерных структур, привлекающий внимание в последнее время и активно обсуждающийся в литературе, это латеральные гетероструктуры, в которых различные монослои дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ) стыкуются в плоскости, формируя одномерную границу [1–4]. Эти структуры обычно выращиваются методом химического осаждения из газовой фазы (CVD) в форме треугольных островков монослоев одного материала в матрице из другого материала. Этим методом получены гетероструктуры с шириной перехода до 2–3 нм.

Теоретически и экспериментально изучается возможность существования и особенности латеральных интерфейсных экситонов (LIX) – одномерных экситонов с пространственно разделенными электроном и дыркой (их еще называют экситонами переноса заряда) на латеральных гетеропереходах двух различных монослоев ДПМ [5–11, 14–17].

LIX-экситон на границе раздела монослоев ДПМ, образующих латеральный гетеропереход типа II рассматривался теоретически в работе [5]. Было получено, что одномерный экситон имеет энергию связи не намного меньше, а его эффективный радиус значительно больше, чем у двумерных экситонов в монослоях ДПМ. Энергия связи, радиус и время жизни экситона сильно зависят от смещения зон в гетеропереходе. Влияние инкапсулирующих слоев не рассматривалось, для вычислений использовались приближение Борна–Оппенгеймера и расчеты в приближении сильной связи.

Экспериментальные исследования методом фотолюминесценции (ФЛ) и теоретические расчеты для латеральных гетероструктур $MoSe_2/WSe_2$, созданных методом CVD и инкапсулированных гексагональным нитридом бора hBN, проводились в работах [6–11]. LIX-экситоны демонстрируют энергии связи в несколько десятков мэВ, большое время жизни и большие дипольные моменты в плоскости. Теоретические и экспериментальные результаты для гетеропереходов шириной в 2–3 нм [6, 7] согласуются, что свидетельствует в пользу существования LIX-экситонов. Также при исследовании латеральных гетероструктур $MoSe_2$–WSe_2 с резкими и диффузными границами в работе [8] при регистрации ФЛ из области резкой границы наблюдалась линия, интерпретируемая как линия LIX. Однако эта линия расположена всего на 46 мэВ ниже линии X внутрислоевого экситона в $MoSe_2$, в то время как в работах [6, 7] линии ФЛ, ассоциируемые с латеральными интерфейсными экситонами, отстоят от линии X на 80–100 мэВ.

В работе [9] теоретически исследовался дрейф экситонов через границу раздела и их эффективный захват в LIX-экситоны, локализованные на этой границе. В работах [10, 11] методом ФЛ определялась эффективная длина диффузии экситонов в обоих материалах, показано, что латеральная гетероструктура с атомно-резкой границей раздела преобразует изотропную диффузию экситонов в однонаправленный поток через эту границу. В работах [12, 13] теорети-

[1)]e-mail: bisti@issp.ac.ru

чески изучалась диффузия экситонов в латеральных гетероструктурах с участием фононов.

Экспериментальные исследования ФЛ и расчеты DFT [14] для латеральных гетеропереходов $WSe_2/WS_{2(1-x)}Se_{2x}$ также показали возникновение 1D экситонов на атомарно резкой границе раздела между монослойными полупроводниками.

В теоретических работах [15, 16] уделяется внимание тонкой структуре LIX-экситонов. Рассматривается влияние долинного смешивания и дальнодействующего обменного взаимодействия, приводящее к анизотропии g-фактора электронов. Изучались причины линейной поляризации люминесценции интерфейсных экситонов. Теоретическое исследование [17] энергии связи и перекрытия волновых функций электрона и дырки для LIX-экситонов показало, что образование экситонов, локализованных на границе раздела, энергетически выгодно лишь при малой толщине этой границы и/или в системах с сильным диэлектрическим экранированием со стороны материалов, окружающих монослой.

Теория LIX-экситонов бурно развивается, однако эксперименты по наблюдению LIX-экситонов проводились только в латеральных гетероструктурах, выращенных методом CVD и затем инкапсулированных hBN. Латеральные гетероструктуры $MoSe_2/WSe_2$ за счет почти совпадающих периодов решеток обеспечивают высокое качество интерфейса, что подтверждено электронной микроскопией, в то время как инкапсулирование hBN обеспечивает защиту образцов и устойчивость данных по люминесценции. Однако метод CVD – довольно сложная и дорогостоящая процедура, требующая специального оборудования. Кроме того, стоит отметить, что структуры на основе монослоев и бислоев, в том числе и гетеробислоев ДПМ, изготовленные более простым и доступным методом механической эксфолиации, превосходят по качеству аналогичные структуры, выращенные методом CVD [18].

В данной работе изучался новый тип латеральных гетероструктур – гетероструктуры, изготовленные методом эксфолиации и последовательного наложения монослоев ДПМ $MoSe_2$ и WSe_2, частично перекрывающих друг друга, на подложку hBN и покрытых затем тонким слоем hBN. При наличии резкой границы монослоя WSe_2 и бислоя $WSe_2/MoSe_2$ должны наблюдаться одномерные экситоны с пространственно разделенными в плоскости электроном и дыркой, аналогично LIX-экситонам в латеральных CVD-гетероструктурах. Исследуемые структуры были изготовлены авторами методом механической эксфолиации и последовательной сборки структуры [19, 20]. Монослои $MoSe_2$ и WSe_2, изготовленные на промежуточной подложке полидиметилсилоксана, поочередно накладывались на нижний, относительно толстый (100 нм) слой hBN, который предварительно наносился на подложку Si/SiO_2 и затем накрывались верхним, относительно тонким (10 нм) слоем hBN. Таким образом, за счет частичного перекрывания слоев ДПМ собранная hBN-инкапсулированная структура представляла собой области гетеробислоя $WSe_2/MoSe_2$ и прилегающих к гетеробислою монослоев $MoSe_2$ и WSe_2. Данная методика позволила изготавливать образцы достаточно большого размера в плоскости структуры (100 мкм). Структуры просты в изготовлении и удобны для изучения.

Исследование гетероструктур производилось с помощью метода микрофотолюминесценции. Возбуждение осуществлялось непрерывным одномодовым лазером с длиной волны $\lambda = 532$ нм. Важным условием наблюдения линии LIX была "острая" фокусировка лазерного излучения в пятно на образце диаметром 2 мкм. Для наблюдения выбирались области образца на интерфейсе монослоя и бислоя (точка 2 на рис. 1). Размер исследуемой области образца 2 мкм позволял одновременно наблюдать ФЛ одномерных интерфейсных экситонов LIX, межслоевых экситонов IX и внутрислоевых экситонов X($MoSe_2$).

Наблюдаемая методом ФЛ новая линия 1.52 эВ из области гетероперехода совпадает по энергии с энергиями LIX из работ [6, 7]. Было исследовано несколько образцов с разными углами θ поворота между монослоями $MoSe_2$ и WSe_2. Для $S1$ $\theta = 1.5°$, для $S2$ $\theta = 5°$, для остальных образцов $\theta \geq 5°$.

Из спектров ФЛ для образца $S1$ на рис. 2 видно, что для позиции $S1(1)$ наблюдаются 2 линии внутрислоевых переходов $MoSe_2$ (экситон X и экситон, взаимодействующий с морем электронов X^- (фермиполярон) и довольно широкая линия межслоевого экситона IX. Для интерфейсной позиции $S1(2)$ линия IX практически не изменяется, линии X и X^- почти исчезли, но появилась узкая линия с энергией 1.52 эВ. Наблюдаемая методом ФЛ новая линия 1.52 эВ из области гетероперехода расположена на 120 мэВ эВ ниже линии X (1.64 эВ) и совпадает по энергии с линиями LIX из работ [6, 7]. В работе [6] линия, ассоциируемая с латеральными интерфейсными экситонами, отстоит от линии X на 88 мэВ (расчет) и 80–100 мэВ (ФЛ для разных образцов), абсолютное значение не приводится. Линия LIX из работы [7] имеет энергию 1.53 мэВ и ниже линии X на 100 мэВ. Результаты [6, 7] вполне согласуются с нашими результатами. Ширина наблюдаемой ли-

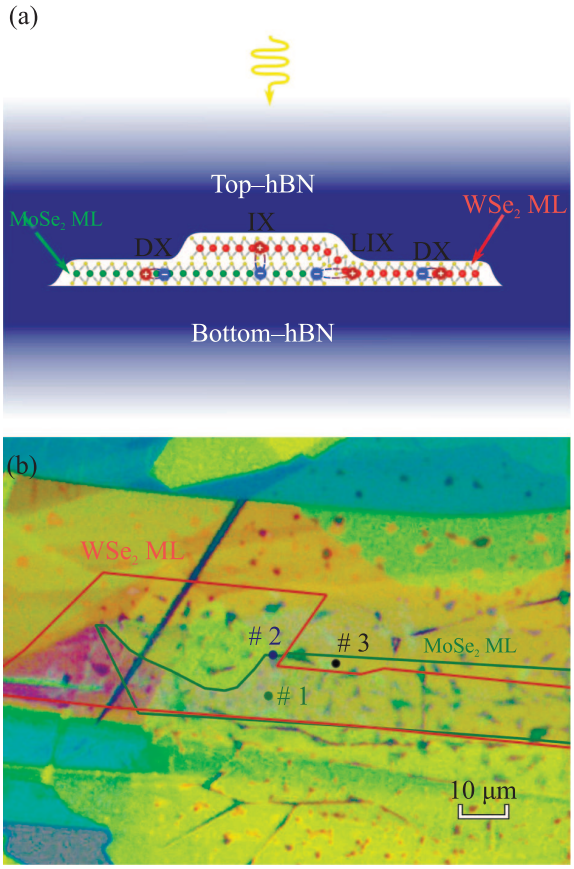

Рис. 1. (Цветной онлайн) (a) – Схема исследуемой структуры. Левый слой, переходящий в нижний, – $MoSe_2$. Верхний слой, переходящий в правый, – WSe_2. Средняя часть – гетеробислой. Показаны экситоны: межслоевой IX, интерфейсный LIX, внутрислоевые X_{MoSe_2} и X_{WSe_2}. (b) – Фотография образца S1. Контурами показаны границы монослоев $MoSe_2$ и WSe_2. Отмечены и пронумерованы позиции, выбранные для наблюдения. 1 соответствует гетеробислою, 2 – латеральному интерфейсу, 3 – монослою $MoSe_2$

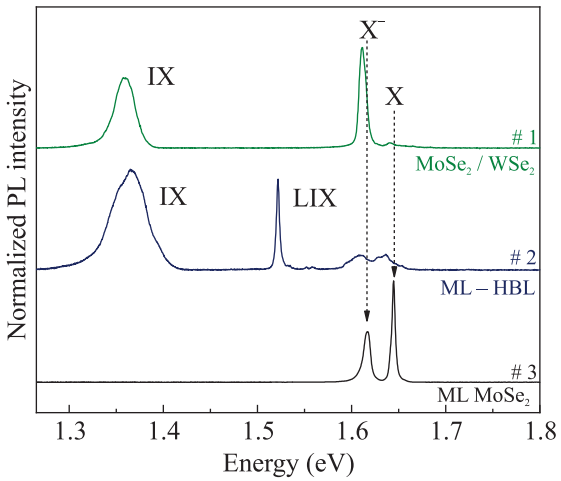

Рис. 2. (Цветной онлайн) Спектры фотолюминесценции для разных позиций образца $S1$. 1 – гетеробислой, 2 – латеральный интерфейс, 3 – монослой $MoSe_2$

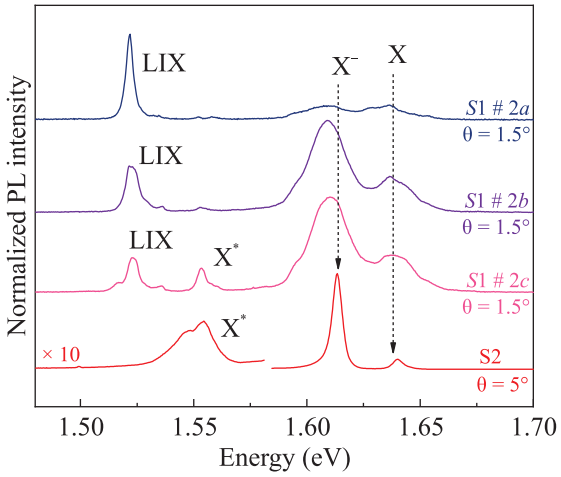

Рис. 3. (Цветной онлайн) Спектры фотолюминесценции с нескольких интерфейсных позиций образца $S1$ $(2a, 2b, 2c)$ и одной интерфейсной позиции образца $S2$. $S1(2a)$ – это позиция $S1(2)$ на рис. 1

нии около 3 мэВ, что заметно уже, чем для наблюдаемых в латеральных CVD-гетероструктурах линий шириной 15–20 мэВ [6, 7]. Авторы интерпретируют ее как линию LIX – одномерных экситонов, образующихся на границе гетеробислоя $WSe_2/MoSe_2$ и монослоя WSe_2 (рис. 1). Возможно, одномерный экситон с пространственно разделенными зарядами дополнительно локализован на неоднородностях вдоль интерфейса. Спектры с позиции монослоя $MoSe_2$ (позиция $S1(3)$) предсказуемо содержат линии X и X^-.

На рисунке 3 представлены спектры ФЛ для нескольких интерфейсных позиций образца $S1$ $(2a, 2b, 2c)$ и одной интерфейсной позиции образца $S2$. $S1(2a)$– это позиция $S1(2)$ на рис. 1, где лучше всего наблюдается LIX-экситон. Позиции $S1(2b)$ и $S1(2c)$ расположены на интерфейсе на расстоянии 2–3 мкм справа и слева от позиции $S1(2)$. Это разные позиции на образце, но масштаб рис. 1 не позволяет их отобразить. Наблюдается зависимость интенсивности и ширины линии LIX от выбранной позиции на интерфейсе, от очень узкой и доминирующей в спектре до более слабой, что можно объяснить разным качеством интерфейса вдоль границы, ширина линии LIX меняется от 3 до 10 мэВ. Ослабление линии LIX сопровождается ростом интенсивности линий X и X^- (внутрислоевые экситон и "трион" (ферми-полярон)) в $MoSe_2$. Кроме того, ослабление линии LIX сопровождается появлением новой линии X* с энергией 1.56 мэВ со стороны больших

энергий относительно LIX. Для образца $S2$ с углом рассогласования $\theta = 5°$ линия LIX не наблюдается. Наблюдается только очень слабая линия X*. Эту линию можно объяснить локализованным состоянием обычного внутрислоевого экситона $MoSe_2$ на неоднородностях интерфейса.

Зависимость спектров ФЛ от интенсивности возбуждения была исследована для лучшей позиции $S1(2a)$. На рисунке 4 видно, что при малой мощности возбуждения наблюдается только LIX-экситон. С ростом мощности происходит насыщение линии LIX-экситона, но растет интенсивность линий X, X^- и X*. Насыщение линии LIX можно связать с предложенным в работе [9] дрейфом внутрислоевых X-экситонов к гетерогранице с переходом в LIX.

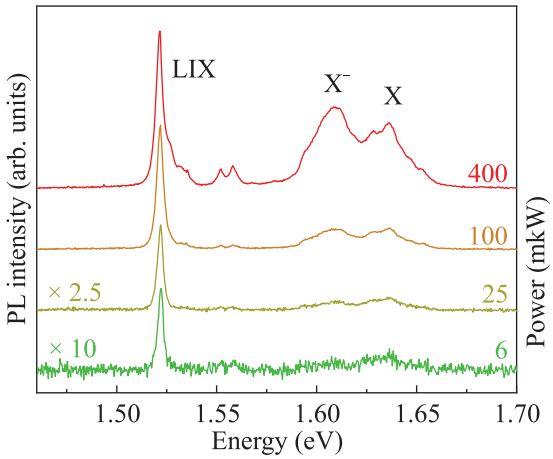

Рис. 4. (Цветной онлайн) Спектры фотолюминесценции интерфейсных LIX и внутрислоевых $X^-_{MoSe_2}$ и X_{MoSe_2} экситонов в зависимости от интенсивности возбуждения

Выводы. Впервые изучался новый тип латеральных гетероструктур, изготовленных методом механической эксфолиации и последовательного наложения монослоев ДПМ.

В спектре фотолюминесценции в гетероструктурах, состоящих из монослоя WSe_2 и бислоя $WSe_2/MoSe_2$ (нижний слой $MoSe_2$), инкапсулированных hBN, на границе монослоя и бислоя обнаружена новая линия, расположенная по энергии выше, чем линия межслоевого экситона, и ниже, чем линия экситона в монослое $MoSe_2$.

Линия интерпретируется как линия излучения, возникающего при рекомбинации латерального интерфейсного экситона (LIX) – одномерного экситона с пространственно разделенными электроном и дыркой, находящимися по разные стороны от границы в разных монослоях ДМП. Наблюдаемая линия совпадает по энергии с линией излучения одномерного экситона переноса заряда на латеральном гетеропереходе, полученном методом CVD, но ширина ее заметно меньше.

Показана возможность возникновения и изучения 1D экситонов на резкой границе раздела между различными монослоями полупроводников в новых структурах, более простых в изготовлении. Необходимым условием является максимально возможное согласование (минимальный угол относительного поворота) слоев WSe_2 и $MoSe_2$, образующих бислой.

Финансирование работы. Работа выполнена в рамках Государственного задания Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела имени Ю. А. Осипьяна Российской академии наук.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. M.-Y. Li, C.-H. Chen, Y. Shi, and L.-J. Li, "Heterostructures based on two-dimensional layered materials and their potential applications", Mater. Today **19**, 322 (2016).
2. O. Avalos-Ovando, D. Mastrogiuseppe, and S. E. Ulloa, "Lateral heterostructures and one-dimensional interfaces in 2D transition metal dichalcogenides", J. Phys. Condens. Mat. **31**, 213001 (2019).
3. X. Duan, C. Wang, J. C. Shaw, R. Cheng, Y. Chen, H. Li, X. Wu, Y. Tang, Q. Zhang, A. Pan, J. Jiang, R. Yu, Y. Huang, and X. Duan, "Lateral epitaxial growth of twodimensional layered semiconductor heterojunctions", Nat. Nanotechnol. **9**, 1024 (2014).
4. F. Ullah, Y. Sim, C. T. Le, M.-J. Seong, J. I. Jang, S. H. Rhim, B. C. Tran Khac, K.-H. Chung, K. Park, Y. Lee, K. Kim, H. Y. Jeong, and Y. S. Kim, "Growth and simultaneous valleys manipulation of two-dimensional $MoSe_2$–WSe_2 lateral heterostructure", ACS Nano **11**, 8822 (2017).
5. K. Wai Lau, Calvin, Zh. Gong, H. Yu, and W. Yao, "Interface excitons at lateral heterojunctions in monolayer semiconductors", Phys. Rev. B **98**, 115427 (2018).
6. R. Rosati, I. Paradisanos, L. Huang, Z. Gan, A. George, K. Watanabe, T. Taniguchi, L. Lombez, P. Renucci, A. Turchanin, B. Urbaszek, and E. Malic, "Interface engineering of charge-transfer excitons in 2D lateral heterostructures", Nat. Commun. **14**, 2438 (2023).
7. E. Vandoolaeghe, F. Fortuna, S. K. Chakraborty, B. Nayak, T. Taniguchi, K. Watanabe, P. K. Sahoo, T. Chervy, and P. A. Murthy, "Dipolar excitonic quantum wires at atomically sharp lateral interfaces", arXiv:2509.24465v3.
8. V. Suri, S. Singla, S. K. Chakraborty, V. Jakhar, S. Sarkar, P. K. Sahoo, B. Chakraborty, and S. Koerbel, "Strongly Bound Charge-Transfer

Interface Excitons in Lateral Monolayer $MoSe_2$–WSe_2 Heterostructures", Nano Lett. (2026); https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5c06500.

9. R. Rosati, S. Shradha, J. Picker, A. Turchanin, B. Urbaszek, and E. Malic, "Impact of charge-transfer excitons on unidirectional exciton transport in lateral TMD heterostructures", Nano Lett. **25**, 11319 (2025).
10. D. Beret, I. Paradisanos, H. Lamsaadi et al. (Collaboration), "Exciton spectroscopy and unidirectional transport in $MoSe_2$–WSe_2 lateral heterostructures encapsulated in hexagonal boron nitride", npj 2D Materials and Applications **6**, 84 (2022).
11. H. Lamsaadi, D. Beret, I. Paradisanos et al. (Collaboration), "Kapitza-resistance-like exciton dynamics in atomically flat $MoSe_2$–WSe_2 lateral heterojunction", Nat. Commun. **14**, 5881 (2023).
12. N. S. Maslova, V. N. Mantsevich, and P. I. Arseyev, "Exciton transport in atomically flat heterostructures: The appearance of negative diffusivity", Phys. Rev. E **112**, 014102 (2025).
13. N. S. Maslova, V. N. Mantsevich, and P. I. Arseyev, "Phonon-induced negative diffusivity of locally excited quasi-particles", Laser Phys. Lett. **22**, 125213 (2025).
14. L. Yuan, B. Zheng, Q. Zhao, R. Kempt, T. Brumme, A. B. Kuc, C. Ma, S. Deng, A. Pan, and L. Huang, "Strong Dipolar Repulsion of One-Dimensional Interfacial Excitons in Monolayer Lateral Heterojunctions", ACS Nano **17**, 15379 (2023).
15. M. V. Durnev and D. S. Smirnov, "Intervalley mixing of interface excitons at lateral heterojunctions", Phys. Rev. B **111**, 205403 (2025).
16. M. V. Durnev and D. S. Smirnov, "Tunable linear polarization of interface excitons at lateral heterojunctions", arXiv:2603.24471.
17. I. L. C. Lima, M. V. Milosevic, F. M. Peeters, and A. Chaves, "Tuning of exciton type by environmental screening", Phys. Rev. B **108**, 115303 (2023).
18. Y. Hoshi, M. Okada, R. Moriya, S. Masubuchi, K. Watanabe, T. Taniguchi, R. Kitaura, and T. Machida, "Effect of a pick-and-drop process on optical properties of a CVD-grown monolayer tungsten disulfide", Physical Review Materials **2**, 064003 (2018).
19. А. С. Бричкин, Г. М. Голышков, А. В. Черненко, "Влияние толщины инкапсулирующих слоев на качество гетероструктур на основе $MoSe_2$", ЖЭТФ **136**, 852 (2023) [A. S. Brichkin, G. M. Golyshkov, and A. V. Chernenko, "Influence of the Encapsulating Layer Thickness on the Quality of MoSe2-Based Heterostructures", JETP **136**, 760 (2023)].
20. Г. М. Голышков, А. С. Бричкин, В. Е. Бисти, А. В. Черненко, "Возбужденные состояния экситонов в монослоях $MoSe_2$ и WSe_2", Письма в ЖЭТФ **120**, 279 (2024) [G. M. Golyshkov, A. S. Brichkin, V. E. Bisti, and A. V. Chernenko, "Excited States of Excitons in $MoSe_2$ and WSe_2 Monolayers", JETP Lett. **120**, 270 (2024)].