

ОТЗЫВ

официального оппонента Смирнова Александра Михайловича на диссертацию Акмаева Марка Александровича «Экситонная динамика в монослоях дихалькогенидов переходных металлов», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

В диссертации Акмаева М. А. экспериментально исследуется динамика и пространственно-временные характеристики экситонной системы в монослоях дихалькогенидов переходных металлов (**ДХПМ**) MoS_2 и WSe_2 . Упор сделан на определение особенностей фотолюминесценции (**ФЛ**) свободных и локализованных экситонных состояний.

В первую очередь **актуальность** диссертационного исследования обусловлена большим интересом к экситонной физике в двумерных системах. Активное исследование экситонов началось с середины прошлого века в объемных полупроводниках и полупроводниковых квантовых ямах, свойства которых достаточно подробно изучены. Монослои **ДХПМ** представляют новую платформу для изучения экситонной физики. Основной особенностью монослоев **ДХПМ** является большая энергия связи экситонов, которая составляет 200-500 мэВ, в результате чего экситоны являются основным состоянием даже при комнатной температуре. Это сильно отличает монослои **ДХПМ** от классических полупроводников, где экситонные эффекты проявляются только при криогенных температурах. Кроме большой энергии связи экситонов в монослоях **ДХПМ** реализуется прямой оптический переход, в отличие от слоев толщиной в два и более слоев.

Устойчивость экситонных состояний в монослоях **ДХПМ** при комнатной температуре позволяет проследить за изменениями экситонной системы в широком диапазоне температур, что не всегда возможно реализовать в других материалах. Измерение пространственно-временных характеристик всегда представляло непростую, но интересную экспериментальную задачу. В литературе уделено мало внимания диффузии экситонов в монослоях **ДХПМ**, а поэтому изучение в диссертации пространственно-временных характеристик представляется актуальным. Стоит отметить, что в диссертационной работе Акмаев М. А. делает упор на изучении не только свободных экситонов, но и связанных экситонов в монослоях MoS_2 , а также локализованных экситонов в монослоях WSe_2 . Ввиду сложности определения динамики локализованных и связанных экситонных состояний они остаются малоизученными, а

информация об их пространственно-временных характеристиках практически отсутствует. Поэтому изучение в диссертации динамики локализованных и связанных экситонов в монослоях ДХПМ представляется **новым и актуальным**.

Научная значимость результатов обоснована неутихающим интересом к двумерной экситонной физике в монослоях ДХПМ с точки зрения фундаментальной физики. При этом обнаружение новых эффектов и точное объяснение экситонных процессов позволит приблизить к внедрению монослоёв ДХПМ, как перспективных материалов, в устройства современной полупроводниковой оптоэлектроники и электроники, что определяет **практическую значимость** данной работы.

Достоверность и в том числе новизна результатов обеспечивается грамотным применением проверенных и надежных экспериментальных методов с использованием современного высокоразрешающего оборудования. Данный аспект работы оставил исключительно положительное впечатление.

Диссертация Акмаева М. А. состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации – 109 страниц, включая 38 рисунков, а список литературы содержит 157 наименований.

Диссертационная работа хорошо структурирована.

Во **введении** описана актуальность и цель диссертационного исследования, сформулированы основные результаты, полученные в работе, обоснована их достоверность, новизна, научная и практическая значимость, также приведена аprobация работы и описан личный вклад.

В **первой главе** приводится литературный обзор, который является достаточно полным и последовательным и согласованным с основной частью диссертации.

Вторая глава посвящена описанию изготовления исследуемых монослоев ДХПМ. Монослои MoS₂ были выращены с помощью метода химического осаждения из газовой фазы. Монослои WSe₂ были изготовлены методом механического отщепления. Изготовление гетероструктуры на основе монослоя WSe₂, заключённого между слоями h-BN, осуществлялось с помощью механического переноса. В данной главе также представлено описание методики исследования: стационарная и разрешенная по времени микро ФЛ в широком диапазоне температур.

В **третьей главе** приведены результаты исследований монослоев MoS₂. Представлены результаты, раскрывающие особенности динамики и

пространственно-временной характеристики свободных экситонов. Так, установлено, что в монослоях MoS₂ свободные экситоны имеют время жизни порядка нескольких десятков пикосекунд в широком диапазоне температур и диффузионный характер распространения при комнатной температуре. Показано, что коэффициент диффузии увеличивается от 20 до 40 см²/с при увеличении мощности возбуждения.

Особо стоит отметить, что при низких температурах в монослоях MoS₂ экспериментально обнаружены связанные экситоны, для которых впервые исследована пространственно-временная динамика, и которые имеют длительную неэкспоненциальную динамику ФЛ (~ 1 мкс) с субдиффузионным характером пространственного распространения. Представлено теоретическое обоснование субдиффузионного пространственного распространения связанных экситонов, что объясняется на основе учета взаимодействия диффузии и Оже-рекомбинации.

Четвертая глава посвящена результатам исследований монослоев WSe₂. В них при комнатной температуре экситонная ФЛ объяснена рекомбинацией свободных экситонов, и с помощью прямой регистрации пространственно-временной динамики ФЛ экситонов определены их коэффициенты диффузии. Показано, что при увеличении мощности возбуждения коэффициент диффузии увеличивается от 10 до 50 см²/с. Однако, при низких температурах ФЛ связана с рекомбинацией локализованных экситонных состояний, которые имеют длительный неэкспоненциальный характер затухания. Установлено, что в монослоях WSe₂ при низких температурах долгоживущая неэкспоненциальная динамика ФЛ экситонов не связана с бимолекулярными процессами рекомбинации, как считалось ранее, а может быть описана на основе представления о разбросе времен излучательной рекомбинации локализованных экситонных состояний, зависящих от степени локализации экситонов.

Также в четвертой главе представлены результаты исследования монослоя WSe₂, заключенного между слоями h-BN, то есть гетероструктуры h-BN/WSe₂/h-BN. Проведено сравнение динамики ФЛ экситонной системы в гетероструктуре с динамикой ФЛ в отщепленном монослое WSe₂. В гетероструктуре h-BN/WSe₂/h-BN исследована динамика ФЛ трионов и экситонов независимо. Показано, что динамика ФЛ трионов кардинально отличается от динамики ФЛ экситонов, а именно, динамика ФЛ трионной линии характеризуется экспоненциальным затуханием с временем жизни ~ 20 пс, что на порядок быстрее, чем затухание экситонов.

Для обоих исследованных монослоёв MoS₂ и WSe₂ на кремниевой подложке в низкотемпературной ФЛ выявлено доминирование локализованных экситонных состояний, характеризующихся долгоживущей неэкспоненциальной временной динамикой.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Результаты, полученные в диссертации Акмаева М. А., обладают научной **новизной** и корректно **обоснованы**. Результаты диссертационного исследования прошли **апробацию** на ведущих российских и международных конференциях. Результаты опубликованы в трех статьях в рецензируемых научных журналах.

По диссертационной работе имеются некоторые **замечания**.

1. Из текста диссертации не совсем ясна разница между локализованными и связанными экситонами. Оба эти термины применяются в диссертации, но плохо понятна разница между ними. В частности, глубина потенциальной ямы, в которой находятся данные экситоны, может существенно влиять на их динамику. По глубине потенциальной ямы можно было бы судить о характере локализации экситона – целиком ли экситон находится в потенциальной яме, или только один из носителей локализован.

2. На рисунке 3.4 (а) для А-экситона заметно два участка с разными наклонами (граница примерно на 1 мВт). Так как результаты представлены в двойном логарифмическом масштабе, то расчёт углов наклона каждого из участков мог бы дополнительно пролить свет на динамику экситонов при различных интенсивностях возбуждения. Схожая пороговая особенность обнаружена на рисунке 3.8 (с), на котором видно, что величина медленной компоненты времени жизни не изменяется до значения примерно 2 мкДж, а выше начинает заметно уменьшаться. Связаны ли эти особенности с каким-то одним процессом, или имеют различную природу?

3. Из текста диссертации не ясен физический механизм прыжка экситонов в монослоях MoS₂, приводящий к их субдиффузионному характеру динамики. Следуя теоретическому описанию субдиффузионной динамики экситонов (уравнение 3.2), возможно предположить, что при экситон-экситонной аннигиляции один из экситонов приобретает избыточную энергию, позволяющую ему выйти из потенциальной ямы, после чего локализоваться в другой?

4. В монослое WSe₂ исследована ФЛ светлого экситона и триона при различных температурах. Учитывая, что нижним по энергии является

состояние темного экситона, необходимо было уделить внимание его роли в динамике экситонов, несмотря на то что его ФЛ не обнаружена. Например, при достаточной плотности тёмных экситонов возможна ли их экситон-экситонная аннигиляция и рождение при этом светлого экситона или триона?

Данные замечания не влияют на общее положительное качество работы.

На основе всего вышесказанного считаю, что диссертация Акмаева Марка Александровича «Экситонная динамика в монослоях дихалькогенидов переходных металлов» соответствует всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Акмаев Марк Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент: Смирнов Александр Михайлович
доктор физико-математических наук по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников, старший научный сотрудник кафедры физики полупроводников и криоэлектроники Физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московского государственного университета им.

М. В. Ломоносова»

тел.: 8-495-939-50-72, +7-919-724-00-46

email: alsmir1988@mail.ru

А.М. Смирнов

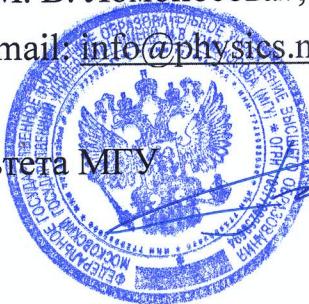
16.05.2023

Адрес организации: 119991, ГСП-1, Москва, ул. Ленинские Горы д.1,
строение 2, Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Московский государственный
университет имени М. В. Ломоносова», Физический факультет

+7 (495) 939-16-82 email: info@physics.msu.ru,

И.о. декана

Физического факультета МГУ



профессор В.В. Белокуров

16.05.2023

Список основных публикаций официального оппонента Смирнова А. М. в рецензируемых научных изданиях по тематике диссертации Акмаева М. А. за последние пять лет:

1. A. M. Smirnov, A. D. Golinskaya, V. N. Mantsevich, M. V. Kozlova, K. V. Ezhova, B. M. Saidzhonov, R. B. Vasiliev, and V. S. Dneprovskii, *Optical Gain Appearance in the CdSe/CdS Nanoplatelets Colloidal Solution*, Results in Physics **32**, 105120 (2022).
2. I. D. Laktaev, B. M. Saidzhonov, R. B. Vasiliev, A. M. Smirnov, and O. V. Butov, *Two-Photon Excited Biexciton Photoluminescence in Colloidal Nanoplatelets CdSe/CdS*, Journal of Luminescence **252**, 119414 (2022).
3. A. M. Smirnov, A. D. Golinskaya, B. M. Saidzhonov, R. B. Vasiliev, V. N. Mantsevich, and V. S. Dneprovskii, *Exciton-Exciton Interaction and Cascade Relaxation of Excitons in Colloidal CdSe Nanoplatelets*, Journal of Luminescence **229**, 117682 (2021).
4. A. D. Golinskaya, A. M. Smirnov, M. V. Kozlova, E. V. Zharkova, R. B. Vasiliev, V. N. Mantsevich, and V. S. Dneprovskii, *Tunable Blue-Shift of the Charge-Transfer Photoluminescence in Tetrapod-Shaped CdTe/CdSe Nanocrystals*, Results in Physics **27**, 104488 (2021).
5. A. M. Smirnov, A. D. Golinskaya, P. A. Kotin, S. G. Dorofeev, E. V. Zharkova, V. V. Palyulin, V. N. Mantsevich, and V. S. Dneprovskii, *Damping of Cu-Associated Photoluminescence and Formation of Induced Absorption in Heavily Cu-Doped CdSe Quantum Dots*, J. Phys. Chem. C **123**, 27986 (2019).
6. A. M. Smirnov, V. N. Mantsevich, D. S. Smirnov, A. D. Golinskaya, M. V. Kozlova, B. M. Saidzhonov, V. S. Dneprovskii, and R. B. Vasiliev, *Heavy-Hole and Light-Hole Excitons in Nonlinear Absorption Spectra of Colloidal Nanoplatelets*, Solid State Communications **299**, 113651 (2019).
7. A. M. Smirnov, A. D. Golinskaya, P. A. Kotin, S. G. Dorofeev, V. V. Palyulin, V. N. Mantsevich, and V. S. Dneprovskii, *Photoluminescence and Nonlinear Transmission of Cu-Doped CdSe Quantum Dots*, Journal of Luminescence **213**, 29 (2019).
8. A. M. Смирнов, А. Д. Голинская, Б. М. Сайджонов, Р. Б. Васильев, В. Н. Манцевич, и В. С. Днепровский, Экситонное поглощение с участием фононов в коллоидных нанопластинах CdSe/CdS, Письма В ЖЭТФ **109**, (2019).
9. A. M. Смирнов, А. Д. Голинская, Е. В. Жаркова, М. В. Козлова, Б. М. Сайджонов, Р. Б. Васильев, и В. С. Днепровский, Насыщение поглощения экситонов в нанопластинках CdSe/CdS при их нестационарном возбуждении, Письма В ЖЭТФ **109**, (2019).