

ОТЗЫВ

официального оппонента Семиной Марины Александровны 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.

Диссертационная работа Акмаева М. А. посвящена экспериментальному исследованию свободных и локализованных экситонов в монослоях дихалькогенидов переходных металлов. При этом делается упор на изучение динамики фотолюминесценции и пространственно-временных характеристик экситонов.

Актуальность. Получение графена дало толчок к интенсивному изучению атомарно тонких материалов. Среди их множества слои дихалькогенидов переходных металлов (ДХПМ) выделяются тем, что они являются полупроводниками в отличие, например, от вышеупомянутого графена. При этом, в отличие от исследуемых несколько десятков лет объёмных дихалькогенидов переходных металлов, их монослои обладают прямой запрещенной зоной. Это обстоятельство вместе с сильными кулоновскими эффектами (энергия связи экситона порядка несколько сотен мэВ) делает монослои ДХПМ прекрасной системой для исследования физики экситонов, в том числе оптическими методами.

Среди вопросов экситонной физики временная динамика излучения экситонов всегда представляла большой интерес. Экспериментально ее можно проследить, наблюдая за динамикой фотолюминесценции (ФЛ), что и сделано в диссертационной работе. Помимо изучения временной динамики ФЛ немалый интерес представляют процессы пространственного распространения экситонов, что также изучается в диссертации. Вышесказанное, несомненно, доказывает **актуальность** темы диссертации Акмаева М. А. как для физики конденсированного состояния в целом, так и для физики экситонов в монослоях ДХПМ в частности.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и списка публикаций автора по теме диссертации. Объем диссертации составляет 109 страниц, включая 38 рисунков, а список литературы содержит 157 наименований.

Во **введении** доказана актуальность исследования, представлены цель исследования, практическая значимость, апробация работы, обоснована достоверность, полученных результатов, описана научная новизна и личный вклад Акмаева М. А.. Также во введении приведены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приводится литературный обзор по теме диссертации. Обзор в достаточном объеме описывает современное состояние физики экситонов в монослоях ДХПМ.

Во **второй главе** описаны изучаемые образцы и методы их получения. В качестве изучаемых образцов выступали монослои WSe_2 и MoS_2 , лежащие на подложке, и монослои WSe_2 , заключенные между слоями h-BN. Также в данной главе описываются экспериментальные методики, с помощью которых проводились исследования, а именно стационарная и разрешенная по времени микро ФЛ в широком диапазоне температур.

Третья глава посвящена описанию оригинальных результатов исследований монослоев MoS_2 , выращенных методом газовой эпитаксии, размещенных на кремниевой подложке. Показано, что в такой системе при низких температурах в ФЛ доминируют связанные экситоны, излучение которых имеет длительный (до ~ 1 мкс) неэкспоненциальный характер затухания, а их пространственное распределение имеет субдиффузионный характер. Описана теоретическая модель, на основе которой можно сделать вывод, что подобный характер субдиффузионного распространения и неэкспоненциального затухания ФЛ вызван взаимодействием диффузии и оже-рекомбинации. Также приведены результаты экспериментов по исследованию динамики и пространственного распространения свободных экситонов в монослоях MoS_2 .

Четвертая глава описывает результаты исследований динамики экситонной системы в монослоях WSe_2 , полученных методом механического отщепления. В данной главе приводится обоснование того, что в монослоях WSe_2 , размещенных на подложке, неэкспоненциальный характер затухания ФЛ при низких температурах может быть вызван рекомбинацией локализованных экситонных состояний за счет разброса длины их локализации. При комнатной температуре в ФЛ доминируют процессы рекомбинации свободных экситонов, которые имеют диффузионный характер пространственного распространения. В конце главы приведены результаты исследований экситонной системы в монослоях WSe_2 , заключенных между слоями h-BN, которые сравниваются с результатами, полученных для монослоев WSe_2 , помещенных на подложку.

В **заключении** представлены результаты и выводы диссертационной работы. Среди результатов хочется выделить следующие:

1. Впервые показано, что в монослоях MoS_2 , выращенных методом газовой эпитаксии, при низкой температуре неэкспоненциальный характер затухания ФЛ и субдиффузионный характер пространственного распределения связанных экситонов объясняется на основе учета взаимодействия диффузии и оже-рекомбинации.

2. Впервые показано, что в монослоях WSe_2 , полученных методом механического отщепления, при низких температурах долгоживущая неэкспоненциальная динамика ФЛ экситонов не связана с бимолекулярными

процессами рекомбинации, а может быть описана на основе представления о разбросе времен излучательной рекомбинации экситонных состояний, локализованных на неоднородном беспорядке.

3. Впервые с помощью прямой регистрации пространственно-временной динамики ФЛ экситонов получены коэффициенты диффузии свободных экситонов при комнатной температуре в отщепленных монослоях WSe_2 .

4. В монослое WSe_2 , заключенном между слоями h-BN, исследована динамика ФЛ трионов и экситонов независимо. Показано, что динамика ФЛ трионов, в отличие от экситонов, характеризуется экспоненциальным затуханием.

Сформулированные Акмаевым М. А. выводы и результаты проведенных исследований **обоснованы** и корректны. Результаты, полученные в диссертации Акмаева М. А., являются **новыми**. **Достоверность** результатов, полученных в диссертации, несомненна. Это обусловлено внутренней непротиворечивостью результатов, последовательным подходом к проведению экспериментов и анализу полученных современными и проверенными методиками данных.

Результаты диссертации, несомненно, представляют **научную и практическую значимость**. Это выражается в том, что полученные результаты раскрывают новые свойства экситонной системы в монослоях ДХПМ, что может помочь в разработке новых устройств электроники, оптоэлектроники, спинтроники и долинной физики на базе монослоев ДХПМ.

Результаты диссертации докладывались на ведущих российских и международных конференциях. Результаты опубликованы в трех статьях в научных журналах, входящих в базу данных Web of Science, и в шести сборниках материалов конференций.

В целом материал диссертации изложен достаточно четко, однако при ее чтении возникают следующие **замечания**:

1. В третьей главе при описании теоретической модели субдиффузионного распространения связанных экситонов в монослоях MoS_2 не приведена обоснованность применения данной модели к исследуемой системе, что следовало бы сделать.

2. В четвертой главе описана модель, в которой неэкспоненциальный характер затухания ФЛ экситонов в монослое WSe_2 , размещенном на подложке, объяснен локализацией экситонов на дефектах с различной длиной локализации экситона. Какие требования к потенциалу дефектов предъявляет модель? Применима ли она к монослоям WSe_2 , помещенным между слоями hBN, описанным в конце главы?

3. Из текста диссертации не очень понятна возможная причина отличия механизмов, приводящих к неэкспоненциальному затуханию ФЛ экситонов в

отщепленных монослоях WSe_2 и эпитаксиальных MoS_2 . Может ли данное обстоятельство быть связано с различным качеством образцов?

4. Во введении на стр. 4 и литературном обзоре, стр. 11, встречается перечисление "свободный экситон, локализованный, темный.." Мне казалось, что темный экситон, так же как и светлый, может быть как свободным, так и локализованным.

Перечисленные выше замечания не снижают общей высокой оценки представленной диссертационной работы, а скорее являются предложениями для ее дальнейшего развития.

Таким образом, диссертация Акмаева Марка Александровича «Экситонная динамика в монослоях дихалькогенидов переходных металлов» удовлетворяет 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:

Семина Марина Александровна,

доктор физико-математических наук по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика,

ведущий научный сотрудник Сектора теоретических основ микроэлектроники Отделения твердотельной электроники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук.

Адрес: 194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.

Тел.: + 7 911 241 07 32

E-mail: semina@mail.ioffe.ru

Семина М. А.

20.04.23

Подпись Семиной М. А. заверяю



Ученый секретарь ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
кандидат физико-математических наук,
Патров М.И.

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

1. J. Zipfel, K. Wagner, M. A. Semina, J. D. Ziegler, T. Taniguchi, K. Watanabe, M. M. Glazov, and A. Chernikov, *Electron Recoil Effect in Electrically Tunable MoSe₂ monolayers*, Phys. Rev. B **105**, 075311 (2022).
2. Z. A. Iakovlev, M. A. Semina, M. M. Glazov and E. Y. Sherman, *Flexural deformations and collapse of bilayer two-dimensional crystal by interlayer excitons*, Phys. Rev. B **105**, 205305 (2022).
3. L. Ren, C. Robert, B. Urbaszek, X. Marie, M. Semina, and M. M. Glazov, *Tuning Absorption and Emission in Monolayer Semiconductors: A Brief Survey*, Comptes Rendus. Physique **22**, 43 (2022).
4. М. А. Семина и Р. А. Сурис, *Локализованные экситоны и трионы в полупроводниковых наносистемах*, УФН **192**, 121 (2022).
5. K.-Q. Lin, J. D. Ziegler, M. A. Semina, J. V. Mamedov, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Bange, A. Chernikov, M. M. Glazov, and J. M. Lupton, *High-Lying Valley-Polarized Trions in 2D Semiconductors*, Nat Commun **13**, 1 (2022).
6. J. Zipfel, K. Wagner, J. D. Ziegler, T. Taniguchi, K. Watanabe, M. A. Semina, and A. Chernikov, *Light-Matter Coupling and Non-Equilibrium Dynamics of Exchange-Split Trions in Monolayer WS₂*, J. Chem. Phys. **153**, 034706 (2020).
7. K. Wagner, E. Wietek, J. D. Ziegler, M. A. Semina, T. Taniguchi, K. Watanabe, J. Zipfel, M. M. Glazov, and A. Chernikov, *Autoionization and Dressing of Excited Excitons by Free Carriers in Monolayer WSe₂*, Phys. Rev. Lett. **125**, 267401 (2020).
8. M. A. Semina, M. M. Glazov, and E. Sherman, *Interlayer Exciton-Polaron in Atomically Thin Semiconductors*, Annalen Der Physik **532**, 2000339 (2020).
9. M. M. Glazov, M. A. Semina, C. Robert, B. Urbaszek, T. Amand, and X. Marie, *Intervalley Polaron in Atomically Thin Transition Metal Dichalcogenides*, Phys. Rev. B **100**, 041301 (2019).
10. H. H. Fang, B. Han, C. Robert, M. A. Semina, D. Lagarde, E. Courtade, T. Taniguchi, K. Watanabe, T. Amand, B. Urbaszek, M. M. Glazov, and X. Marie, *Control of the Exciton Radiative Lifetime in van Der Waals Heterostructures*, Phys. Rev. Lett. **123**, 067401 (2019).
11. М. А. Семина, *Экситоны и трионы в двухслойных ван-дер-ваальсовых гетероструктурах*, Физика твердого тела **61**, 2234 (2019).
12. C. Robert, M. A. Semina, F. Cadiz, M. Manca, E. Courtade, T. Taniguchi, K. Watanabe, H. Cai, S. Tongay, B. Lassagne, P. Renucci, T. Amand, X. Marie, M. M. Glazov, and B. Urbaszek, *Optical spectroscopy of excited exciton states in MoS₂ monolayers in van der Waals heterostructures*, Phys. Rev. Materials **2**, 011001(R) (2018).