

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Яблонского Артема Николаевича на диссертацию Чернопицкого Максима Александровича «Оптические свойства примесно-дефектных центров в ультратонких пленках слоистых моно- и дихалькогенидов металлов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

В работе Чернопицкого М. А. представлено исследование низкотемпературной фотолюминесценции пленок слоистых полупроводников из групп моно- и дихалькогенидов металлов, полученных методом механического слоения из объемных материалов. В работе основной упор сделан на изучение примесно-дефектных состояний, возникающих в процессе получения пленок или в результате преднамеренного легирования исходных материалов.

В диссертации решается ряд задач, касающихся как механизмов излучательной рекомбинации в неравновесной электронно-дырочной системе слоистых полупроводников, так и особенностей электронного спектра, возникающих при переходе от объемных материалов к тонким пленкам. Отдельное внимание уделяется методам получения ультратонких плёнок слоистых полупроводников оптического качества.

Актуальность выбранной тематики определяется перспективами использования слоистых материалов в новых направлениях современной электроники и оптоэлектроники. В то время как дихалькогениды переходных металлов довольно широко исследованы в литературе, дихалькогениды пост-переходных металлов и монокалькогениды металлов остаются в значительной степени неисследованными, несмотря на ряд многообещающих свойств. При этом, потенциальными приложениями данных соединений могут быть ультратонкие детекторы, солнечные элементы, транзисторы и устройства для фотокатализа. В работе Чернопицкого М. А. представлены новые данные об электронном спектре, в том числе о формируемых дефектами состояниях, таких материалов как дисульфид олова, диселенид вольфрама, селенид индия и селенид галлия.

По своей структуре диссертация Чернопицкого М.А., состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и списка научных публикаций, в которых изложены основные результаты автора. Во введении описана актуальность данного направления исследования, перечислены решаемые задачи, сформулированы положения, выносимые на защиту, обоснована их достоверность, новизна, практическая значимость, апробация, также описан личный вклад автора.

В первой главе приводится обзор состояния исследований по методам синтеза тонких плёнок слоистых полупроводников, особенностям их структуры и влиянию этой структуры на оптические свойства тонких плёнок. Также описываются основные физические свойства слоистых полупроводников, исследуемых в диссертации. Перечисляются известные методы расщепления объёмных кристаллов до ультратонких плёнок. Обсуждаются электронные состояния в запрещённой зоне тонких плёнок, возникающие из-за наличия примесей и дефектов.

Во второй главе перечислены использованные в работе методы получения тонких плёнок слоистых полупроводников и методы их исследования. Описана методика микромеханического расщепления при помощи клейкой ленты. Приведён метод получения тонких плёнок слоистых полупроводников с большим латеральным размером при помощи материалов, обладающих высоким сродством к халькогену. Представлена первичная характеристика качества полученных плёнок на основе микроскопии, измерений спектров люминесценции и комбинационного рассеяния света при комнатной температуре.

Третья глава посвящена спектроскопии оптически активных дефектов в тонких плёнках InSe. Описана антистоксова люминесценция в объёмных кристаллах InSe и плёнках на их основе. Обнаружен рост интенсивности антистоксовой люминесценции на два порядка при переходе от объёмного материала к тонким плёнкам. Также описывается различие в спектрах низкотемпературной фотолюминесценции тонких плёнок и объёмного InSe. Изменение спектров приписано внедрению планарных дефектов в процессе микромеханического расщепления InSe.

Четвёртая глава посвящена исследованию низкотемпературной фотолюминесценции объёмных кристаллов и плёнок GaSe. Обсуждаются полученные спектры низкотемпературной фотолюминесценции объёмного GaSe, производится их сравнение со спектрами плёнок различной толщины. Демонстрируется и описывается антистоксова люминесценция в GaSe.

В пятой главе приводятся результаты исследования образцов дисульфида олова. Описываются преимущества синтеза дисульфида олова при высоких давлениях и температуре. Приводятся результаты первичной характеристики материала, свидетельствующие о его высоком структурном совершенстве. Дается информация об обнаруженном в спектрах низкотемпературной фотолюминесценции дисульфида олова новом люминесцентном центре, связанном с углеродом.

В работе получен ряд новых научных результатов, касающихся обнаружения антистоксовой люминесценции в таких материалах как селенид индия и селенид галлия, демонстрации роли планарных дефектов при формировании оптических свойств плёнок слоистых полупроводников, а также обнаружения новой люминесцентной системы в дисульфиде олова, легированном углеродом. Полученные результаты имеют практическое значение связанное, в первую очередь, с технологиями создания оптоэлектронных устройств на основе ван-дер-ваальсовых гетероструктур, в которых используются пленки слоистых полупроводников.

Диссертационная работа Чернопицкого М.А. представляет собой завершённое научное исследование. Полученные в работе результаты являются новыми и представляют научную и практическую значимость. Они докладывались на российских конференциях и опубликованы в 9 статьях в высокорейтинговых изданиях, входящих в основные международные публикационные базы. Основные выводы диссертации подробно обоснованы и их достоверность не вызывает сомнений.

По диссертации Чернопицкого М. А. имеются следующие замечания и вопросы:

1) В параграфе 2.3, на рисунке 2.7, на котором представлены спектры низкотемпературной ФЛ монослоев WSe₂, одни линии однозначно связываются с излучением экситонов и трионов без ссылок на литературу, а природа других линий, в том числе самой интенсивной линии с энергией 1.69 эВ на верхнем графике, никак не объясняется.

2) Не совсем ясно, с чем связан выбор энергий фотонов 1.688 эВ и 1.675 эВ в измерениях пространственных карт ФЛ, представленных на рис.2.8 и 2.9, соответственно. Было бы уместно более подробно раскрывать такие детали.

3) В параграфе 3.3 при описании спектров низкотемпературной микро-ФЛ тонких плёнок InSe (рис.3.5 и 3.6) наблюдаемые полосы ФЛ приписываются излучению фрагментов плёнок, состоящих из двух, четырех, шести и восьми монослоев. При этом ссылки на литературные данные не приводятся. Есть ли какие-то расчеты или ранее полученные экспериментальные данные, подтверждающие такую интерпретацию природы наблюдаемых линий ФЛ?

4) В четвертой главе обсуждаются оптические свойства объемных кристаллов и тонких пленок GaSe, но при этом приведены экспериментальные данные пленки толщиной 100 мкм, что по сути представляет собой объемный кристалл. Желательно было бы сделать более четкое определение того, что в диссертационной работе понимается под "тонкой пленкой".

5) В целом в тексте работы встречается заметное количество опечаток, стилистических ошибок и неудачно сформулированных предложений. В некоторых местах предположительно не хватает ссылок. Значения на осях нескольких рисунков плохо читаемы, а низкое качество рисунка 3.1 не позволяет различить мелкие особенности измеренных спектров ФЛ. В главах 2 и 5 в пределах одного параграфа на графиках используются то "нм", то "эВ", что не очень удобно для восприятия полученных результатов.

Указанные замечания не снижают значимости полученных результатов и не влияют на их достоверность, а также не снижают общей положительной оценки диссертации.

Диссертация Чернопицкого Максима Александровича «Оптические свойства примесно-дефектных центров в ультратонких пленках слоистых моно- и дихалькогенидов 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, Чернопицкий Максим Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук, Яблонский Артем Николаевич, старший научный сотрудник Института физики микроструктур РАН – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук".

Тел.: +78314179482, доб. 261

e-mail: yablonsk@ipmras.ru

Адрес: 603950, ГСП-105, Нижний Новгород, Россия

Яблонский А. Н.

02.02.2024

Подпись Яблонского Артема Николаевича заверяю.

Ученый секретарь ИФМ РАН, к.ф.-м.н.



Гапонова Д. М.

Список основных публикаций оппонента кандидата физико-математических наук, Яблонского А. Н. по теме защищаемой М. А. Чернопицким диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Andreev, B. A., Lobanov, D. N., Krasil'nikova, L. V., Bushuykin, P. A., Yablonskiy, A. N., Novikov, A. V., ... Krasil'nik, Z. F. (2019). Emission properties of heavily doped epitaxial indium-nitride layers. *Semiconductors*, 53(10), 1357–1362. doi:10.1134/s1063782619100038
2. Balashova, T. V., Polyakova, S. K., Ilichev, V. A., Kukinov, A. A., Rummyantsev, R. V., Fukin, G. K., ... Bochkarev, M. N. (2023). New luminescent 10-oxybenzoquinolate complexes of rare earth metals. *Journal of Rare Earths*, 41(8), 1135–1143. doi:10.1016/j.jre.2022.05.002
3. Gaponenko, N. V., Sudnik, L. V., Vityaz, P. A., Luchanok, A. R., Stepikhova, M. V., Yablonskiy, A. N., ... Rusetsky, M. S. (2022). Upconversion luminescence of Er³⁺ ions from barium titanate xerogel powder and target fabricated by explosive compaction method. *Journal of Applied Spectroscopy*, 89(2), 238–243. doi:10.1007/s10812-022-01349-x
4. Gaponenko, Nikolai V., Staskov, N. I., Sudnik, L. V., Vityaz, P. A., Luchanok, A. R., Karnilava, Y. D., ... Timoshenko, V. Y. (2023). Upconversion luminescence from sol-gel-derived erbium- and ytterbium-doped BaTiO₃ film structures and the target form. *Photonics*, 10(4), 359. doi:10.3390/photonics10040359
5. Khrebtov, A. I., Danilov, V. V., Kulagina, A. S., Reznik, R. R., Skurlov, I. D., Litvin, A. P., ... Cirilin, G. E. (2021). Influence of TOPO and TOPO-CdSe/ZnS quantum dots on luminescence photodynamics of InP/InAsP/InP Heterostructure nanowires. *Nanomaterials (Basel, Switzerland)*, 11(3), 640. doi:10.3390/nano11030640
6. Yablonskiy, A. N., Novikov, A. V., Stepikhova, M. V., Sergeev, S. M., Baidakova, N. A., Shaleev, M. V., & Krasilnik, Z. F. (2020). Kinetics of the luminescence response of self-assembled Ge(Si) nanoislands embedded in two-dimensional photonic crystals. *Semiconductors*, 54(10), 1352–1359. doi:10.1134/s1063782620100334
7. Yurasov, D. V., Yablonskiy, A. N., Baidakova, N. A., Shaleev, M. V., Rodyakina, E. E., Dyakov, S. A., & Novikov, A. V. (2022). Enhancing the photoluminescence response of thick Ge-on-Si layers using photonic crystals. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 55(7), 075107. doi:10.1088/1361-6463/ac32fe
8. Zaitsev, S. V., Kiselev, A. P., Zverkova, I. I., Yablonskiy, A. N., Matveevskaya, N. A., & Tolmachev, A. V. (2019). Size-dependent luminescence kinetics of rare-earth Er³⁺ ions in Y₂O₃ nanospheres. *Journal of Applied Physics*, 125(12). doi:10.1063/1.5081042