Заключение диссертационного совета МГУ.013.5 по диссертации на соискание ученой степени доктора наук

Решение диссертационного совета от «17» ноября 2022 г., протокол № 6

О присуждении Смирнову Александру Михайловичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Резонансные нелинейно-оптические явления в коллоидных растворах нанокристаллов» по специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников» принята к защите диссертационным советом 8 сентября 2022 года, протокол № 2.

Соискатель Смирнов Александр Михайлович, 1988 года рождения, поступил на физический факультет Московского Государственного Университета имени М.В. Ломоносова в 2005 году. В 2011 году Смирнов А.М. окончил МГУ имени М.В. Ломоносова с присвоением квалификации «физик» по специальности «Физика конденсированного состояния вещества» и в том же году поступил в аспирантуру физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. В 2014 году Смирнов Александр Михайлович защитил кандидатскую диссертацию в совете Д 501.001.70 при физическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности 01.04.10 (физика полупроводников) и получил диплом КНД №006756 с присуждением учёной степени «кандидат физико-математических наук».
Диссертация на соискание ученой степени доктора физико- математических наук выполнена на кафедре физики полупроводников и криоэлектроники физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. В период подготовки диссертации соискатель Смирнов Александр Михайлович работал на кафедре физики полупроводников и криоэлектроники физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова в должности старшего научного сотрудника.
Научный консультант: доктор физико-математических наук профессор, профессор кафедры физики полупроводников и криоэлектроники физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова Днепровский Владимир Самсонович.
Официальные оппоненты:

- ✓ доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, профессор кафедры общей физики и физики конденсированного состояния физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова Тиходеев Сергей Григорьевич;
- ✓ доктор физико-математических наук, профессор РАН, главный научный сотрудник лаборатории спиновых и оптических явлений в полупроводниках Физико-технического Института имени А.Ф. Иоффе РАН, Родина Анна Валерьевна;
- ✓ доктор физико-математических наук, профессор, высококвалифицированный главный научный сотрудник отдела люминесценции им. С.И. Вавилова Физического института имени П.Н. Лебедева РАН, Витухновский Алексей Григорьевич

дали положительные отзывы на диссертацию.

Выбор официальных оппонентов обосновывался соответствием их научных интересов профилю рассматриваемой диссертации, профессионализмом, высокими достижениями и компетентностью в соответствующей отрасли науки, а также наличием публикаций, соответствующих тематике диссертации. Указанные оппоненты не имеют совместных проектов и публикаций с соискателем.

Смирнов А.М. имеет 55 опубликованных работ (54 статьи и 1 книга). По материалам диссертации опубликовано 42 работы, из них 38 в журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus. В число публикаций по теме работы входят 9 статей в российских журналах из перечня ВАК, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus. Кроме того, опубликовано еще 2 работы: диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук и учебное пособие. Получено два авторских свидетельства.

В качестве наиболее значимых можно выделить следующие работы:

1. Днепровский В. С., Жуков Е. А., Козлова М. В., **Смирнов А. М.**, Вумайер Т. Особенности нелинейного поглощения при резонансном одно-и двухфотонном возбуждении основного экситонного перехода в коллоидных квантовых точках CdSe/ZnS // Вестник

Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. − 2012. № 2. − С. 53-59. IF=0.536 (WoS).

2. Dneprovskii V., Kozlova M., **Smirnov A.**, Wumaier T. The features of nonlinear absorption of two-photon excited excitons in CdSe/ZnS quantum dots // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. − 2012. − Т. 44, № 9. − С. 1920-1923. https://doi.org/10.1016/j.physe.2012.05.028. IF=3.369 (WoS).

3. Днепровский В. С., Козлова М. В., **Смирнов А. М.** Самодифракция ультракоротких импульсов лазера при резонансном возбуждении экситонов в коллоидном растворе квантовых точек CdSe/ZnS // Квантовая электроника. − 2013. − Т. 43, № 10. − С. 927-930. IF=1.194 (WoS).

4. Козлова М. В., **Смирнов А. М.**, Аль-Хужейри Р. М., Манцевич В. Н., Днепровский В. С. Неодимовый лазер с отрицательной обратной связью: подавление самосинхронизации, управление режимом синхронизации мод // Оптика и спектроскопия. − 2015. − Т. 119, № 2. − С. 323-328. https://doi.org/10.7868/S0030403415070156. IF=0.740 (WoS).

5. **Smirnov A. M.**, Tikhonov I. V., Mantsevich V. N., Dneprovskii V. S. Two-dimensional dynamic photonic crystal creation by means of three non-coplanar laser beams interference in colloidal CdSe/ZnS quantum dots solution // Письма в ЖЭТФ. − 2015. − Т. 102, № 4. − С. 240-244. https://doi.org/10.7868/S0370274X15160043. IF=1.400 (WoS).

6. **Смирнов А. М.**, Козлова М. В., Днепровский В. С. Двухфотонно возбужденная дифракционная решетка: самодифракция и нелинейно-оптические свойства коллоидных квантовых точек CdSe/ZnS // Оптика и спектроскопия. − 2016. − Т. 120.− С. 496-501. https://doi.org/10.7868/S0030403416020239. IF=0.740 (WoS).

7. **Смирнов А. М.**, Голинская А. Д., Ежова К. В., Манцевич В. Н., Днепровский В. С. Самодифракция на сформированном в коллоидном растворе квантовых точек динамическом фотонном кристалле // Письма в ЖЭТФ. − 2016. − Т. 104, № 10. − С. 683-688. https://doi.org/10.7868/S0370274X16220045. IF=1.400 (WoS).

8. **Смирнов А. М.**, Голинская А. Д., Ежова К. В., Козлова М. В., Манцевич В. Н., Днепровский В. С. Особенности нелинейного поглощения коллоидных растворов квантовых точек CdSe/ZnS при стационарном однофотонном возбуждении экситонов // ЖЭТФ. − 2017. − Т. 152, № 5. − С. 1046-1052. https://doi.org/10.7868/S0044451017110190. IF=1.111 (WoS).

9. **Smirnov A. M.**, Golinskaya A. D., Przhiyalkovskii D. V., Kozlova M. V., Saidzhonov B. M., Vasiliev R. B., Dneprovskii V. S. Resonant and Nonresonant Nonlinear Absorption in Colloidal Core/Shell Semiconductor Nanoplatelets // Semiconductors. − 2018. − Т. 52, № 14. − С. 1798-1800. https://doi.org/10.1134/S1063782618140300. IF=0.660 (WoS).

10. **Смирнов А. М.**, Голинская А. Д., Саиджонов Б. М., Васильев Р. Б., Манцевич В. Н., Днепровский В. С. Экситонное поглощение с участием фононов в коллоидных нанопластинах CdSe/CdS // Письма в ЖЭТФ. − 2019. − Т. 109, № 6. − С. 375-380. https://doi.org/10.1134/S1063776117110127. IF=1.400 (WoS).

11. **Смирнов А. М.**, Голинская А. Д., Жаркова Е. В., Козлова М. В., Саиджонов Б. М., Васильев Р. Б., Днепровский В. С. Насыщение поглощения экситонов в нанопластинках CdSe/CdS при их нестационарном возбуждении // Письма в ЖЭТФ. − 2019. − Т. 109, № 7. − С. 466-472. https://doi.org/10.1134/S0370274X19070063. IF=1.400 (WoS).

12. **Smirnov A. M.**, Golinskaya A. D., Kotin P. A., Dorofeev S. G., Palyulin V. V., Mantsevich V. N., Dneprovskii V. S. Photoluminescence and nonlinear transmission of Cu-doped CdSe quantum dots // Journal of Luminescence. − 2019. − Т. 213. − С. 29-35. https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2019.05.001. IF=4.171(WoS).

13. **Smirnov A. M.**, Mantsevich V. N., Smirnov D. S., Golinskaya A. D., Kozlova M.

V., Saidzhonov B. M., Dneprovskii V. S., Vasiliev R. B. Heavy-hole and light-hole excitons in nonlinear absorption spectra of colloidal nanoplatelets // Solid State Communications. − 2019. − Т. 299. − С. 113651. https://doi.org/10.1016/j.ssc.2019.113651. IF=1.934 (WoS).

14. **Smirnov A. M.**, Golinskaya A. D., Zharkova E. V., Bubenov S. S., Dorofeev S. G., Dneprovskii V. S. Differential Absorption Features of CdSe QDs in the Case of Resonant and Nonresonant Excitons Excitation // Semiconductors. − 2019. − Т. 53, № 16. − С. 2155-2157. https://doi.org/10.1134/S1063782619120285. IF=0.660 (WoS).

15. **Smirnov A. M.**, Golinskaya A. D., Kotin P. A., Dorofeev S. G., Zharkova E. V., Palyulin V. V., Mantsevich V. N., Dneprovskii V. S. Damping of Cu-Associated Photoluminescence and Formation of Induced Absorption in Heavily Cu-Doped CdSe Quantum Dots // The Journal of Physical Chemistry C. − 2019. − Т. 123, № 45. − С. 27986-27992. https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b09918. IF=4.177 (WoS).

16. **Smirnov A. M.**, Ezhova K. V., Mantsevich V. N., Dneprovskii V. S. Dynamic photonic crystal in a colloidal quantum-dot solution: formation, structure analysis, and dimensionality switching // Optics Letters. − 2020. − Т. 45, № 8. − С. 2415-2418. https://doi.org/10.1364/OL.389127. IF=3.560 (WoS).

17. **Smirnov A. M.**, Golinskaya A. D., Kozlova M. V., Zharkova E. V., Saidzhonov B. M., Vasiliev R. B., Dneprovskii V. S. Nonlinear Optical Response of the Colloidal CdSe Nanoplatelets under One-Photon Stationary Excitons Excitation // Semiconductors. − 2020. − Т. 54, № 14. − С. 1907-1910. https://doi.org/10.1134/S1063782620140304. IF=0.660 (WoS).

18. **Smirnov A. M.**, Golinskaya A. D., Saidzhonov B. M., Vasiliev R. B., Mantsevich V. N., Dneprovskii V. S. Exciton-exciton interaction and cascade relaxation of excitons in colloidal CdSe nanoplatelets // Journal of Luminescence. − 2021. − Т. 229. − С. 117682. https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117682. IF=4.171 (WoS).

19. Golinskaya A. D., **Smirnov A. M.**, Kozlova M. V., Zharkova E. V., Vasiliev R. B., Mantsevich V. N., Dneprovskii V. S. Tunable blue-shift of the charge-transfer photoluminescence in tetrapod-shaped CdTe/CdSe nanocrystals // Results in Physics. − 2021. − Т. 27. − С. 104488. https://doi.org/10.1016/j.rinp.2021.104488. IF=4.565 (WoS).

20. **Smirnov A. M.**, Golinskaya A. D., Mantsevich V. N., Kozlova M. V., Ezhova K. V., Saidzhonov B. M., Vasiliev R. B., Dneprovskii V. S. Optical gain appearance in the CdSe/CdS nanoplatelets colloidal solution // Results in Physics. − 2022. − Т. 32. − С. 105120. https://doi.org/10.1016/j.rinp.2021.105120. IF=4.565 (WoS).

Личный вклад автора в подготовку публикаций является определяющим, в том числе, в разработку и описание основных идей теоретических моделей, основной части экспериментов, а также в анализе экспериментальных результатов и разработке новых экспериментальных подходов.

На автореферат диссертации поступили 7 дополнительных отзывов, все положительные.

Диссертационный совет отмечает, что представленная диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решены важные научные проблемы: установлены особенности нелинейно-оптических процессов, приводящих к модуляции поглощения и фотолюминесценции коллоидных растворов квантовых точек (КТ), легированных медью КТ, а также квази-двумерных нанокристаллов на основе селенида кадмия; определены основные закономерности взаимодействия и релаксации экситонов в исследуемых полупроводниковых нанокристаллах; выявлены процессы, ответственные за эффективность самодифракции лазерных импульсов на наведенной в коллоидном растворе КТ CdSe/ZnS дифракционной решётке при одно- и двухфотонном возбуждении экситонов в зависимости от отстройки возбуждающего лазерного излучения от резонансной частоты экситонного перехода; кроме

этого, был впервые реализован предложенный автором метод формирования динамических фотонных кристаллов взаимодействующими лазерными импульсами.

Диссертация представляет собой самостоятельное законченное исследование, обладающее внутренним единством. Положения, выносимые на защиту, содержат новые научные результаты и свидетельствуют о личном вкладе автора в науку:

1. Модуляция экситонного поглощения с насыщением в коллоидных КТ CdSe/ZnS и CdSe определяется процессом заполнения состояний, сопровождаемым экситон-фононным взаимодействием, поглощением возбужденными носителями и низкочастотным штарковским сдвигом, вклад которых существенно зависит от интенсивности возбуждающих наносекундных импульсов в диапазоне 0,3 – 10 МВт/см^2 и смещения длины волны накачки в пределах линии неоднородно уширенного экситонного перехода $1S_{h3/2} – 1S_e$.

2. Основными эффектами, приводящими к нелинейной модуляции поглощения коллоидных растворов нанопластинок при однофотонном возбуждении, выступают процесс заполнения фазового пространства экситонов, экситон-фононное взаимодействие и обмен энергией между экситонами с тяжелыми и лёгкими дырками. Экситон-экситонное взаимодействие ограничивает амплитуду модуляции поглощения ввиду ускоренной релаксации экситонов.

3. Модуляция экситонного поглощения и интенсивность насыщения примесной ФЛ в коллоидных растворах нанотетраподов CdSe определяются степенью их легирования. При однофотонном возбуждении экситонов в диапазоне интенсивностей от 0,1 кВт/см^2 до 11 МВт/см^2 интенсивность примесной ФЛ коллоидных растворов нанотетраподов CdSe возрастает с увеличением числа легирующих атомов до величины, при которой начинает доминировать концентрационный механизм тушения ФЛ, влекущий уменьшение модуляции экситонного поглощения.

4. Управление спектром ФЛ гетероструктурных нанотетраподов реализуется увеличением интенсивности возбуждении экситонов. Зависящий от интенсивности накачки коротковолновый сдвиг линии ФЛ, связанной с непрямым оптическим переходом в нанотетраподах CdTe/CdSe, достигает значения 0,13 эВ при стационарном возбуждении экситонов наносекундными импульсами с интенсивностью до 14 МВт/см^2 и объясняется ростом радиуса экситонов в процессе заполнения экситонных состояний. Излучательная рекомбинация на прямых экситонных переходах в компонентах нанотетраподов CdTe/CdSe становится существенной при интенсивности возбуждения, превышающей интенсивность насыщения поглощения непрямого экситонного перехода.

5. Самодифракция ультракоротких лазерных импульсов на нестационарной дифракционной решётке в сильнопоглощающих коллоидных растворах нанокристаллов сопровождается самодифракцией типа Френеля на наведённом канале прозрачности и определяется модуляцией показателей поглощения и преломления при однофотонном возбуждении экситонов.

6. Смещение суммарной энергии двух фотонов от энергии экситонного перехода определяет эффективность самодифракции на нестационарной дифракционной решётке в коллоидных растворах КТ. Характер степенной зависимости интенсивности самодифрагированных импульсов от интенсивности возбуждающих импульсов определяется образованием не только фазовой, но и наведённой амплитудной дифракционной решётки в результате процесса четырёхволнового взаимодействия. Величина кубической нелинейной восприимчивости $\chi^{(3)}$ зависит от интенсивности возбуждения из-за штарковского сдвига спектра экситонного поглощения.

7. Разработанный метод, основанный на формировании периодической модуляции показателя преломления и поглощения при возбуждении экситонного перехода $1S_{h3/2} – 1S_e$. в коллоидном растворе КТ пикосекундными лазерными импульсами, позволяет создавать одномерные, двумерные и трёхмерные перестраиваемые динамические фотонные кристаллы при помощи двух, трёх и четырёх взаимодействующих некомпланарных лазерных лучей, соответственно. Размерность ДФК может переключаться изменением количества, геометрии и поляризации взаимодействующих волн. ДФК с перестраиваемыми стоп-зонами

могут быть использованы в качестве динамических узкополосных интерференционных фильтров.

Личный вклад автора в работу является определяющим, в том числе, в формулировке основных идей, предложенных в диссертации, выборе экспериментальных методов и теоретических моделей для объяснения результатов. Все результаты, представленные в работе, получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. Теоретические расчеты, представленные в диссертации, были выполнены при непосредственном участии автора во всех дискуссиях и обсуждениях, а также анализе результатов расчетов.

На заседании 17 ноября 2022 г. диссертационный совет принял решение присудить Смирнову Александру Михайловичу ученую степень доктора физико-математических наук по специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников».

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 22 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 18, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель диссертационного совета
МГУ.013.5
Доктор физико-математических наук,
профессор Перов Николай Сергеевич

Ученый секретарь диссертационного совета
МГУ.013.5
кандидат физико-математических наук Шапаева Татьяна Борисовна

17.11.2022