

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

на правах рукописи

Пеньков Сергей Александрович

Магниточувствительные люминесцентные процессы с участием
триплетных молекул и экситонов в наноструктурах

Специальность 1.3.6 - оптика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Оренбург – 2024

Работа выполнена в Центре лазерной и информационной биофизики и на кафедре радиофизики и электроники Оренбургского государственного университета.

Научный руководитель:

Кучеренко Михаил Геннадьевич, д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры радиофизики и электроники, ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет».

Официальные оппоненты:

Кавокин Кирилл Витальевич, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, Лаборатория Оптики спина имени И.Н. Уральцева, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», г. Санкт-Петербург.

Герасимов Константин Игоревич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Казанский квантовый центр, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань;
старший научный сотрудник, Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН, г. Казань.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта».

Защита состоится «30» мая 2024 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета ФТИ 34.01.03 Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук» по адресу: 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, www.ioffe.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь
диссертационного совета ФТИ 34.01.03,
кандидат физико-математических наук

И.А. Горбунова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В последние годы исследования в области спин-селективных фотореакций с участием триплетных возбуждений получили новое развитие. В целом всплеск интереса обусловлен двумя факторами. С одной стороны – большое количество исследований и активное внедрение органических полупроводниковых полимеров, с другой – тенденцией последних лет является исследование наноразмерных систем. Изучение механизмов возникновения и эволюции электронно-возбужденных состояний и электрических зарядов в этих системах под действием света является важным не только с точки зрения самой физики спин-селективных процессов, но и для таких областей, как органическая электроника, нанофотоника, сенсорика и биосенсорика, спинтроника и т.д.

Сегодня оптические методы, применяемые для изучения явлений со спиновой селекцией, охватывают все большее число различных областей, начиная от оптического обнаружения магнитного резонанса и магнитно-резонансного обнаружения спиновой поляризации одновременным воздействием постоянного и переменного (СВЧ) магнитных полей (RYDMR (Reaction Yield Detected Magnetic Resonance), ОДМР или ODMR (Optically Detected Magnetic Resonance), FDMR (Fluorescence Detected Magnetic Resonance), ADMR (Absorption Detected Magnetic Resonance), CIDNP (Chemically Induced Dynamic Nuclear Polarization), CIDEP (Chemically Induced Dynamic Electron Polarization) и т.п.), и заканчивая «простым» оптическим детектированием или регистрацией эффекта по выходу реакции, т. е. обнаружению продуктов, зависящих от выходов реакции и использующих лишь постоянное магнитное поле (MPL (Magneto-Photoluminescence), MARY (Magnetically Affected Reaction Yield), MIE (Magnetic Isotope Effects) и т. п.). С развитием спинтроники, нанофотоники и смежных с ними направлений стали особенно востребованными методы оптически детектируемого магнитного резонанса, которые позволяют не только изучать промежуточные состояния пар реагентов, но и дают информацию о характере взаимодействия в них, о движении спиновых центров и временах жизни, а также о распаде когерентности этих промежуточных состояний.

С другой стороны, данные методы близки к методам, используемым в квантовых вычислительных устройствах. В работах последних лет отмечено, что квантовое управление отдельными спинами в конденсированных системах представляет собой новую область технологий, перспективных для мно-

гочисленных приложений в спинтронике, квантовых вычислениях и высокочувствительной магнитометрии.

Продемонстрирована возможность адресного манипулирования отдельными электронными спинами посредством оптического или электрического воздействия. Было показано, что некоторые трудности управления отдельными спинами многоэлектронной системы на нанометровой шкале расстояний могут быть преодолены с помощью техники построения магниторезонансных изображений нанометрового разрешения на основе сканирования в градиентном магнитном поле. Такой метод позволяет достичь не только высокого пространственного разрешения, но и манипулировать когерентными спиновыми состояниями электронов. Улучшение по разрешению достигает 2-х порядков величины по сравнению с оптическими методами, с присущими им дифракционными ограничениями. По мнению ряда авторов, при использовании новой наноскопии станут возможными измерения ранее недоступных характеристик различных материалов, спинового перепутывания и магнитометрических параметров.

Особенности случайных блужданий и столкновений молекул или квазичастиц-экситонов в системах с «ограниченной геометрией» (restricted geometry) изучены недостаточно полно из-за большого числа структурных разновидностей строения наносистем. Дисперсные системы с инородными включениями нанометрового масштаба обеспечивают нетривиальные кинетические режимы развивающихся в них процессов, поэтому и статистика последовательных сближений - расхождений молекул-реагентов в таких системах тоже достаточно специфична. В случае, когда реакции, получающие развитие в наносистемах, являются еще и спин-селективными, возникают дополнительные особенности, связанные с взаимным влиянием пространственных перемещений молекул и спиновой динамики их электронной подсистемы. В одной из работ предлагалось использовать методы магнитолевой модуляции скорости реакций в качестве инструмента для зондирования особенностей строения наноструктур – опосредованно через анализ специфической картины последовательных сближений и удалений реагентов, формирующих аннигиляционный отклик системы на внешнее магнитолевое воздействие.

С появлением органических полупроводниковых полимеров и устройств органической электроники, в которых представлены все типы спин-селективных реакций, их исследованию посвящается огромное количество работ. Явления с участием молекулярного кислорода играют важную роль в надежности устройств, основанных на органических сопряженных полимерах. Данные устройства выходят из строя быстрее, когда работают в присутствии кислорода. Несмотря на то, что фотоокисление, как правило, ухудшает свойства электролюминесцентного устройства, в некоторых случа-

ях умеренное фотоокисление способно улучшить характеристики фотоэлектрических устройств. Таким образом, детальное понимание механизмов влияния молекулярного кислорода на структуру и свойства полимеров с π -сопряженными связями является необходимым условием для улучшения работы устройств на основе данных полимеров. Такая особенность позволяет исследовать участие молекулярного кислорода в различных процессах еще и с точки зрения их спиновой селективности.

Таким образом, по мере развития исследований в вышеописанных областях науки потребность в новых исследованиях магниточувствительных люминесцентных процессов с участием триплетных молекул и экситонов в наноструктурах все более возрастает.

Цель диссертационной работы

Установление особенностей отклика спин-селективных фотопроцессов и сопутствующей им люминесценции на воздействие постоянного и переменного магнитного поля в наночастицах коллоидных систем различной структуры и степени дисперсности.

Защищаемые положения

- Понижение концентрации молекулярного кислорода, вследствие уменьшения давления воздуха с 10^5 Па до 10^2 Па над пленкой органического полупроводника poly[2-methoxy-5-(2-ethylhexyloxy)-1,4-phenylenevinylene] МЕН-PPV, приводит к обращению знака эффекта магнитоиндуцированной люминесценции МЕН-PPV в области значений давления вблизи 49,8 кПа.
- Предложенная модель спиновой динамики триплетных электронных возбуждений в магнитном поле индукции $B_0 = 0,5$ Тл при их взаимной аннигиляции в наноструктурах с бистабильными пространственными состояниями основана на точном решении системы уравнений для матриц плотности «тесной» и «рыхлой» Т-Т-пар и предсказывает 2-х кратное увеличение магнитного эффекта ТТА.
- Установлено влияние геометрических, конфигурационных, кинетических и силовых параметров системы на абсолютную величину относительного изменения скорости реакции Т-D-тушения. Степень такого влияния и характер магнитолевых зависимостей определяется через отношение интенсивностей экситонной фосфоресценции при наличии магнитного поля и в его отсутствие. Получена нелинейно спадающая зависимость абсолютной величины относительного изменения скорости реакции триплет-дублетного тушения в сферической наноструктуре от ее размера в диапазоне 30 – 100 нм.

- Предложенная теоретическая модель взаимной диффузионной миграции реагентов – триплетных молекул и экситонов в наноструктурах с различной формой субъединиц – ячеек или кластеров определяет амплитуду стационарного магнитополевого эффекта аннигиляции (до 12-14%), а также предсказывает экспоненциальную зависимость ширины линий спектров оптически детектируемого магнитного резонанса этих реакций в зависимости от начального радиуса ($r' \sim 45 - 90$ нм) триплет-триплетной пары.

Научная новизна

- Экспериментально обнаружен отрицательный магнитолевой эффект фотолюминесценции органического полупроводника МЕН-PPV, вызванный уменьшением концентрации молекулярного кислорода, вследствие снижения давления воздуха с 10^5 Па до 10^2 Па в полимерном образце. На основе специально созданной кинетической модели впервые продемонстрирована возможность обращения знака эффекта поля при характерных значениях параметров модели в области значений давления вблизи 49,8 кПа, соответствующих условиям эксперимента.
- В задачах прецизионных расчетов спектров оптически детектируемого магнитного резонанса и стационарного магнитополевого эффекта (МПЭ) впервые применен метод двухчастичных диффузионных функций Грина в областях с заданными отражающими границами.
- Предложена и исследована на предмет влияния на спин-зависимую кинетику особенностей в виде потенциальных ям гибридная математическая модель диффузионных процессов в наноструктурах, содержащих триплет-триплетные и триплет-дублетные пары, и базирующаяся на методе диффузионных функций Грина и непосредственном решении уравнений для матриц плотности спин-коррелированных пар с прыжковым механизмом миграции.
- Впервые рассчитаны спектры ОДМР и МПЭ на основе новой гибридной математической модели, специально созданной для наночастиц различной формы с потенциальными барьерами для молекул-реагентов.
- Впервые предложена математическая модель триплет-триплетной аннигиляции с механизмом миграции прыжкового типа, проходящей в сферических реакторах нанометрового радиуса в потенциальном поле двукратного типа.

Практическая значимость

Основной результат работы, состоящий в возможности регулирования миграции триплетных экситонов путем изменения размеров наноструктур органических полупроводников, может найти применение в уже существующих наноструктурированных органических светоизлучающих диодах. Вопросы движения триплетных экситонов и свободных зарядов в таких устройствах чрезвычайно важны, и напрямую влияют на такие параметры как яркость, потребляемая мощность, КПД и т.д.

Наблюдаемый за счет варьирования концентрации молекулярного кислорода эффект переключения знака магнитного отклика может быть использован как для идентификации протекания экситонных реакций в системах различной структурной организации, так и для определения концентрации молекулярного кислорода в основном и возбужденном синглетном состоянии в растворах, полимерных пленках и пористых адсорбентах – при разработке измерителей плотности O_2 в этих системах.

Апробация результатов работы

Полученные в работе результаты докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XI Международная конференция по фотонике и информационной оптике (Москва 2022), International Symposium “Emerging materials and devices” (Нур-Султан, 2021), 5th International Symposium on Molecular Photonics dedicated to the memory of Academician A. N. Terenin (1896-1967) (2021, St. Petersburg), IX Международная конференция по фотонике и информационной оптике (Москва, 2020), «Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры» (Оренбург 2012, 2013, 2017–2021), 3-й Международный симпозиум «Молекулярная фотоника», посвященный академику А.Н. Теренину (Санкт-Петербург, 2012), «Химическая физика молекул и полифункциональных материалов» (Оренбург, 2014, 2018, 2020), Современная химическая физика (г. Туапсе, 2016), Современная химическая физика (г. Туапсе, 2015), «Наука и образование: фундаментальные основы, технологии, инновации», посвященной 60-летию Оренбургского государственного университета (Оренбург 2015).

Участие в научных проектах

Автор диссертации являлся одним из исполнителей следующих научных проектов: «Разработка методов формирования упорядоченных массивов наноструктур на основе оксида алюминия для люминесцентных сенсоров кислорода» (ФЦП, ГК 16.513.11.3042), «Плазмонные эффекты трансформации энергии электронного возбуждения молекулярных систем и

квантовых точек вблизи проводящих поверхностей и нанотел» (госзадание № 2.1180.2011), «Исследование плазмонных свойств двухкомпонентных композитных наночастиц для определения ближнепольных оптических характеристик гибридных молекулярных систем» (госзадание № 233), «Разработка гибридных экситон-плазмонных наносистем, перспективных для создания новых устройств молекулярной электроники и фотоники» (грант РФФИ и правительства Оренбургской обл. № 14-02-97000), «Плазмонная передача энергии и повышение эффективности свечения молекулярных источников на поверхности цилиндрических наноструктур» (грант РФФИ и правительства Оренбургской обл. № 16-42-560671), «Повышение эффективности работы органических светодиодов с помощью магнитного поля» (областной грант Правительства Оренбургской области Соглашение № 16 от 30.06.2016), «Плазмонные характеристики слоистых нанокompозитных частиц со структурой «ядро — оболочка», многочастичных кластеров и пространственных решеток на их основе» (№ 3.7758.2017/БЧ), «Инактивация патогенных микроорганизмов и деструкция бактериальных пленок в реакциях с участием высоковозбужденных состояний фотосенсибилизаторов» № FSGU-2020-0003. Молекулярные процессы и реакции с участием высоковозбужденных состояний фотосенсибилизаторов (Группа проф. Кучеренко М.Г.), «Альтернативные физико-химические методы инактивации патогенных микроорганизмов» № FSGU-2023-0003. Молекулярные процессы и реакции с участием высоковозбужденных состояний фотосенсибилизаторов (Группа проф. Кучеренко М.Г.).

Лауреат премии Губернатора Оренбургской области для талантливой молодежи в 2015 году (Указ Губернатора Оренбургской области от 30.11.2015 г. № 894 – ук).

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 25 работах, из них 8 статей в реферируемых журналах, в том числе входящих в международные наукометрические базы Scopus и Web of Science: Журнал прикладной спектроскопии, Journal of Macromolecular Science - Physics, Оптика и спектроскопия, Химическая физика и мезоскопия, а также 17 работ в сборниках трудов научных конференций различного уровня. Список этих публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 158 страниц основного текста, 72 рисунка, 5 таблиц, 121 формулу и 196 библиографических наименований.

Личный вклад автора

Экспериментальные результаты и результаты численной реализации моделей, предоставленных проф. Кучеренко М.Г. и разработанных с ним совместно, получены автором лично или при его непосредственном участии.

Содержание работы

Во введении дана краткая ретроспектива исследований и методов в области спин-селективных триплетных и триплет-дублетных реакций, обоснована актуальность темы, сформулированы цель и защищаемые положения, обосновывается научная и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе даны основные сведения о видах спин-селективных реакций с участием спиновых электронных триплетов, представлен обзор литературы, посвященный магнитополевым эффектам и ОДМР спектроскопии T-T и T-D пар. Рассмотрено современное состояние направления исследований, объединяющего спин-селективные бимолекулярные процессы с участием триплетных возбуждений, освещены современные работы, посвященные исследованию наноструктур с внедренными триплетными и дублетными примесями, которые представляют большой интерес для применений в электронике и оптоэлектронике.

Вторая глава посвящена методике и технике эксперимента. Дан обзор экспериментальных установок и методов, примененных при исследованиях. Дается описание спектрально-люминесцентных свойств молекул веществ, использованных в ходе работы. Приводятся схемы оптических экспериментальных установок, адаптированных под магнитные измерения.

В экспериментах по время-разрешенной люминесценции, возбуждение образцов производилось лазерными импульсами 10 нс с частотой следования 6 Гц. Регистрация фотолюминесценции, пропущенной через монохроматор, производилась с помощью ФЭУ, а сам сигнал измерялся с помощью осциллографа. Система регистрации предусматривала возможность запираания ФЭУ, позволяющего избавиться от высокоинтенсивной составляющей зарегистрированного сигнала (рассеянный свет и быстрая флуоресценция) и усилить таким образом фосфоресценцию и замедленную флуоресценцию.

Основу установки спектроскопии временного разрешения составляет им-пульсный лазер LQ529B (рис 1). Данный лазер работает на кристалле Nd³⁺:YAG, и способен выдавать излучение на 4-х длинах волн: 1064 нм (основная гармоника), 532, 355 и 266 нм (2-я, 3-я и 4-я гармоники, соответственно, преобразованные с помощью нелинейно-оптического кристалла). Номинальная длительность импульса лазера составляет 10 нс.

Для осуществления магнитополевых измерений фотолюминесценции была собрана установка, позволяющая управляемо воздействовать на иссле-

дуремые образцы. При проведении экспериментов по наблюдению магнитно-полевых измерений фотолюминесценции, установка сопрягается с спектрофлуориметрической установкой. Данная установка позволяет выполнять развертку магнитного поля в диапазоне 0 – 600 мТл, а также измерять и выводить значение магнитного поля на экране компьютера в режиме реального времени. Для питания катушек электромагнита использовались управляемые по USB каналу источники тока АТН-1351, которые позволяют изменять напряжение в диапазоне 0 – 400 В, или ток в диапазоне 0 – 400 мА.

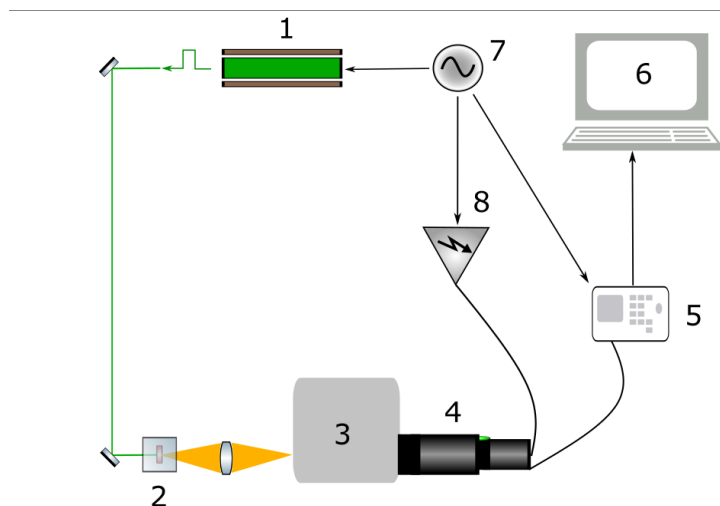


Рис. 1 Схема установки для измерения время-разрешенной люминесценции. 1 - импульсный лазер LQ529B, 2 – образец в оптической с возможностью откачки, 3 - монохроматор МДР-206, 4 - ФЭУ-74, 5 -осциллограф, 6 - компьютер, 7 - генератор запускающих импульсов, 8 – генератор запираия ФЭУ.

Ключевым элементом в измерителе индукции магнитного поля является датчик Холла ДХК-0.5А. Напряжение, снимаемое с датчика Холла усиливалось инструментальным усилителем AD620 и подавалось на вход АЦП, который, в свою очередь производил оцифровку и отправку значения индукции магнитного поля в персональный компьютер.

В третьей главе, методом магнитозависящей фотолюминесценции, исследованы тонкие пленки при изменяющемся парциальном давлении кислорода (рис. 2 а и рис. 2 б), а также наночастицы МЕН-PPV, внедренные в полимерную матрицу ПВБ. При пониженном давлении воздуха обнаружен отрицательный магнитный отклик фотолюминесценции, тогда как при атмосферном давлении магнитный отклик положителен. Для объяснения обнаруженного переключения знака эффекта магнитного поля предложена матема-

тическая модель, включающая основные конкурирующие бимолекулярные процессы экситон-иницированных реакций с участием молекулярного кислорода. Результаты расчетов, проведенных на основе этой модели, хорошо согласуются с экспериментальными результатами, что позволяет оценить такие важные кинетические параметры как соотношения времен жизни триплетного экситона МЕН-PPV и синглетного кислорода, а также бимолекулярных скоростей реакций ТТА и Т-О₂ тушения. Предложен механизм формирования отрицательного магнитного эффекта фотолюминесценции в случае наночастиц.

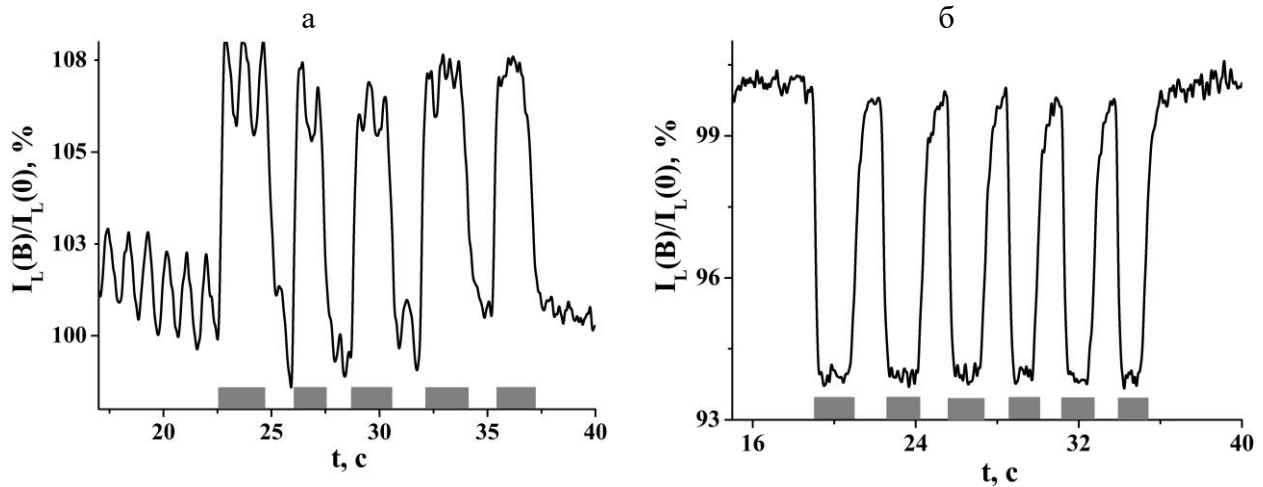
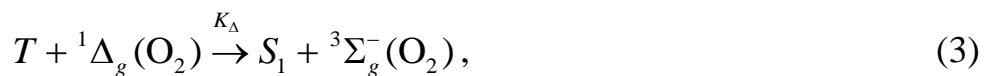
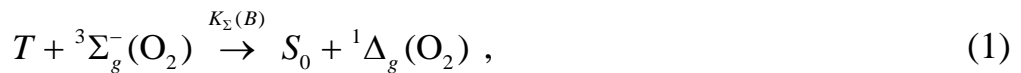


Рис. 2 Осциллограммы промодулированной магнитным полем люминесценции МЕН-PPV при атмосферном давлении (а) и при давлении воздуха P=100 Па (б). Выделенные интервалы времени – интервалы воздействия импульсным магнитным полем с индукцией 340 мТл.

Как известно, часть подвергнутых облучению молекул, возбуждаемых в синглетное состояние, переходят, затем, в метастабильное триплетное состояние. В общем случае, молекулы в триплетном состоянии могут быть дезактивированы молекулярным кислородом, находящимся в своем основном состоянии (1), а также за счет триплет-триплетной аннигиляции (ТТА) по схеме (2):



Реакция Т-¹Δ_g(O₂)-аннигиляции (3) сопровождается замедленной флуоресценцией, поскольку ее продуктом является локального синглет-

возбужденного состояния люминофора. Здесь, в реакциях (1)-(3) использованы следующие обозначения: ${}^3\Sigma_g^-(O_2)$, ${}^1\Delta_g(O_2)$ - основное триплетное и возбужденное синглетное состояния молекулярного кислорода. S_0 , S_1 , T - основное синглетное, первое возбужденное синглетное и триплетное состояния люминофора, соответственно, $K_\Sigma(B)$ и $K_T(B)$ - магнитозависимые бимолекулярные константы скорости T - ${}^3\Sigma_g^-(O_2)$ -тушения и ТТА, а K_Δ - константа скорости T - ${}^1\Delta_g(O_2)$ - кросс-аннигиляции, не зависящая от магнитного поля.

В этом случае, кинетика населенности $n_T(t)$ триплетных экситонов люминофора и $n_\Delta(t)$ синглетных возбужденных состояний ${}^1\Delta_g(O_2)$ кислорода в магнитном поле индукции B определяется нелинейными дифференциальными уравнениями первого порядка

$$\frac{d}{dt}n_T(t) = Q_T - \frac{1}{\tau_T}n_T(t) - [K_\Sigma(B)n_{ox}n_T(t) - (K_\Sigma(B) - K_\Delta)n_\Delta(t)n_T(t)] - K_T(B)n_T^2(t), \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt}n_\Delta(t) = -\frac{1}{\tau_\Delta}n_\Delta(t) - [K_\Sigma(B) + K_\Delta]n_T(t)n_\Delta(t) + K_\Sigma(B)n_{ox}n_T(t), \quad (5)$$

$$n_\Sigma(t) + n_\Delta(t) = n_{ox},$$

где $K_\Sigma(B)$ и $K_T(B)$ - магнитозависимые бимолекулярные константы скорости T - ${}^3\Sigma_g^-(O_2)$ - тушения и Т-Т-аннигиляции; Q_T - постоянная плотность скорости генерации T -состояний; τ_T - время жизни T -состояния; n_{ox} - суммарная концентрация молекул O_2 в пленке - тушителей T -экситонов; τ_Δ - время жизни возбужденных синглетных состояний молекул кислорода. Константа скорости K_Δ кросс-аннигиляции не зависит от магнитного поля, поскольку процесс T - ${}^1\Delta_g(O_2)$ - кросс-аннигиляции не является спин-селективным.

В стационарном случае, при $Q_T = const$, из (4) и (5) получаем уравнение для стационарной населенности n_T :

$$Q_T - \frac{1}{\tau_T}n_T - \left[K_\Sigma(B)n_{ox} - \frac{(K_\Sigma(B) - K_\Delta)K_\Sigma(B)n_{ox}\tau_\Delta}{1 + (K_\Sigma(B) + K_\Delta)n_T(B)\tau_\Delta} n_T \right] n_T(B) - K_T(B)n_T^2 = 0.$$

Данное кубическое уравнение для плотности n_T сводится к квадратному в 3-х простых случаях: 1) при слабой накачке; 2) при условии короткого

времени жизни τ_{Δ} возбужденных синглетных состояний молекул кислорода, и/или слабой накачки; 3) при относительно сильной накачке, или большом времени жизни τ_{Δ} синглетных возбуждений кислорода.

Четвертая глава посвящена теоретическому исследованию спин-селективных реакций в наноструктурах при воздействии постоянного магнитного поля и расчетам магнитолевых эффектов (МПЭ).

Взаимная аннигиляция триплетных электронных возбуждений в наноструктурах с бистабильными пространственными состояниями в магнитном поле.

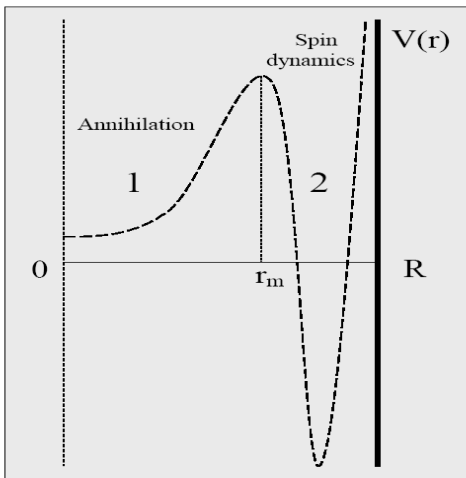


Рис. 3 Двухямный потенциал сферической поры радиуса R . Один из молекулярных Т-центров закреплён в точке 0. Другой – стохастически перемещается из ямы 1 в яму 2 и обратно.

Скорости прыжков Γ_1 и Γ_2 между ямами будем полагать различными и постоянными.

Спин-гамильтониан «плотной» Т-Т-пары может быть записан в виде:

$$H = g^{(1)} \mu_B B S_Z^{(1)} + g^{(2)} \mu_B B S_Z^{(2)} - 2J_{exc}(r) \mathbf{S}_1 \mathbf{S}_2 - \mathbf{S}_1 \mathbf{D}(\Omega_1) \mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2 \mathbf{D}(\Omega_2) \mathbf{S}_2.$$

Первые два слагаемых определяют зеемановское взаимодействие одиночных триплетов (с различными g -факторами) Т-Т-пары с внешним магнитным полем индукции B , третье – межтриплетное обменное взаимодействие с обмен-

В данном разделе рассматривается сферическая наночайка-реактор радиуса R , внутри объема которой находится пара двух триплетных молекул разного сорта. Предполагается, что один Т-центр когерентной Т-Т-пары локализован в центре ячейки (полости), а другой способен перемещаться внутри объема, попадая то в одну, то в другую потенциальную яму радиально-зависящего поля $V(r)$.

В зависимости от того в какой пространственной конфигурации находится Т-Т-пара (в «плотном» или «рыхлом» состоянии) введем соответствующие операторы плотности $\rho_1(t)$ и $\rho_2(t)$. Таким образом, нижний индекс будет обозначать принадлежность подвижной Т-молекулы к потенциальной яме 1 или 2.

ным интегралом $J_{exc}(r)$, а два последних – внутритриплетное спин-спиновое взаимодействие. Операторы $\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2$ – векторные операторы электронных спинов молекул 1 и 2; $\mathbf{D}(\Omega_{1(2)})$ – тензор диполь-дипольного взаимодействия. Тогда как спин-гамильтониан «рыхлой» Т-Т-пары не содержит обменного взаимодействия

$$H_0 = g^{(1)} \mu_B B S_Z^{(1)} + g^{(2)} \mu_B B S_Z^{(2)} - \mathbf{S}_1 \mathbf{D}(\Omega_1) \mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2 \mathbf{D}(\Omega_2) \mathbf{S}_2$$

Тогда вместо одного операторного уравнения можем записать следующую систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \rho_1(t) = -\frac{i}{\hbar} [H, \rho_1(t)] - \frac{1}{2} \{ \rho_1 \Lambda + \Lambda \rho_1 \} - K_{-1} \rho_1(t) - \Gamma_1 \rho_1(t) + \Gamma_2 \rho_2(t) \\ \frac{d}{dt} \rho_2(t) = -\frac{i}{\hbar} [H_0, \rho_2(t)] - K_{-2} \rho_2(t) + \Gamma_1 \rho_1(t) - \Gamma_2 \rho_2(t) \end{cases},$$

Аннигиляционный оператор Λ определяется через проектор P_S на синглетное состояние Т-Т-пары и фиксированную скорость K_S реакции в виде $\Lambda = K_S |00\rangle\langle 00|$. K_{-1} и K_{-2} скорости распада «плотной» и «рыхлой» пары. Для высокого барьера $\Delta E_i \gg k_B T$ и режима сильного трения частоты переходов Γ_1 и Γ_2 между ямами определяются формулой Крамерса. Из данной системы уравнений можно получить точное интегральное уравнение для оператора плотности $\rho_1(t)$:

$$\begin{aligned} \rho_1(t) = \exp(-\alpha_1 t) U(t) \left[\rho_1(0) + \Gamma_2 \left(\int_0^t \exp(\Delta \alpha t') U(-t') U_0(t') \rho_2(0) U_0^+(t') U^*(-t') dt' \right) + \right. \\ \left. + \Gamma_1 \Gamma_2 \left(\int_0^t \exp(\Delta \alpha t') U(-t') U_0(t') \left(\int_0^{t'} \exp(\alpha_2 t'') U_0^+(t'') \rho_1(t'') U_0(t'') dt'' \right) U_0^+(t') U^*(-t') dt' \right) \right] U^*(t), \end{aligned}$$

где $U(t) = \exp(Kt)$, $U^*(t) = \exp(K^*t)$, а неэрмитов оператор K определен соотношениями

$$K = -\frac{i}{\hbar} \left(H - i \frac{\hbar}{2} \Lambda \right), \quad K^* = \frac{i}{\hbar} \left(H + i \frac{\hbar}{2} \Lambda \right)$$

Проведенные на базе предложенной модели расчеты подтверждают эффект подавления скорости пополнения населенности синглетного состояния

пары с увеличением обменной энергии. Внутримолекулярное спин-спиновое взаимодействие является основным, наряду с «дельта g» механизмом заселения синглетного спинового состояния пары. Расчеты показывают, что эффект магнитопольевой модуляции скорости триплет-триплетной аннигиляции пар, заключенных в наноячейках, наиболее заметен при соотношении частот спиновой эволюции, обусловленной «дельта g»-механизмом и механизмом спин-спинового взаимодействия как 1: 10.

Тушение триплетных экситонов дублетными центрами в нанореакторе при наличии внешнего магнитного поля.

В данном разделе рассматривается процесс спин-селективного тушения триплетного экситона спиновым дублетом в наночастице органического полупроводника при наличии постоянного внешнего магнитного поля. Акт T-D тушения проходит через парное спиновое дублетное D состояние ($S=1/2$), которое может смешиваться с парным квадруплетным Q ($S=3/2$) состоянием T-D- пары:



где S_0 – основное состояние донора энергии, а ${}^{2,4}(T...D)$ – спин-коррелированная триплет-дублетная (T-D) пара частиц. Звездочка в указывает на возбужденное состояние реагента, промежуточного комплекса и продукта. Спин-гамильтониан такой T-D-пары имеет вид:

$$H = g_T \mu_B B S_{Tz} + g_D \mu_B B S_{Dz} - 2J_{exc}(r) \mathbf{S}_D \mathbf{S}_T - \mathbf{S}_T \tilde{\mathbf{D}} \mathbf{S}_T,$$

где два первых слагаемых - энергии зеемановского взаимодействия триплетного экситона (T) и дублетного центра (D) с внешним магнитным полем; третье слагаемое отражает межмолекулярное обменное взаимодействие, а четвертое – внутритриплетное спин-спиновое взаимодействие. Операторы $\mathbf{S}_T, \mathbf{S}_D$ – векторные операторы электронных спинов; $\tilde{\mathbf{D}}$ – тензор внутритриплетного спинового диполь-дипольного взаимодействия; $J_{exc}(r)$ - межмолекулярный обменный интеграл; g_T, g_D – g-факторы реагентов; μ_B – магнетон Бора. Диффузия триплетных экситонов в нанобласти шаровой формы описывалась диффузионным оператором в сферической системе координат. Тогда в сферической системе координат с осью z, ориентированной вдоль некоторого вектора М (например магнитного дипольного момента), определяющего аксиально симметричное поле в полости, функция Грина $G_1(r, \theta, \varphi, t)$ каждой из двух аннигилирующих частиц может быть записана в виде:

$$\begin{aligned}
G_1(r, \theta, \varphi, t | r', \theta', \varphi') = & \\
= & \left\{ \frac{3}{4\pi R^3} + \sum_{n=1}^{\infty} \exp \left[-\frac{D}{R^2} (\mu_n^{(0)})^2 t \right] \frac{J_{1/2}(\mu_n^{(0)} r / R) J_{1/2}(\mu_n^{(0)} r' / R)}{2\pi R^2 \sqrt{rr'} J_{1/2}^2(\mu_n^{(0)})} \right\} + \\
& + \sum_{n,l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^l \exp \left[-\frac{D}{R^2} (\mu_n^{(l)})^2 t \right] \frac{(2l+1)(l-m)! J_{l+1/2}(\mu_n^{(l)} r / R) J_{l+1/2}(\mu_n^{(l)} r' / R)}{(1+\delta_{m0})\pi R^2 (l+m)! \sqrt{rr'} J_{l+1/2}^2(\mu_n^{(l)}) \left[1 - l(l+1) / (\mu_n^{(l)})^2 \right]} \times \\
& \times P_l^m(\cos \theta) \cdot P_l^m(\cos \theta') \cos m(\varphi - \varphi')
\end{aligned} \tag{6}$$

где $J_{l+1/2}(\mu_n^{(l)})$ - функции Бесселя полуцелого индекса; $P_l^m(\cos \theta)$ – присоединенные полиномы Лежандра; $\mu_n^{(l)}$ – положительные корни уравнения $2\mu_n^{(l)} \cdot J'_{l+1/2}(\mu_n^{(l)}) - J_{l+1/2}(\mu_n^{(l)}) = 0$.

Неселективная по спину средняя скорость $\chi(t | \mathbf{r}'_1, \mathbf{r}'_2)$ реакции Т-D-тушения определяется выражением:

$$\chi(t | \mathbf{r}'_1, \mathbf{r}'_2) = \iint_{V_R} U(|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|) G_1(\mathbf{r}_1, t | \mathbf{r}'_1) G_1(\mathbf{r}_2, t | \mathbf{r}'_2) d^3 r_1 d^3 r_2, \tag{7}$$

где $G_1(r, \theta, \varphi, t | r', 0)$ - одночастичные диффузионные функции Грина реагентов, а $U(|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|)$ - изотропная скорость дистанционного тушения по обменному механизму, аппроксимируемая экспоненциальной функцией. Координаты $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}'_1$ в (7) относятся к Т-экситону, а $\mathbf{r}_2, \mathbf{r}'_2$ – к тушащему D-центру.

На основе вышеизложенной модели были произведены расчеты магнитопольных эффектов $\gamma(B)$ реакции Т-D-тушения в шаровой нанобласти, и проведен анализ полученных зависимостей величины эффекта от ряда параметров. В частности, обнаружено, что уменьшение радиуса наночастицы органического полупроводника и стартовой дистанции между реагентами «триплетный экситон – дублетный сток-акцептор» в Т-D-паре ведет к повышению магниточувствительности и эффективности реакции спин-селективного тушения триплетов (рис.4).

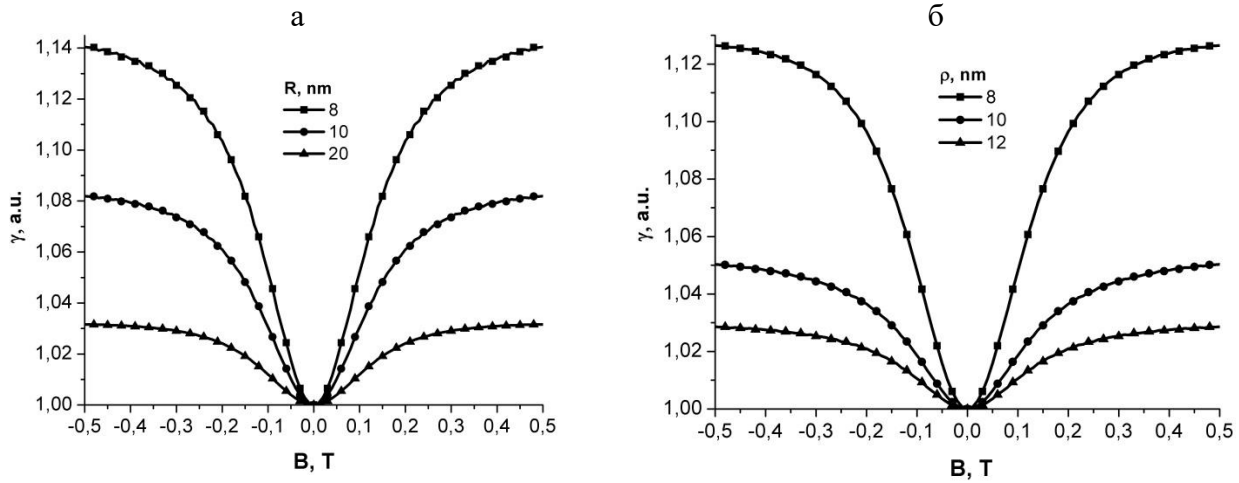


Рис. 4 Магнитопольные зависимости скорости Т-Д-тушения а) при различных значениях радиуса R наночастицы-реактора; б) при различных значениях начального расстояния $\rho = |\mathbf{r}'_1 - \mathbf{r}'_2|$ между реагентами.

Пятая глава посвящена теоретическому исследованию спин-селективных реакций с участием триплетных молекул и экситонов, локализованных в наноструктурах, при воздействии переменного магнитного поля и расчетам спектров оптически детектируемого магнитного резонанса.

Особенности детектирования магнитного резонанса реакций триплетных молекул по аннигиляционной замедленной флуоресценции в наноструктурированных средах.

Спин-гамильтониан Т-Т-пары с учетом СВЧ поля в системе координат (ВСК) вращающейся с угловой скоростью ω может быть записан в виде:

$$\hat{H}_{rot} = (g\mu_B B_0 - \omega)\hat{S}_{1z} + (g\mu_B B_0 - \omega)\hat{S}_{2z} - \hat{\mathbf{S}}_1 \vec{\mathbf{D}} \hat{\mathbf{S}}_1 - \hat{\mathbf{S}}_2 \vec{\mathbf{D}} \hat{\mathbf{S}}_2 + g_1 \mu_B B_1 \hat{S}_{1x} + g_2 \mu_B B_1 \hat{S}_{2x}$$

где два первых слагаемых правой части определяют энергию зеемановского взаимодействия триплетных молекул с магнитным полем индукции \mathbf{B}_0 ; третье и четвертое – внутритриплетное спин-спиновое взаимодействие. Операторы $\hat{\mathbf{S}}_1, \hat{\mathbf{S}}_2$ – векторные операторы электронных спинов триплетных молекул; $\vec{\mathbf{D}}$ – тензор внутритриплетного спинового диполь-дипольного взаимодействия, а g и μ_B – соответственно g -фактор триплетной молекулы и магнетон Бора. Одночастичная диффузионная функция Грина и неселективная по спину средняя скорость триплет-триплетной аннигиляции определялись на основе выражений (6) и (7) соответственно.

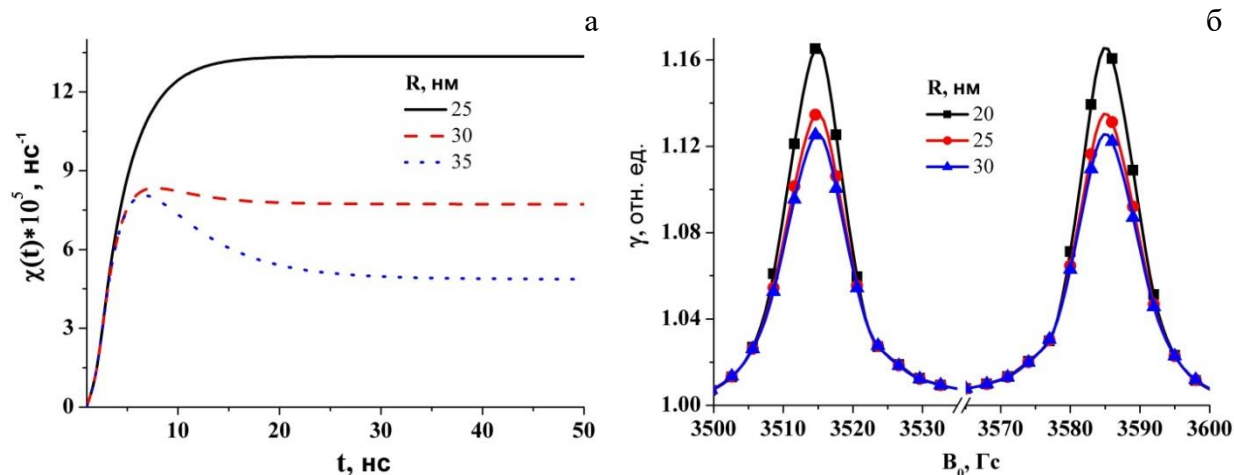


Рис. 5 Средняя без учета спиновой населенности состояний Т-Т-пары скорость бимолекулярной реакции аннигиляции (а) и DFDMR спектры ТТА экситонов (б) при различных радиусах кристаллической наночастицы и фиксированном значении начального радиуса $r' = 20$ нм подвижного триплетного возбуждения. Параметры тонкой структуры $D=70$ Гс и $E=10$ Гс. Коэффициент диффузии экситона $D_{\text{diff}} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$.

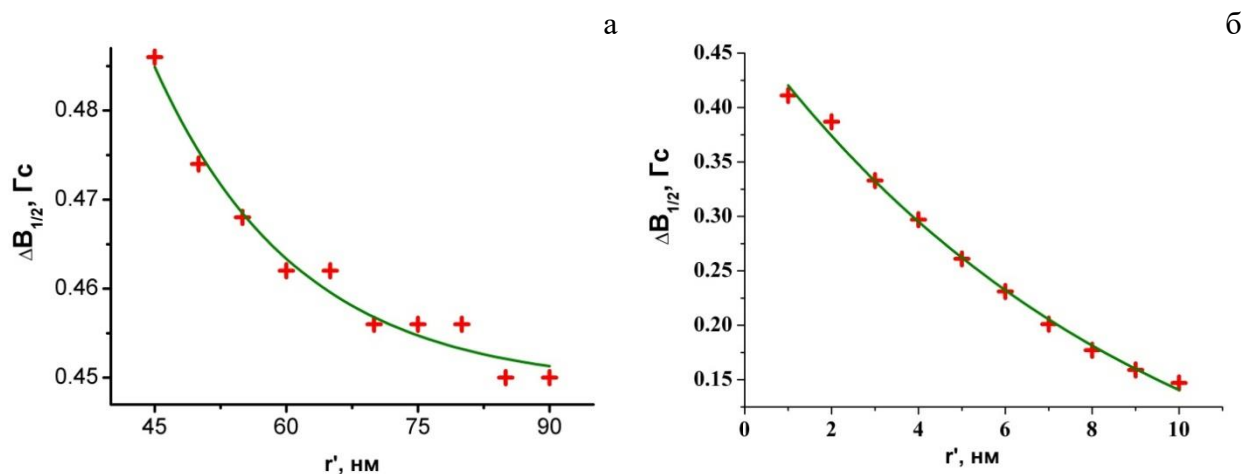


Рис. 6 Значения полуширин линий магнитного резонанса ТТА (отмечены точками) и аппроксимирующие зависимости от начального расстояния r' между триплетами пары в молекулярном нанокристалле (а) и сферической нанополости, заполненной жидкостью (б).

Таким образом, спектры магнитного резонанса триплет-триплетной аннигиляции электронных возбуждений молекул, детектированные по замедленной флуоресценции аннигиляционного типа, отражают характер относительного движения триплетных возбуждений и дают информацию об особенностях случайных блужданий частиц в наноструктурированных средах с различной пространственной организацией.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

- Исследована замедленная фотолюминесценция (ЗФ) пленок МЕН-PPV во внешнем магнитном поле в условиях изменяющегося парциального давления кислорода в системе. Обнаружено переключение знака эффекта магнитного поля при некотором критическом значении концентрации молекул O_2 в полимерном образце. Для объяснения наблюдаемого изменения магнитного отклика свечения предложена математическая модель совокупности параллельно протекающих экситон-инициированных реакций с участием кислорода. Произведены расчеты величины магнитного эффекта ЗФ, на примере которых продемонстрировано переключение знака магнитного отклика, в соответствии с наблюдаемым в эксперименте. Обнаружено обращение знака магнитополевого эффекта фотолюминесценции наночастиц МЕН-PPV, внедренных в матрицу поливинилбутираля (ПВБ). Такое изменение влияния магнитного поля было объяснено преобладанием процесса триплет-триплетной аннигиляции (ТТА) над делением синглетного экситона (SEF) в наночастицах.
- Рассмотрена спиновая динамика спин-селективного тушения триплетного электронно-возбужденного состояния спиновым дублетом D. С учетом обменного, спин-спинового и зеемановского взаимодействий в гамильтониане триплет-дублетной (TD) пары, проведен анализ кинетики триплетного подпространства состояний на основе решения уравнения для спиновой матрицы плотности. Получены зависимости магнитополевого эффекта T-D-тушения фосфоресценции от характерных энергетических параметров системы и константы скорости реакции. Обнаружено, что при достаточно больших значениях величины индукции магнитного поля (более 100 мТл) наблюдался положительный эффект в интенсивности свечения (4 - 6 %), тогда как в слабых полях (до 100 мТл) эффективность тушения незначительно возрастала (1 - 2 %).
- Теоретически смоделирован и исследован процесс тушения триплетного экситона неподвижным спиновым дублетом в наночастице органического полупроводника. При этом, диффузионное перемещение триплетного экситона в шаровой нанообласти органического полупроводника моделировались путем решения краевой задачи Неймана. Расчитаны временные зависимости не-селективной по спину скорости тушения триплетных состояний при различных геометрических и диффузионных параметрах. Включение спиновой динамики TD-пары в расчеты позволяет провести вычисления магнитополевых зависимостей скорости TD-тушения. Найденные зависимости магнитополевой модуляции эффективности тушения от радиуса наночастицы могут быть аппроксимированы биэкспоненциальной зависимостью.

- Смоделированы и исследованы спектры оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР) бимолекулярной реакции TD-тушения. Освоен метод перехода во ВСК для спин-гамильтониана TD-пары с учетом СВЧ поля, позволяющий существенно упростить описание спиновой динамики с учетом СВЧ поля. Особенностью задачи являлось рассмотрение спиновой динамики TD-пары в потенциале двухямого типа при воздействии СВЧ поля. Моделирование молекулярно-экситонной динамики в таком потенциале осуществлялось с помощью уравнения Ланжевена. Выявлены зависимости ширины линий ОДМР от параметров наноструктурированной среды.
- Проведено теоретическое исследование замедленной флуоресценции экситонов в наноструктуре вследствие триплет-триплетной аннигиляции, главным аналитическим методом в котором являлся метод оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР). Спиновая динамика основалась на формализме матрицы плотности и спин-гамильтониане триплет-триплетной пары, записанных во вращающейся системе координат (ВСК). Координатная (диффузионная) часть задачи решалась на основе функций Грина для краевой задачи Неймана. По итогам, установлены новые характерные закономерности формирования и уширения спектров, зависящие от размера нанобласти, а также выявлены зависимости от диффузионных характеристик блуждания триплетных экситонов в шаровой нанобласти.
- Смоделировано и численно исследовано поведение триплет-триплетной (ТТ) пары, находящейся в наноячейке с потенциалом двуямого типа. Теоретическая модель предполагала надбарьерные прыжки одного из триплетов, при этом триплет-триплетная (ТТ) пара характеризовалась двумя матрицами плотности для «рыхлой» и «тесной» пар. Анализ сводился к исследованию кинетики излучательного синглетного состояния пары, основанного на решении уравнений для спиновых матриц. Выявлен характер влияния параметров потенциала двуямого типа на результирующую населенность излучательно-синглетного состояния двух триплетов. Определены параметры, с помощью которых может быть осуществлено регулирование выходом триплет-триплетной аннигиляции.

Список опубликованных работ по теме диссертации.

Публикации в журналах, индексируемых в базе данных Web of Science:

- A1. Kucherenko M.G., Penkov S.A. Triplet exciton reactions in MEH-PPV films registered by accompanying magneto-sensitive photoluminescence // *Journal of Photochemistry & Photobiology, A: Chemistry*. – 2023. -V.437, - P. 114440.
- A2. Кучеренко М.Г., Пеньков С.А. Особенности фотолюминесценции кислородонасыщенных пленок метокси-полифениленвинилена (МЕH-PPV) // *Оптика и спектроскопия*. – 2022. – Т.130. - №.5, - С. 690 - 697.
- A3. Kucherenko M.G., Penkov S.A. Triplet Excitons Quenching By Doublet Centers in a Nanoreactor with an External Magnetic Field // *Journal of Applied Spectroscopy*. - 2021. - V.88, №2, - pp. 265-273.
- A4. Penkov S.A. Magnetic Field-Effect on Photoluminescence of Poly[2-methoxy-5-(2-ethylhexyloxy)-1,4-phenylenevinylene] (MEH-PPV) Nanoparticles in a Poly[vinyl butyral] Matrix // *Journal of Macromolecular Science - Physics (Part B)*. - 2020. -V.59. -№5, - P. 1-10.

Публикации в журналах, индексируемых в базе данных Scopus и РИНЦ:

- A5. Kucherenko M.G., Penkov S.A., Neyasov P.P. Diffusion-controlled annihilation reactions in 2D and 3D nanostructures // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. -V. 71. - №. 1, pp. 124-129.
- A6. Кучеренко М. Г., Пеньков С. А. Особенности детектирования магнитного резонанса реакций триплетных молекул по аннигиляционной замедленной флуоресценции в наноструктурированных средах // *Химическая физика и мезоскопия*. - 2019. - Т. 21. - № 2, - С. 278-289.
- A7. Кучеренко М.Г., Пеньков С.А. Спиновая динамика когерентных триплет-дублетных пар селективно реагирующих молекул во внешнем магнитном поле // *Химическая физика и мезоскопия*. - 2015. - Т. 17. - № 3. - С. 437-448.
- A8. Кучеренко М.Г., Пеньков С.А. Влияние внешнего магнитного поля на скорость взаимной аннигиляции триплетных электронных возбуждений в наноструктурах с бистабильными пространственными состояниями // *Химическая физика и мезоскопия*. - 2014. - Т. 16. - № 4. - С. 574-587.
- A9. Пеньков С.А., Пискунов А.А. Флуоресцентные свойства гетерогенных коллоидных растворов антрацена и серебра // В сборнике: XI Международная конференция по фотонике и информационной оптике. Сборник научных трудов. 2022. - С. 299-300.
- A10. Penkov S.A., Kucherenko M.G. Optical properties of organic semiconductor nanoparticles // *International Symposium “Emerging materials and devices”*. 2021, Nur-Sultan, Kazakhstan.
- A11. Kucherenko M.G., Pen'kov S.A. Magnetic field effect on intermolecular radiationless energy transfer near metallic nanoparticle // *Terenin Memorial Symposium: book of abstracts of the 5th International Symposium on Molecular Photonics dedicated to the memory of*

- Academician A. N. Terenin (1896-1967), 6-7 May 2021, Peterhof, St. Petersburg, Russia. - P. 25-26.
- A12. Пеньков С.А., Алимбеков И.Р., Кучеренко М.Г. Синтез и фотолюминесцентные свойства органических гибридных наночастиц антрацен/ПММА // В сборнике: Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры. материалы Всероссийской научно-методической конференции. Оренбург, 2021. - С. 2475-2479.
- A13. Пеньков С.А., Алимбеков И.Р., Неясов П.П., Кучеренко М.Г. Экситонные и молекулярные спектры флуоресценции антрацена в пористых адсорбентах, коллоидных и гомогенных растворах // В сборнике: IX Международная конференция по фотонике и информационной оптике. Сборник научных трудов. Москва : НИЯУ МИФИ, 2020. - С. 447-448.
- A14. Пеньков С.А., Кучеренко М.Г. Магнитный отклик выхода реакции триплет-дублетного тушения в сферической нанобласти // В сборнике: Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры. Материалы Всероссийской научно-методической конференции. Оренбург, 2020. - С. 2276-2281.
- A15. Пеньков С.А., Кучеренко М.Г. Оптическое детектирование магнитного резонанса мобильных триплетных молекул в нанопорах с парамагнитными центрами // В сборнике: VIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике. Сборник научных трудов. Москва : НИЯУ МИФИ, 2019. - С. 473-474.
- A16. Пеньков С.А. Размерный эффект магнитного отклика фотореакций в органических полупроводниках // В сборнике: Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры Материалы Всероссийской научно-методической конференции. Оренбург, 2019. - С. 2931-2934.
- A17. Пеньков С.А., Кучеренко М.Г. Влияние магнитного поля на люминесценцию органического полупроводника МЕН-PPV при атмосферном давлении и в условиях низкого вакуума // В сборнике: Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры материалы Всероссийской научно-методической конференции. Оренбург, 2018. - С. 2594-2598.
- A18. Pen'kov S.A., Kucherenko M.G. Fluorescence detected magnetic resonance spectra of annihilated molecular triplet pairs in spherical nanopores // В сборнике: Chemical Physics of Molecules and Polyfunctional Materials Russian-Japanese Conference : proceedings. Orenburg, 2018. - С. 44-46.
- A19. Пеньков С.А., Алимбеков И.Р. Дистанционная аннигиляция триплетвозбуждённых разносортных молекул в поле сферической ферромагнитной наночастицы // В сборнике: Студенческие научные общества - экономике регионов Сборник материалов Международной молодежной научной конференции. Оренбург, 2018. - С. 275-280.
- A20. Кучеренко М.Г., Пеньков С.А. Спектры RYDMR тушения возбужденных триплетных состояний молекул спин-дублетными акцепторами в наноструктурах // В сборнике: Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры материалы Всероссийской научно-методической конференции. Оренбург, 2017. - С. 1796-1802.

- A21. Кучеренко М.Г., Пеньков С.А. Спин-селективные реакции и спиновая динамика когерентных триплет-триплетных и триплет-дублетных пар молекул в магнитном поле // В сборнике: Наука и образование: фундаментальные основы, технологии, инновации Сборник материалов Международной научной конференции, посвященной 60-летию Оренбургского государственного университета. Оренбург, 2015. - С. 161-167.
- A22. Kucherenko M.G., Pen'kov S.A. Cross-annihilation of triplet electronic excitations in nanostructures with two-pit potential and big zeeman's splitting // В сборнике: Российско-Японская конференция "Химическая физика молекул и полифункциональных материалов" материалы конференции. Orenburg / Orenburg State University, 2014. - С. 44-46.
- A23. Кучеренко М.Г., Пеньков С.А., Налбандян В.М., Большаков Д.С. Влияние магнитного поля на межмолекулярный безызлучательный перенос энергии вблизи сферической металлической наночастицы // В сборнике: Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры Материалы Всероссийской научно-методической конференции. Оренбург, 2013. - С. 1107-1114.
- A24. Kucherenko M.G., Pen'kov S.A. Magnetic field effect on intermolecular radiationless energy transfer near metallic nanoparticle // Book of Abstracts of the 3-rd International Symposium "Molecular Photonics" dedicated to academician A.N. Terenin (1896-1967), June 24-29, 2012, Repino, St. Petersburg, Russia. - P. 64.
- A25. Кучеренко М.Г., Пеньков С.А. Влияние внешнего магнитного поля на скорость безызлучательного донор-акцепторного переноса энергии вблизи диамагнитной металлической наночастицы // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Всероссийской научно-методической конференции. Оренбург, 2012. – С. 934–942.