

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Белотелова Владимира Игоревича на диссертацию Соловьева Ивана Александровича на тему: «Когерентная оптическая динамика экситонов и трионов в полупроводниковых квантовых ямах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа Соловьева И. А. посвящена исследованию когерентных оптической динамики локализованных экситонов и трионов в полупроводниковых наноструктурах с квантовыми ямами. С помощью техники двух- и трехимпульсного пикосекундного фотонного эха в работе исследовано, как механизмы фазовой и энергетической релаксации проявляют себя в зависимости от степени локализации экситонов в квантовых ямах ZnO/ZnMgO и InGaN/GaN. Во второй части работы представлены результаты развития протокола когерентного контроля спин-зависимого фотонного эха с целью увеличения времени когерентности экситонного ансамбля, а также приведена экспериментальная демонстрация эффекта в системе к квантовой яме InGaAs/GaAs.

В случае исследования систем, обладающих неоднородным уширением оптических переходов, потенциал линейной спектроскопии ограничен, так как макроскопическая поляризация, наведенная в среде, испытывает быстрое затухание ввиду разброса резонансных частот излучателей. Четырехволновое смешение, будучи ярким примером нелинейного оптического эффекта, позволяет нивелировать механизм обратимой фазовой релаксации ансамбля квазичастиц и получить богатый набор информации о времени когерентности и времени энергетической релаксации индивидуальных излучателей. Данная техника является мощным инструментом для исследования когерентной оптической динамики экситонов в полупроводниковых наноструктурах, что является актуальной научной задачей экспериментальной физики конденсированного состояния. На сегодняшний день особый научный интерес представляет развитие возможностей управления экситонной системой когерентным образом с помощью оптического возбуждения, что является научной целью диссертации.

Русскоязычная версия диссертация имеет объем в 117 страниц, содержит 48 рисунков и 225 ссылок на научную литературу. Работа состоит из введения, пяти глав и заключения.

В первой главе приведен обзор литературы по изучению динамики экситонов полупроводниковых наноструктурах на сверхкоротких временах. Обзор знакомит с основами сверхбыстрой спектроскопии и механизмами энергетической и фазовой релаксации экситонного ансамбля. Приведена убедительная и последовательная аргументация необходимости применения нелинейных методик, уделено особое внимание особенностям работ по нестационарному четырехволновому смешению с акцентом на недавние исследования спин-зависимого фотонного эха.

Во второй главе описаны теоретический аппарат и экспериментальные подходы, используемые в последующих оригинальных главах. Приведен последовательный анализ когерентного отклика ансамбля двухуровневых систем при резонансном возбуждении последовательностью лазерных импульсов с помощью решения уравнения Линдблада для

матрицы плотности. Описаны возможные модификации модели для приложения к ансамблю трионов и экситонов с учетом тонкой структуры, а также для исследования эффекта спин-зависимого фотонного эха. Вторая часть главы посвящена детальному описанию экспериментальной установки по детектированию сигнала четырехволнового смешения с пикосекундным временным разрешением, построенной автором диссертации.

В третьей главе представлены результаты исследования пикосекундной когерентной оптической динамики экситонов и трионов методом двух- и трехимпульсного фотонного эха. Экспериментально обнаружено, что экситоны и трионы типа В проявляют субпикосекундную динамику ввиду эффективного канала релаксации в состояния типа А. Получены зависимости времен T_1 и T_2 от энергии локализации трионов T_A , температуры и мощности возбуждения, что позволило разделить вклады механизмов релаксации.

Четвертая глава посвящена применению техники для исследования локализованных экситонов в периодической структуре с квантовыми ямами (In,Ga)N/GaN. Автором впервые был обнаружен сигнал пикосекундного фотонного эха в ультрафиолетовом диапазоне от подобных структур. Спектральное разрешение позволило определить зависимость времен T_1 и T_2 от степени локализации частиц. Максимальное время T_2 составило 255 пс, что превышает типичные значения для экситонов в квантовых ямах $A^{III}-B^V$ и $A^{II}-B^VI$ на порядок величины. Результат обусловлен сильной локализацией квазичастиц внутри существенных флуктуаций потенциала ямы. Дополнительно был обнаружен нелинейный рост скорости чистой фазовой релаксации от температуры, характерный для сильно локализованных состояний.

В заключительной главе приведены результаты исследования сигнала спин-зависимого фотонного эха от ансамбля экситонов в квантовой яме InGaAs/GaAs. Автору удалось впервые экспериментально пронаблюдать биения сигнала спин-зависимого фотонного эха от ансамбля нейтральных экситонов при приложении поперечного магнитного поля. Эксперимент не только подтвердил предсказание модели, связывающей осцилляцию сигнала с Ларморовской прецессией экситонных спинов, но и проявил эффект увеличения времени когерентности системы. Анализ показал, что эффект достигается за счет подмешивания долгоживущих темных экситонных состояний. Автором продемонстрирован критический режим осцилляций, при котором время T_2 было увеличено более чем в 8 раз. Из подгонки данных удалось получить информацию об электронном и дырочном g -факторе, величине неоднородно разброса и получить оценку для константы обменного взаимодействия.

В ходе работы был получен ряд важных новых научных результатов:

Экспериментально обнаружен сигнал пикосекундного фотонного эха от ансамблей экситонов и трионов в структурах с квантовыми ямами ZnO/(Zn,Mg)O. Определена зависимость времен T_1 и T_2 от степени локализации частиц, выделены основные вклады в скорости фазовой и энергетической релаксации. Показано, что основной канал дефазировки трионов T_A при $T = 1.5$ К не связан с энергетической релаксацией, а определяется чистой дефазировкой ввиду упругого рассеяния на неровностях интерфейсов квантовой ямы. Рост энергетической релаксации с увеличением энергии трионов T_A обусловлен безызлучательной релаксацией внутри неоднородно уширенного трионного ансамбля.

Приведено первое экспериментальное наблюдение сигнала первичного и стимулированного фотонного эха от локализованных экситонов в периодической структуре со ста квантовыми ямами (In,Ga)N/GaN в пикосекундном временном диапазоне и ультрафиолетовой спектральной области. Определены времена T_1 и T_2 , достигающие 255 пс и 1 нс соответственно при увеличении степени локализации, выявлена нелинейная зависимость экситон-фонного рассеяния от температуры. Сделан вывод о сильной локализации экситонов на флуктуациях потенциала квантовой ямы, подобно локализации в квантовых точках.

Показана первая экспериментальная реализация протокола спин-зависимого двухимпульсного фотонного эха на системе экситонов в квантовой яме (In,Ga)As/GaAs. Подтверждено теоретически предсказанное осциллирующее поведение кинетики затухания амплитуды фотонного эха при приложении поперечного магнитного поля. Экспериментально обнаружен особый аперриодический режим поведения сигнала, проявляющий время фазовой релаксации темных экситонов. Предложен способ увеличения времени когерентности экситонной системы за счет смешивания светлых и темных состояний. Определена зависимость Ларморовской частоты для электрона и дырки в экситоне от величины поперечного магнитного поля, приведены оценки неоднородного разброса дырочного g -фактора и константы обменного взаимодействия.

Полученные результаты имеют фундаментальный характер и представляют научный интерес для специалистов в области сверхбыстрой спектроскопии наноструктур и физики конденсированного состояния.

Стиль повествования строгий и при этом легок для чтения. Отмечу следование четкой логики в изложении, указывающее на глубокое понимание автором специфики исследований.

После прочтения диссертации у меня возникли следующие вопросы

В главах 3-5 описаны эксперименты по возбуждению и детектированию фотонного эха с помощью пикосекундных лазерных импульсов. При этом не говорится о поляризации импульсов. Вместе с тем, состояние поляризации импульсов накачки определяет возбуждаемую спиновую динамику и информация о ней необходима для интерпретации результатов.

В главе 2 при теоретическом описании фотонного эха от ансамбля двухуровневых систем рассматривается действие лазерного импульса прямоугольной формы, однако в эксперименте импульс имеет форму Гаусса. Было бы полезно проанализировать роль формы импульса на наблюдаемые эффекты и явления.

В главе 3 на рис. 25 представлена динамика квазичастиц X_A , T_A , X_B и T_B , из которой виден короткоживущий характер квазичастиц X_B и T_B . Однако при этом сигнал в спектральной области X_B и T_B значительно выше, чем для T_A . При анализе наблюдаемых данных представляется важным дать качественную интерпретацию наблюдаемой большой величины сигнала для X_B и T_B . Есть ли здесь прямая связь с субпикосекундным временем жизни?

Сделанные замечания не уменьшают общую высокую оценку представленной работы.

С учетом всего вышесказанного полагаю:

Содержание диссертации Соловьева Ивана Александровича на тему: «Когерентная оптическая динамика экситонов и трионов в полупроводниковых квантовых ямах» соответствует научной специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знаний.

Нарушений пунктов 9, 11 Порядка присуждения Санкт-Петербургским государственным университетом ученой степени кандидата наук, ученой степени доктора наук соискателем ученой степени мною не установлено.

Диссертация соответствует критериям, которым должны отвечать диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, установленным приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете» и рекомендована к защите в СПбГУ.

Член диссертационного совета

д.ф.-м.н., профессор РАН, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова»



В.И. Белотелов

Дата 16.01.2024