

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета 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 когерентной оптической динамики экситонов и их заряженных комплексов в гетероструктурах с квантовыми ямами ZnO/ZnMgO и InGaN/GaN, а также изучению динамики сигнала спин-зависимого фотонного эха от экситонов в квантовой яме InGaAs/GaAs, помещенной во внешнее перпендикулярное магнитное поле.

Русскоязычная версия диссертации изложена на 117 страницах, содержит 48 рисунков и 225 наименований цитируемой литературы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения.

Первая глава посвящена литературному обзору. Описаны основы экситонных состояний в полупроводниковых наноструктурах и их оптические свойства, рассмотрены процессы формирования и локализации экситонов, а также процесс излучательной энергетической релаксации. Уделено большое внимание обсуждению исследований сверхбыстрой когерентной оптической динамики методом четырехволнового смешения и анализу основных механизмов потери когерентности экситонного ансамбля в различных физических условиях возбуждения и для различных квантовых состояний экситонов и трионов, в том числе проанализированы особенности их возбуждения фемто- и пикосекундными импульсами. Заключительная часть главы посвящена обзору работ по недавно возникшему направлению когерентной динамики – спин-зависимому фотонному эху. В результате детального анализа базовых свойств экситонов и трионов в полупроводниковых наноструктурах и возможностей использования нестационарного четырехволнового смешения, автор обосновывает перспективность, новизну и актуальность использования фотонного эха в решении поставленных в диссертации задач. Эти задачи включают как исследование свойств изучаемых экситонов методом фотонного эха, так и изучение новых свойств фотонного эха, особенностей его проявления на экситонных состояниях и использования в решении задач спектроскопии.

Во второй главе описаны теоретические и экспериментальные подходы, используемые в оригинальных главах диссертации для исследования сигнала фотонного эха на ансамбле экситонов и трионов.

33-06-62 ст 22.01.2024

Пошагово рассмотрена процедура расчета эволюции во времени системы экситонов в протоколе двухимпульсного фотонного эха в рамках формализма матрицы плотности. Во второй части главы описана техника детектирования сигнала фотонного эха с пикосекундным временным разрешением, которая реализована автором экспериментально. Описан принцип оптического гетеродинамирования, необходимый для многократного увеличения чувствительности установки при детектировании нелинейного сигнала четырехволнового смешения. Данная глава подробнее раскрывает задачи и содержание оригинальной части диссертации.

Третья глава посвящена оригинальным исследованиям когерентной оптической динамики экситонов и трионов в полупроводниковой квантовой яме ZnO/ZnMgO. Представлены впервые полученные результаты по наблюдению ультрафиолетового фотонного эха в пикосекундном диапазоне в данных структурах. Спектральное разрешение позволило проявить существенные отличия в динамике экситонов и трионов типа А и В. Автор продемонстрировал как с помощью измерений зависимости кинетики затухания сигнала первичного и стимулированного фотонного эха при различных параметрах эксперимента, таких как температура образца, длина волны возбуждения и мощность оптической накачки, удастся выделить несколько вкладов в процессы энергетической и фазовой релаксации трионного ансамбля T_A .

В четвертой главе применена вышеупомянутая техника для исследования когерентной оптической динамики экситонов в периодической структуре с квантовыми ямами InGaN/GaN. Измерения параметров кинетики спада фотонного эха впервые показали, что, несмотря на огромное неоднородное уширение экситонного перехода порядка 40 мэВ, однородная ширина излучателей находится в диапазоне от 2.6 до 15 мкэВ в зависимости от степени локализации экситонов. Стоит отметить обнаружение относительно более долгоживущей когерентной динамики экситонов, обладающей временем фазовой памяти 255 пс. в созданной авторами периодической структуре КЯ (In,Ga)N/GaN. Это время фазовой памяти на порядок оказалось большее, чем в аналогичной структуре других авторов, что открывает новые возможности для будущих исследований. Данные результаты вместе с обнаруженной нелинейной зависимостью скорости дефазировки от температуры позволили установить локализацию экситонов в флуктуациях потенциала ямы, подобно случаю флуктуационных квантовых точек.

Заключительная глава посвящена развитию протокола когерентного контроля в рамках использования спин-зависимого фотонного эха от

ансамбля экситонов в модельной системе на основе одиночной квантовой ямы InGaAs/GaAs. Автором был проведен большой объем экспериментальных исследований по изучению кинетики затухания фотонного эха в этой системе. В процессе исследования автор установил важность использования пикосекундных световых импульсов по сравнению с фемтосекундными импульсами в исследовании изучаемой системы экситонов, которые в силу более широкой полосы возбуждают слишком большое число различных квантовых состояний экситонов, что осложняет их спектроскопию. Экспериментально было продемонстрировано, что при помещении образца в поперечное магнитное поле, кинетика затухания первичного фотонного эха от экситонного ансамбля испытывает биения, частота и форма которых зависит от поляризационной геометрии. Для объяснения полученных экспериментальных данных была развита теория первичного фотонного эха от пятиуровневой экситонной системы, включающей как оптически активные, так и неактивные (так называемые темные) экситонные состояния. Было обнаружено проявление в сигнале первичного фотонного эха Ларморовской прецессии спина электрона и дырки, образующих экситон, выяснено влияние величины магнитного поля, обнаружен и исследован аperiodический режим осцилляций, вызванный проявлением долгоживущих темных экситонных состояний. Разработанная автором теория довольно хорошо описала полученные экспериментальные данные. С помощью предложенной модели удалось объяснить осцилляции сигнала фотонного эха Ларморовской прецессией экситонных спинов. Представляется интересной обнаруженная автором нелинейная зависимость Ларморовской прецессии дырочного спина от приложенного поперечного магнитного поля. Наблюдаемый аperiodический режим осцилляций обосновывается различием в скоростях дефазировки светлых и темных экситонных состояний. При этом сигнал затухает со временем фазовой релаксации, которое асимптотически приближается к времени фазовой релаксации T_2 темных экситонов, что позволяет увеличить время когерентности системы более чем в 8 раз. Разработанная теоретическая модель корректно описывает все характерные особенности поведения системы и позволила получить ценную информацию о g-факторах электрона и дырки и константе обменного взаимодействия. Благодаря высокой точности метода в области малых магнитных полей удалось не только обнаружить ненулевой дырочный g-фактор вдоль плоскости ямы, но и проявить его нелинейный характер.

Характеризуя в целом диссертационную работу И.А. Соловьева, надо отметить, что в ней проведено цельное комплексное исследование, в результате которого автором получены важные экспериментальные результаты и представлено их корректное теоретическое объяснение.

Особое впечатление производят проведенные многочисленные исследования динамики и кинетики затухания фотонного эха, возбуждаемого пикосекундными импульсами в системе экситонов и трионов. Все важнейшие полученные результаты представляют большой научный, а также и практический интерес. Считаю, что эти результаты будут использоваться в дальнейших исследованиях специалистами в области физики конденсированного состояния, при изучении различных вопросов физики и оптики экситонов в полупроводниковых наноструктурах, а также специалистами в области квантовой и нелинейной оптики. Представленные в диссертации результаты дают богатую информацию о свойствах квантовой динамики экситонов и трионов и потому могут стать надежной основой для разработки быстрых протоколов квантового процессинга и оперативной квантовой памяти на системе экситонов.

При чтении диссертации у меня возникли некоторые вопросы и замечания:

1) На стр. 22 автор пишет: «Анализ показывает, что время τ_R имеет прямо-пропорциональную зависимость от величины однородной ширины экситонного резонанса при условии, что последняя много больше энергии температурного разброса kT [54] и кинетической энергии экситонов на границе светового конуса»

Это соображение желательно пояснить. То есть автор говорит об условиях, когда такое соотношение имеет место, но не раскрывает механизма почему же в этих условиях имеется такая корреляция однородного уширения и времени жизни, в чем физическая причина?

2) На этой же странице автор отмечает:

«Кинетика ФЛ наглядно показала, как при увеличении экситонной плотности значительно возрастает τ_R , которое с течением времени уменьшалось до исходного значения по мере уменьшения резервуара экситонов.»

Также желательно иметь объяснение этому. Почему возрастание концентрации экситонов увеличивает время жизни экситонов ?

3) Техническое замечание

На стр. 24. в формуле (5) не определен параметр “k”

4) На стр. 48 автор обсуждается хорошо известное выражение (28) для амплитуды сигнала фотонного эха, отмечая, что «Полученный результат (то есть ур. (28)) согласуется с опубликованными расчетами [18, 92]..»

Очевидно, что формулу (28) не следует называть полученным результатом, поскольку (28) является хорошо известным соотношением для сигнала фотонного эха.

- 5) Стр. 53, формулы (32), (33). В Зеemanовский Гамильтониан вводится неочевидный спиновый оператор дырки в третьей степени $J_{h,i}^3$. В тексте не приводятся объяснения физической природы этого слагаемого.
- 6) Почему-то автор не приводит выводы в конце второй главы.
- 7) Стр. 66, рис. 24. Автор вводит название спонтанного фотонного эха. Не понятно, почему добавляется слово спонтанное? Такое слово добавляется обычно для импульса сверхизлучения Дикке, которое возникает из спонтанно излучаемых фотонов. Первичное фотонное эхо в настоящее время уже не принято называть спонтанным фотонным эхом.
- 8) В последней главе отмечается, что неоднородное уширение возбуждаемых квантовых переходов экситонов много уже спектральной ширины возбуждающих пикосекундных импульсов. Интересно было бы иметь комментарии автора, когда неоднородное уширение возбуждаемых квантовых переходов экситонов может быть много уже спектральной ширины возбуждающих пикосекундных импульсов. Например, в 4-й главе отмечается большая величина неоднородного уширения линии. Вопрос - каким образом моделировалось теоретически возбуждение фотонного эха в этих условиях?
- 9) В изучении фотонного эха автор ограничивается материальными уравнениями, когда обратным влиянием вещества на излучение можно пренебречь. Представляет интерес рассмотреть формирование фотонного эха в условиях сильного взаимодействия со светом, что позволит значительно усилить сигнал эха. Например, это возможно при помещении экситонов в микрорезонатор. Почему такой эксперимент не обсуждается?

Упомянутые недостатки не снижают ценности результатов и положений, представленных в диссертации Соловьева И.А. Диссертантом был выполнен большой объем сложной экспериментальной работы, а Диссертация является научным исследованием высокого уровня по физике конденсированного состояния. Защищаемые положения хорошо обоснованы, а все основные научные результаты работы были опубликованы в высокорейтинговых международных журналах.

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

Считаю, что диссертация Соловьева Ивана Александровича на тему: «Когерентная оптическая динамика экситонов и трионов в полупроводниковых квантовых ямах» полностью соответствует основным требованиям, установленным Приказом № 11181/1 от 19.11.2021 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Член диссертационного совета

Доктор физико-математических наук, Профессор, Директор Казанского квантового центра



Моисеев С.А.

17.01.2024