



ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Айка Араевича Саркисяна на диссертацию Курдюбова Андрея Сергеевича на тему “Динамика и контроль резервуара темных экситонов в квантовых ямах”, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. Физика полупроводников.

Изучение кулоновских систем в полупроводниковых наноструктурах продолжает оставаться одной из актуальных задач физики полупроводников, так как результаты этих исследований могут найти непосредственное приложение в приборостроении. Наличие эффекта размерного квантования позволяет гибко манипулировать спектральными характеристиками таких комплексов как: примеси, экситоны, биэкситоны. При этом уменьшение размерности полупроводника приводит к росту устойчивости кулоновских систем, ярким примером чего является четырехкратное увеличение энергии связи двумерного экситона в квантовых ямах, по сравнению с энергией связи в трехмерном случае. При этом, особый интерес вызывает детальное исследование экситонов в низкоразмерных структурах, поскольку экситонная фотолюминесценция может дать важную информацию о характере физических процессов, имеющих место в изучаемых структурах.

Вместе с тем, в полупроводниковых наноструктурах могут образоваться экситоны, которые не в состоянии рекомбинировать, при этом излучая фотоны. Причиной этого являются правила отбора, налагаемые на волновой вектор такого экситона. В частности, если рассматривать поведение таких экситонов, называемых темными (dark excitons), в квантовых ямах, то правилом отбора будет условие превосходства волнового вектора экситона K_X в плоскости ямы, по сравнению с волновым вектором света K_C . Иначе говоря волновой вектор K_X будет лежать за границами так называемого “светового конуса”.

Исследование темных экситонов невозможно осуществлять с помощью прямых оптических методов. Однако эти объекты можно исследовать опосредованным образом, изучая характер их влияния на светлые экситоны. В частности, взаимодействие темных экситонов со светлыми может привести к значительному уширению экситонных линий в оптических спектрах.

Конгломерат темных экситонов образует так называемый экситонный резервуар. При этом важно отметить, что в выращенных структурах высокого качества время жизни такого резервуара может достигать нескольких десятков наносекунд, что на несколько порядков превышает характерные времена экситонной излучательной рекомбинации. Примечательно, что в течении этого времени экситонный резервуар опустошается, так как часть темных экситонов, благодаря фононному рассеянию, может потерять свою энергию, тем самым оказавшись внутри светового конуса.

Ясно, что исследование динамических процессов, протекающих в экситонном резервуаре, может дать богатую информацию о характере формирования электронно-дырочных пар в квантовых ямах и иметь как фундаментальное, так и прикладное значение.

РОССИЙСКО-АРМЯНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

0051, Армения, Ереван, 123, ул. Овсепя Эмина | т.: (+374 10) 27-70-52 | ф.: (+374 10) 22-14-63 | contact@rau.am



В свете выше сказанного, диссертационная работа Андрея Курдюбова “Динамика и контроль резервуара темных экситонов в квантовых ямах”, является актуальной, важной и находится на переднем крае физики полупроводниковых наноструктур.

Структурно диссертация состоит из Введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и обозначений, а также списка использованной литературы.

Первая глава диссертации носит обзорный характер и посвящена физике экситонов в квантовых ямах из $GaAs$. Приведены сведения о характере светоэкситонного взаимодействия в квантовых ямах, дано определение светового конуса, темных экситонов, а также описано формирование экситонного резервуара. Хотелось бы особо отметить тщательный подбор информации и предельную ясность изложения материала первой главы, поскольку данная информация может быть очень удачно использованной в рамках различных магистерских курсов университетов.

Вторая глава диссертации посвящена описанию изучаемых образцов квантовых ям, образующих экситонный резервуар, а также описанию экспериментальной установки, с помощью которой проводились измерения параметров экситонного резонанса. Для изучения резервуара неизлучающих экситонов автором разработана методика, согласно которой путем непрерывного лазерного изучения осуществляется оптическое возбуждение системы. Как результат, в системе рождаются экситоны и свободные носители зарядов. Благодаря этому меняется спектр отражения, выражаемый в изменениях параметров светлых экситонов. При этом сканирование по энергии фотонов непрерывного лазера дает возможность получить набор спектров возбуждения различных параметров экситонных резонансов. Отметим также, что исследуемые образцы включали в себя квантовые ямы $InGaAs$ с 2% содержанием In и квантовые ямы $GaAs$ с барьерными слоями $AlGaAs$ (концентрация Al 3% и 9%). Удачный выбор образцов позволил наблюдать ряд ярко выраженных экситонных резонансов, в частности, для случаев тяжелых и легких экситонах. На основе полученных результатов автор делает вывод, что изучаемый образец с квантовой ямы $GaAs$, заключенный между барьерами $Ga_{1-x}Al_xAs$ ($x=3\%$), является модельным для изучения фундаментальных свойств экситонов. При этом результаты получены на основе предложенного автором метода изучения нерадиационного уширения резонансов тяжелого и легкого экситонов. Автор называет этот метод спектроскопией возбуждения нерадиационного уширения и приводит схему соответствующей установки. С ее помощью, в частности, удалось получить спектр возбуждения нерадиационного уширения тяжелого экситона.

В третьей главе диссертации детально изучена динамика экситонного резервуара на основе спектроскопии нерадиационного уширения экситонных резонансов (NBE) и экситонной фотолуминесценции. При этом с помощью удачного моделирования энергетической структуры экситонов в исследуемом образце T670 определены оптимальные условия для экспериментального изучения указанной динамики. Автором показано, что в режиме непрерывного возбуждения фоторожденные квазичастицы, благодаря обменному взаимодействию экситонов, приводят к уширению



экситонных резонансов. При этом, на данное уширение самое существенное влияние оказывает резервуар темных экситонов.

На мой взгляд, наиболее примечательным результатом данной главы является обнаружение провала в спектре NBE (область “dip”), располагающегося ниже межзонных переходов в барьерных слоях. Отметим также, что уменьшение ширины спектральных линий экситонных резонансов имеет место параллельно с увеличением интенсивностей соответствующих линий. Автор обуславливает это фактом интенсивного поглощения фотонов с рождением квазичастиц внутри ямы. Эти квазичастицы и являются причиной опустошения экситонного резервуара, что, в свою очередь, приводит к провалу в спектре NBE.

Четвертая глава диссертации носит теоретический характер и посвящена разработке модели динамических процессов в резервуаре, количественно описывающей динамику нерадиационного уширения экситонных резонансов. Для различных случаев оптического возбуждения системы получены соответствующие балансные уравнения для двумерных плотностей экситонов, дырок и электронов, с учетом протекающих в системе физических процессов. При этом важно отметить, что решение балансных уравнений для задачи нерадиационного уширения позволяет дать описание процессов фотолюминесценции в изучаемой структуре, минимизируя количество подгоночных параметров (нужен лишь учет масштабного множителя).

В Заключение приведены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Из полученных в диссертации результатов хотелось бы отметить следующие:

1. Впервые предложена методика исследования экситонных систем в квантовых ямах, путем измерения спектров отражения, при одновременном сканировании по энергии фотонов непрерывного лазерного излучения накачки, что позволило экспериментально измерить такие параметры экситонных резонансов как: скорость нерадиационного затухания экситона, скорость радиационного затухания экситона, фаза, характеризующая асимметрию волновой функции.
2. Обнаружение провала в спектре NBE, вблизи края запрещенной зоны барьерных слоев (спектральная область “dip”), когда импульсная накачка в указанную область приводит к укорочению времени релаксации экситонов, и, как результат, не накоплению экситонов в резервуаре. Последнее дает возможность реализации контроля над концентрацией темных экситонов.
3. Предложена теоретическая модель динамики экситонов и свободных носителей заряда в экситонном резервуаре, хорошо согласующаяся с экспериментальными результатами и описывающая основные динамические процессы, такие как: образование экситонов, диссоциация экситонов, рассеяние экситонов в световой конус.



Вместе с тем хотелось бы обратить внимание на некоторые предложения, которые могли бы улучшить содержание диссертации, и могут быть полезны для дальнейшего понимания процессов, протекающих в экситонном резервуаре, а именно:

1. В содержании диссертации на качественном уровне постоянно обсуждаются различные механизмы взаимодействия экситонов как со свободными зарядами, так и с другими экситонами. На мой взгляд было бы полезно привести определенную теоретическую часть, посвященную указанным процессам в обзорной части диссертации (Первая глава).
2. В третьей главе диссертации говорится об образовании трионных комплексов в изучаемых структурах. В этой связи было бы интересно обсудить вопросы связанные с образованием биэкситонных комплексов, с учетом того, что автором обсуждаются эффекты экситон-экситонного взаимодействия.
3. В последние годы предметом интенсивного исследования стали полупроводниковые нанопластинки. Это двумерные квантовые наноструктуры, занимающие промежуточное положение между квантовыми точками и квантовыми ямами. Причем ансамбли таких систем обладают высоким совершенством по геометрическим размерам, о чем свидетельствуют их оптические характеристики. Думаю, что интересно было бы в дальнейшем обсудить (хотя бы на теоретическом уровне) возможности образования экситонных резервуаров (светового конуса) в таких структурах.
4. Вызывает интерес обсуждение рассмотренных в диссертации проблем, в случае, когда экситонная система находится в структуре с микрорезонатором. Данная тематика сейчас очень популярна и актуальна с точки зрения конкретных приложений в оптоэлектронике. Хотелось бы видеть в диссертации описание методов управления профилем потенциала для поляритонов в структурах с микрорезонатором с помощью резервуара темных экситонов.

Ясно, что представленные выше предложения не носят характер замечаний, а скорее направлены на формирование новой научной дискуссии вокруг свойств экситонных резервуаров в квантовых ямах. В целом диссертация оставляет очень хорошее впечатление. Это законченный, основательный труд, расширяющий наши знания в области физики низкоразмерных экситонов, и открывающий новые горизонты для постановки оригинальных задач, направленных на изучение сложных физических процессов, происходящих в экситонных резервуарах. Язык диссертации четкий, а изложение ясное и прозрачное. Работу приятно читать.

Результаты диссертации опубликованы в ведущих международных научных изданиях и доложены на авторитетных конференциях. Достоверность полученных результатов не вызывает никаких сомнений.



Диссертация Курдюбова Андрея Сергеевича на тему: “Динамика и контроль резервуара темных экситонов в квантовых ямах” соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 “О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете”, а соискатель Курдюбов Андрей Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. Физика полупроводников. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружены.

Член диссертационного совета,

доктор физико-математических наук, профессор,
директор инженерно-физического института
Российско-Армянского университета

А.А. Саркисян

13.06.2022

Подпись А.А. Саркисяна заверяю.

Ученый секретарь Российско-Армянского
университета, кандидат филологических наук



Р.С. Касабабова