

На правах рукописи

ПЕТРОВ Павел Вячеславович

ИССЛЕДОВАНИЕ A^+ ЦЕНТРОВ В ДВУМЕРНЫХ СТРУКТУРАХ НА
ОСНОВЕ GaAs

01.04.10 — физика полупроводников

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2006

Работа выполнена в Физико-техническом институте им. А.Ф.Иоффе Российской Академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
профессор Ив́анов Ю. Л.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Кочерешко Владимир Петрович

доктор физико-математических наук,
профессор
Пихтин Александр Николаевич

Ведущая организация: ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государ-
ственный политехнический университет”

Защита состоится “_____” _____ 2006 в _____ ч. _____ мин. на за-
седании диссертационного совета К 002.205.02 при Физико-техническом
институте им. А.Ф.Иоффе Российской Академии наук по адресу: 194021
Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. Иоффе РАН.

Отзывы на автореферат, заверенные гербовой печатью организации,
просьба направлять по указанному адресу в двух экземплярах не позд-
нее, чем за две недели до защиты.

Автореферат разослан “_____” _____ 2006.

Учёный секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук



Куликов Г.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект исследования и актуальность темы. A^+ центром в полупроводниках называется комплекс образованный нейтральным акцептором и захваченной им дополнительной дыркой. На данный момент существуют две физические модели объясняющие механизм такого захвата. Первая из них основывается на аналогии с отрицательно заряженным ионом водорода H^- . Атом водорода в такой модели рассматривается как диполь, который притягивает дополнительный электрон электростатическим потенциалом диполя. Второй подход заключается в использовании модели потенциала нулевого радиуса. Как известно, в периодическом потенциале атомов кристаллической решётки носитель заряда находящийся в разрешённой зоне может двигаться свободно. Нейтральный атом примеси нарушает периодичность потенциала, что приводит к образованию узкой потенциальной ямы, обычно описываемой δ -функцией.

Впервые на возможность существования в твёрдом теле D^- центров, состоящих из электрона и нейтрального донора и подобных иону водорода H^- , и их аналога в полупроводниках р-типа — A^+ центров, указал Lampert /1/ в 1958 году. H^- -подобные центры в твёрдых телах сразу привлекли внимание исследователей в самых разных областях физики. Основными вопросами изначально были вопросы о самом существовании таких центров, о величине энергии связи и о размере волновой функции в различных материалах. Интерес к A^+ и D^- центрам в объемных полупроводниках был вызван в первую очередь тем, что такие дефекты играют принципиальную роль в процессах прыжковой проводимости по примесным зонам. Системы с H^- -подобными центрами при различных концентрациях нейтральной примеси стали объектом изучения теории неупорядоченных систем с потенциалами малого радиуса. Также H^- -подобные центры в полупроводниках привлекли значительное внимание как объекты моделирующие отрицательно заряженный ион водорода в различных условиях. В частности, в астрофизике, в области изучения природы нейтронных звёзд и звёзд типа “белый карлик”, оказалось необходимым исследовать поведение иона H^- в пределе сильного магнитного поля, когда циклотронная частота, делённая пополам, превы-

шает энергию связи атома водорода. В лабораторных условиях получить такое магнитное поле ($> 10^5$ Т) невозможно, однако для D^- центров в полупроводниках, ввиду малости их энергии связи и малой эффективной массы электрона, предел сильного магнитного поля оказывается легко достижим (~ 10 Т). С развитием технологии получения гетероструктур стала актуальной задача изучения A^+ и D^- центров в системах с размерным квантованием. Так, например, в работе /2/ было показано, что наличие заряженных примесных состояний оказывает существенное влияние на работу резонансного туннельного диода.

В отсутствие магнитного поля ион H^- имеет одно синглетное состояние с энергией связи $0.055E_0$ /1/, где $E_0 = m^*e^4/2\hbar^2\epsilon^2$ — эффективный ридберг. В полупроводниках, по причине малости эффективной массы носителей заряда и большой диэлектрической постоянной, энергия связи A^+ и D^- центров в несколько тысяч раз меньше, чем энергия связи иона H^- . Поэтому исследования H^- -подобных центров в объёмных полупроводниках возможны только при низких температурах ~ 1 К. Впервые существование заряженных примесей экспериментально было показано в работе Гершензона и др. /3/ (1971). Энергия связи A^+ и D^- центров в германии и кремнии, измеренная в данной работе методом субмиллиметровой фотопроводимости, составила величину порядка 1–5 мэВ, в зависимости от материала и типа примеси. Несмотря на сложность экспериментов и то, что в объёмном материале состояния заряженных примесей неравновесны, исследования H^- -подобных центров непрерывно продолжаются на протяжении последних 30 лет. Для исследований применяются такие методики, как фононная спектроскопия, магнетнолюминесценция, измерение проводимости в верхней зоне Хаббарда.

С развитием техники эпитаксиального роста стало возможным изготовление низкоразмерных структур содержащих H^- -подобные заряженные примесные состояния. Исследование A^+ и D^- центров в двумерных структурах имеет сразу два преимущества. Во-первых, методом двойного селективного легирования, легируя одновременно и квантовую яму и барьеры, можно создавать равновесные заряженные состояния. Во-вторых, энергия связи локализованных состояний в двумерных структурах зна-

чительно возрастает, что позволяет изучать их при более высоких температурах.

D^- центры в квантовых ямах к текущему моменту достаточно хорошо изучены как теоретически, так и экспериментально. Между тем к началу работы над данной диссертацией была опубликована только одна статья посвящённая A^+ центрам в двумерных структурах /4/. В этой работе, методом исследования низкотемпературной прыжковой проводимости квантовых ям содержащих A^+ центры, была получена оценка для радиуса волновой функции дырки захваченной нейтральным акцептором ($r_0 \sim 8$ нм). Однако вопрос о других параметрах двумерных A^+ центров оставался открытым.

В связи с вышеизложенным, целью диссертационной работы являлось изучение свойств A^+ центров в квантовых ямах.

В соответствии с целью исследования были поставлены следующие конкретные задачи:

1. Изучить возможность применения фотолюминесцентного метода для исследования A^+ центров в квантовых ямах;
2. Исследовать экспериментально энергетическую структуру двумерного A^+ центра в зависимости от ширины квантовой ямы;
3. С помощью метода измерения циркулярной поляризации фотолюминесценции исследовать экспериментально проявления тонкой, спиновой структуры A^+ центра в магнитных полях;
4. Объяснить полученные экспериментальные результаты в рамках существующих теоретических моделей для A^+ центра в квантовой яме.

Для решения поставленных задач использовался метод фотолюминесцентного анализа структур с A^+ центрами, основанный на существовании механизма рекомбинации дырки, захваченной нейтральным акцептором, и свободного электрона. Исследовались спектры фотолюминесценции при различных интенсивностях накачки и температуре образца. Для получения данных о тонкой структуре A^+ центра, анализировалась

степень циркулярной поляризации фотолюминесценции образцов помещённых в магнитное поле.

Научная новизна определяется следующими полученными в работе результатами:

1. В структурах, содержащих квантовые ямы GaAs/AlGaAs с двойным селективным легированием, обнаружена новая линия фотолюминесценции, соответствующая излучательной рекомбинации дырки основного состояния A^+ центра и электрона со дна зоны проводимости.
2. Экспериментально измерена энергия связи двумерного A^+ центра в зависимости от ширины квантовой ямы.
3. Обнаружено уменьшение степени циркулярной поляризации и интенсивности люминесценции в сильных магнитных полях обусловленное внутрицентровыми диамагнитными эффектами.
4. Экспериментально обнаружено существование тонкой структуры A^+ центра, состоящей из двух, основного и возбуждённого, состояний, и оценены параметры этой структуры.

Положения выносимые на защиту:

1. В квантовых ямах GaAs/AlGaAs с двойным селективным легированием р-типа существует излучательный рекомбинационный процесс, обусловленный переходом свободного электрона на A^+ центр.
2. В спектре фотолюминесценции структур, содержащих равновесные A^+ центры, доминируют две линии: линия излучательного перехода электрона со дна зоны проводимости на основной уровень A^+ центра и линия рекомбинации экситона связанного на нейтральном акцепторе.
3. Энергетическая структура A^+ центра в квантовой яме состоит из двух уровней — основного, со спином $3/2$, и возбуждённого, со спином $1/2$.

4. В сильных магнитных полях происходит пересечение уровней со спинами $3/2$ и $1/2$ таким образом, что уровень со спином $1/2$ становится основным.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах в ФТИ им. Иоффе РАН, а также на следующих конференциях:

1. 26th International Conference: Physics of Semiconductors, 2002 Edinburg;
2. 11th International Symposium NANOSTRUCTURES: Physics and Technology, 2003 St.Petersburg;
3. 12th International Symposium NANOSTRUCTURES: Physics and Technology, 2004 St.Petersburg;
4. 27th International Conference on the Physics of Semiconductors — ICPS-27, 2004 Arizona.
5. 14th International Symposium NANOSTRUCTURES: Physics and Technology, 2006 St.Petersburg;

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 10 печатных работах (в том числе 5 в научных журналах и 5 в материалах конференций).

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулирована цель и задачи диссертационной работы, перечислены полученные в диссертации новые результаты, представлены положения, выносимые на защиту и описана структура диссертации.

Первая глава содержит обзор основных публикаций по теме диссертационной работы. В первом параграфе рассмотрены экспериментальные

работы в которых впервые было показано существование в полупроводниках заряженных примесных центров, подобных отрицательно заряженному иону водорода H^- . Во втором параграфе излагаются результаты исследований H^- -подобных центров в полярных полупроводниках. В третьем параграфе обзора описаны исследования D^- центров в двумерных структурах. Четвёртый параграф посвящён исследованиям влияния магнитного поля на состояния заряженных примесей.

Во второй главе “Проявление A^+ центров в фотолюминесценции двумерных структур GaAs/AlGaAs” рассматривается возможность применения метода фотолюминесценции к изучаемому объекту, описываются результаты первых экспериментов.

В первом параграфе изложены предпосылки на основании которых сделано предположение о применимости фотолюминесцентного метода к решению поставленной задачи. Как было показано в /5/, в материалах содержащих A^+ центры возможен рекомбинационный процесс при котором электрон из зоны проводимости переходит на уровень внешней дырки A^+ центра. Существование подобного механизма рекомбинации открывает путь к использованию простого и хорошо разработанного метода измерения спектров фотолюминесценции для исследования A^+ центров. До сих пор соответствующую такому рекомбинационному процессу линию в спектре фотолюминесценции не удавалось обнаружить экспериментально. Это связано с тем, что в объёмных полупроводниках состояние A^+ центра термически неравновесно, и вероятность рекомбинационного перехода с участием A^+ центра и электрона зоны проводимости мала.

В двумерных структурах, однако, возможно получение равновесных A^+ центров путём использования техники двойного селективного легирования, заключающейся в том, что, при выращивании структуры, акцепторами легируются узкие δ -слои как в яме, так и в барьере. При низких температурах дырки с барьерных акцепторов переходят в квантовые ямы, где захватываются нейтральными акцепторами, образуя в результате A^+ центры. Путём подбора оптимального уровня легирования ям и барьеров, можно добиться того, что все нейтральные примесные

атомы, захватив добавочную дырку, превратятся в термически равновесные A^+ центры.

Второй параграф содержит описание экспериментальных исследований методом фотолюминесценции структур с двойным селективным легированием. Для сравнения экспериментально изучались также структуры легированные только в ямах. Образцы исследовались при температуре жидкого гелия, концентрация акцепторов составляла $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, ширина квантовых ям равнялась 9 и 15 нм. Характерной особенностью спектра фотолюминесценции структуры содержащей A^+ центры является отсутствие обычной примесной линии. Пики свободного и связанного экситона не разрешаются по причине большого уширения спектра вследствие высокого уровня легирования. Основной пик фотолюминесценции структуры содержащей A^+ центры в исследованных структурах располагается по энергии ниже энергетического положения пика связанного экситона, причём его заглубление в яме шириной 9 нм больше чем в яме 15 нм.

В третьем параграфе второй главы изложено обсуждение экспериментальных данных. Результаты фотолюминесцентных исследований сравнивались с измерениями температурной зависимости эффекта Холла, проведёнными ранее на этих же структурах. Холловские измерения структуры с шириной ямы 9 нм показали, что энергия связи A^+ центра в этих ямах возросла до 14 мэВ, то есть она на 7 мэВ больше чем в ямах шириной 15 нм /4/. Наблюдаемое возрастание энергии связи согласуется с заглублением фотолюминесцентного пика связанного с A^+ центрами и объясняется увеличением квантоворазмерного ограничения. Совокупность полученных экспериментальных данных позволяет сделать вывод, что пик фотолюминесценции, связанный с A^+ центрами, действительно является результатом излучательной рекомбинации электронов с дырками на основном уровне A^+ центров.

В третьей главе “Энергия связи A^+ центра в квантовых ямах GaAs/AlGaAs” изложена использованная в данной работе методика измерения энергии связи A^+ центра путём анализа спектров фотолюминесценции. Также в третьей главе описываются результаты экспериментов

по измерению зависимости энергии связи A^+ центра от ширины квантовой ямы и теоретическое объяснение полученных данных.

Первый параграф третьей главы содержит описание экспериментального метода с помощью которого удалось измерить энергию связи A^+ центра. Концентрация примеси в образцах была уменьшена в пять раз, по сравнению с предыдущими экспериментами. Также была уменьшена толщина δ -слоя легирования в яме. В результате общая ширина спектра фотолюминесценции структур содержащих положительно заряженные акцепторы уменьшилась в несколько раз. В спектре стали разрешаться два пика: пик излучательного перехода на A^+ центр и пик рекомбинации экситонов связанных на A^0 центрах, которые появляются вследствие связывания фотовозбужденных электронов на A^+ центрах. Наличие в спектре фотолюминесценции структур с двойным селективным легированием обоих этих пиков позволяет измерить энергию связи A^+ центра. Так как энергия связи экситона локализованного на нейтральном акцепторе известна из литературных данных, то, измеряя разность энергий пиков A^+ центра и связанного экситона, можно получить точную энергию связи A^+ центра.

Во втором параграфе третьей главы изложены подробности эксперимента по измерению зависимости энергии связи A^+ центра от ширины квантовой ямы, в диапазоне от 7 до 18 нм. Для идентификации пиков исследовались температурные зависимости их интенсивности. Метод основан на том, что с повышением температуры пик связанного экситона быстро исчезает благодаря малой его энергии связи с нейтральным центром, тогда как интенсивность излучательных переходов свободных электронов на A^+ центры уменьшается слабее.

В третьем параграфе экспериментальная зависимость энергии связи A^+ центра от ширины квантовой ямы сравнивается с результатами теоретического расчёта энергетической структуры двумерного A^+ центра, выполненного в модели потенциала нулевого радиуса /6/. Уравнение Шрёдингера в методе потенциала нулевого радиуса, записывается в виде

$$H_0\psi(\vec{r}) = E\psi(\vec{r}) + V\delta(\vec{r} - \vec{r}_0)\Psi_0,$$

где H_0 - гамильтониан Латтинжера, Ψ_0 — произвольный постоянный спинор, а \vec{r}_0 — положение примеси. Значение энергии связи A^+ центра в объёмном материале является параметром задачи. В работе /6/ данное уравнение было рассмотрено с граничным условием, определяющим асимптотическое поведение сферически симметричной части волновой функции вблизи дефекта. В результате были получены аналитические выражения для энергии связи основного и возбуждённого состояния A^+ центра, а также зависимость радиуса волновой функции A^+ центра от ширины ямы.

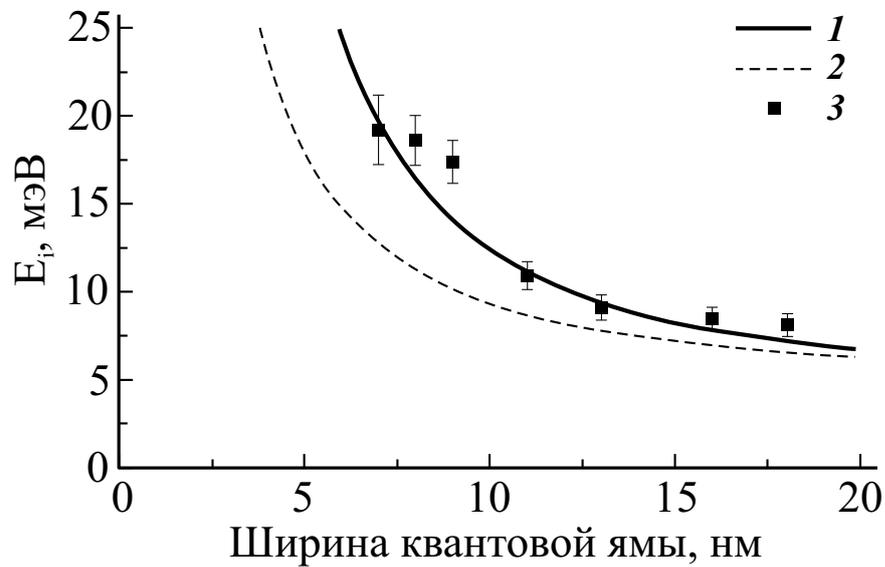


Рис. 1. График зависимостей энергий связи основного (E_{i1}) и возбуждённого (E_{i2}) состояния от ширины ямы. 1 — E_{i1} , 2 — E_{i2} — расчёт для энергии связи E_i в объёмном материале равной 5мэВ /6/; 3 — эксперимент.

На рисунке 1 приведены экспериментальные результаты и теоретические кривые для значения параметра, соответствующего энергии связи A^+ центра в объёмном материале $E_i = 5$ мэВ. Относительно большое значение энергии связи для объёмного материала объясняется тем, что в GaAs энергия связи A^+ центра значительно возрастает вследствие поляронного эффекта. Видно, что результаты теоретического расчёта удовлетворительно описывают экспериментальные данные.

В четвёртой главе “Тонкая структура A^+ центров в квантовой яме” описано исследование спиновой структуры двумерных A^+ центров.

В первом параграфе четвёртой главы обсуждены предпосылки к изучению тонкой, спиновой структуры A^+ центра. Теоретическая модель, рассмотренная в третьей главе, предсказала существование, кроме основного, также и возбуждённого состояния A^+ центра, положение которого, относительно основного состояния, определяется шириной квантовой ямы. Известно, что в приложенном внешнем магнитном поле уровни энергии как основного, так и возбуждённого состояний будут расщепляться. В том случае, если расщепление уровней имеет величину порядка энергетического интервала между уровнями основного и возбуждённого состояний, возникнет “взаимодействие уровней”. Методом, удобным для экспериментального наблюдения подобного эффекта, является измерение степени циркулярной поляризации фотолюминесценции, появляющейся при приложении к образцу внешнего магнитного поля.

Результаты таких измерений изложены во втором параграфе четвёртой главы. Основные эксперименты выполнены на образце с шириной квантовой ямы W , равной 16 нм, в котором наблюдается достаточно хорошее разрешение близко расположенных пиков фотолюминесценции связанного экситона и рекомбинационного излучения A^+ центра. Для определения степени поляризации и величины расщепления пиков спектры фотолюминесценции записывались в положительной и отрицательной циркулярных поляризациях. Магнитное поле было направлено перпендикулярно плоскости квантовых ям в образцах.

Полученная в результате эксперимента зависимость степени циркулярной поляризации фотолюминесценции A^+ центра от магнитного поля обсуждается в третьем параграфе четвёртой главы. В слабых магнитных полях циркулярная поляризация излучения связанного с A^+ центрами возникает за счет спинового расщепления уровней связанной дырки и электрона, и их температурного перезаселения. В более сильных полях становятся существенными диамагнитные эффекты для локализованных дырок. В этом случае поведение основного и возбуждённого уровней A^+ центра может быть описано гамильтонианом:

$$\hat{H} = \mu_0 g_h (J_z B) + \lambda_1 (J_z^2 - 5/4) B^2 +$$

$$+(\Delta/2)(J_z^2 - 5/4) + \lambda_0 B^2$$

где B — магнитное поле, направленное вдоль оси роста (ось z), Δ — величина расщепления между основным и возбужденным состояниями в нулевом магнитном поле, J_z — оператор проекции полного момента дырки на ось z . Физический смысл параметров λ_1 и λ_0 состоит в том, что λ_1 описывает изменение энергетического зазора между основным и возбужденным состояниями, а λ_0 — общий сдвиг этих уровней в квадратичном по магнитному полю приближении. Спиновое расщепление уровней электрона описывается обычным гамильтонианом: $\hat{H} = \mu_0 g_e (S_z H)$, где S_z — оператор проекции спина электрона на ось z , g_e — g -фактор электрона. Используя выражения для гамильтонианов, и предполагая, что ширина линий фотолюминесценции превосходит величины магнитных расщеплений, а уровни носителей заряда заселены равновесно, можно получить аналитическое выражение для степени циркулярной поляризации во внешнем магнитном поле. Оценка для величины Δ была получена

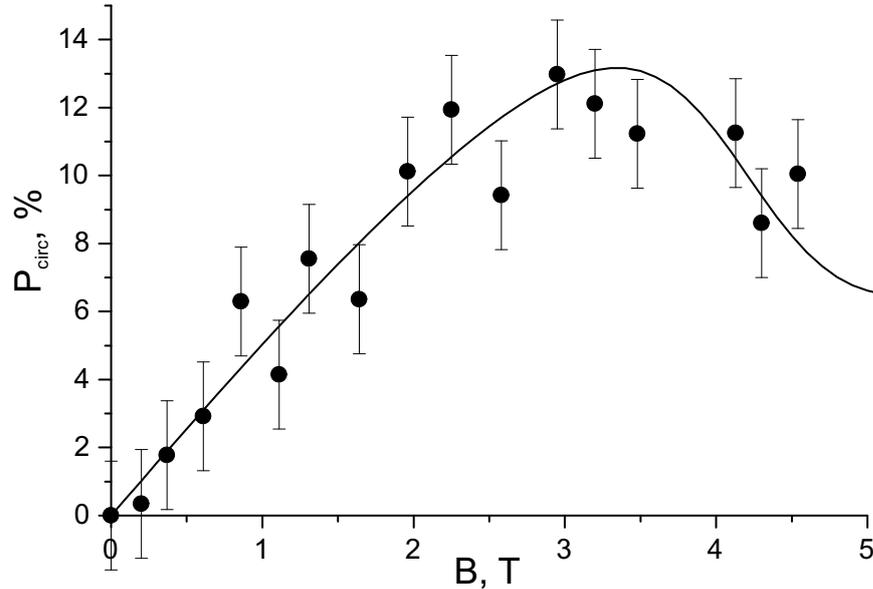


Рис. 2. Зависимость степени циркулярной поляризации от магнитного поля. Сплошной линией показана рассчитанная кривая.

в третьей главе и составляет 1-2 мэВ. Величина поперечного g -фактора дырки для A^+ неизвестна, но обычно для квантовых ям GaAs/AlGaAs она приблизительно равна 1. Значение λ_1 можно просто оценить из соображений, что диамагнитные эффекты должны разрушать связанное

состояние в полях, когда магнитная длина станет равной характерному размеру волной функции в нулевом поле.

На рисунке 2, наряду с экспериментальными данными по зависимости степени циркулярной поляризации P_{circ} от магнитного поля, приведены результаты соответствующих расчетов при $g_e = -0.3$ [7]; $g_h = 0.8$; $\lambda_1 = 0.06 \text{ meV/T}^2$; $\Delta = 1.5 \text{ meV}$; $T = 4.2 \text{ K}$. Видно, что расчет правильно отражает зависимость $P_{circ}(B)$, однако по величине теоретическая кривая была уменьшена в четыре раза. Мы связываем это уменьшение с деполяризацией излучения, которая может происходить на поверхности образца и в экспериментальной установке. Таким образом в данном параграфе показано, что предложенная в третьей главе модель A^+ центра, подтверждается оптическими экспериментами в магнитном поле.

Основные результаты и выводы:

1. Установлено, что рекомбинация свободного электрона с A^+ центром может происходить путём излучательного захвата электрона на основной уровень A^+ центра, и обнаружена линия фотolumинесценции соответствующая данному процессу.
2. Показано, что спектр фотolumинесценции структур, содержащих равновесные A^+ центры, состоит из двух линий: линии излучательного перехода электрона со дна зоны проводимости на основной уровень A^+ центра и линии экситона связанного на нейтральном акцепторе.
3. Разработана методика измерения энергии связи двумерных A^+ центров с помощью фотolumинесцентных измерений, и экспериментально измерена зависимость энергии связи A^+ центра от ширины квантовой ямы.
4. Показано существование тонкой энергетической структуры A^+ центра в квантовой яме, состоящей из двух уровней, основного, со спином $3/2$, и возбуждённого, со спином $1/2$. Получены значения параметров характеризующих данную структуру и её поведение в магнитном поле.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. *Yu.L.Ivánov, N.V.Agrinskaya, P.V.Petrov, V.M.Ustinov, G.E.Cirlin*, “Manifestation of A^+ Centers in Luminescence of two Dimensional GaAs/AlGaAs Structures”// Proceedings of the 26th International Conference: Physics of Semiconductors, 2002 Edinburg;
2. *Ю.Л.Ива́нов, Н.В.Агринская, П.В.Петров, В.М.Устинов, Г.Э.Цырлин*, “Проявление A^+ центров в люминесценции двумерных структур GaAs/AlGaAs”// ФТП, **36**, 993 (2002);
3. *Ю.Л.Ива́нов, П.В.Петров, А.А.Тонких, Г.Э.Цырлин, В.М.Устинов*, “Зависимость энергии активации A^+ центров от ширины квантовых ям в структурах GaAs/AlGaAs”// ФТП, **37**, 1114 (2003);
4. *N.V.Agrinskaya, Yu.L.Ivánov, P.V.Petrov, V.M.Ustinov*, “Photoluminescence and transport in selectively doped p-GaAs/AlGaAs quantum wells: manifestation of the upper Hubbard band”// Solid State Comm., **126**, 369 (2003);
5. *N.V.Agrinskaya, Yu.L.Ivánov, P.V.Petrov and V.M.Ustinov*, “Photoluminescence and transport in selectively doped p-GaAs/AlGaAs quantum wells related to A^+ centers”// Proceedings of the 11th International Symposium NANOSTRUCTURES: Physics and Technology, 2003 St.Petersburg;
6. *Н.С.Аверкиев, А.Е.Жуков, Ю.Л.Ива́нов, П.В.Петров, К.С.Романов, А.А.Тонких, В.М.Устинов, Г.Э.Цырлин*, “Энергетическая структура A^+ центров в квантовых ямах”// ФТП, **38**, 222 (2004);
7. *N.V.Agrinskaja, N.S.Averkiev, Yu.L.Ivánov, P.V.Petrov, K.S.Romanov and V.M.Ustinov*, “Photoluminescent properties of holes bounded on 2D neutral acceptors”// Proceedings of the 12th International Symposium NANOSTRUCTURES: Physics and Technology, 2004 St.Petersburg;

8. *K.S.Romanov, N.V.Agrinskaja, N.S.Averkiev, Yu.L.Iv́anov, P.V.Petrov, and V.M.Ustinov*, “Photoluminescent and kinetic properties of A(+) centers in quantum well”// Proceedings of the 27th International Conference on the Physics of Semiconductors — ICPS-27, 2004 Arizona;
9. *P.V.Petrov, Yu.L.Iv́anov, K.S.Romanov, A.A.Tonkikh and N.S.Averkiev* “Fine structure of A+ centers in GaAs/AlGaAs quantum wells”// Proceedings of the 14th International Symposium NANOSTRUCTURES: Physics and Technology, 2006 St.Petersburg;
10. *П.В.Петров, Ю.Л.Ив́анов, К.С.Романов, А.А.Тонких, Н.С.Аверкиев*, “Циркулярно поляризованная фотолюминесценция, связанная с A^+ центрами в квантовых ямах GaAs/AlGaAs”// ФТП, **40**, 1099 (2006);

Цитируемая литература:

- [1] *M.A.Lampert*, Phys.Rev.Lett. **1**, 450 (1958)
- [2] *M.W.Dellow, P.H.Beton, C.J.G.M.Langerak, T.J.Foster, P.C.Main, L.Eaves, M.Henini, S.P.Beaumont, C.D.W.Wilkinson*, Phys.Rev.Lett. **68**, 1754 (1992)
- [3] *Е.М.Гершензон, Г.Н.Гольцман, А.П.Мельников*, Письма в ЖЭТФ, **14**, 281 (1971)
- [4] *Н.В.Агринская, Ю.Л.Ив́анов, В.М.Устинов, Д.А.Полоскин*, ФТП, **35**, 571 (2001)
- [5] *Е.М.Гершензон, Ю.П.Ладыжинский, А.П.Мельников*, Письма в ЖЭТФ, **14**, 380 (1971)
- [6] *Н.С.Аверкиев, А.Е.Жуков, Ю.Л.Ив́анов, П.В.Петров, К.С.Романов, А.А.Тонких, В.М.Устинов, Г.Э.Цырлин*, ФТП, **38**, 222, (2004)
- [7] *E.L. Ivchenko, G. Pikus. Superlattices and Other Heterostructures*, Springer-Verlag, 1995