

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Дурнева М.В. «Спиновые расщепления валентной зоны в полупроводниковых квантовых ямах и квантовых точках», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников

Значительные успехи, достигнутые в последние годы в области технологии получения полупроводниковых квантово-размерных структур (квантовые ямы, проволоки, точки, сверхрешетки), привели к созданию нового класса приборов оптической и квантовой электроники. В этой связи большое значение приобретает развитие теории электронных состояний в таких системах.

Можно выделить три основных подхода к решению данной задачи. Два из них это метод сильной связи и метод псевдопотенциала. Однако для реализации этих методов необходимо использовать большое число базисных функций и подгоночных параметров. С вычислительной точки зрения эти методы требуют также значительных вычислительных ресурсов, особенно в случае расчета энергетического спектра квантовых точек, содержащих, как правило, большое число (более 10^3) атомов.

Третий подход – метод эффективной массы или метод огибающих волновых функций. Этот метод обладает достаточной простотой и при корректном учете поправок, обусловленных наличием гетероинтерфейсов, в принципе позволяет описать большинство эффектов, наблюдаемых в полупроводниковых наногетероструктурах, в том числе эффектов, обусловленных спин-орбитальным взаимодействием.

В настоящее время существует большое число работ, посвященных приложению метода эффективной массы к анализу электронных состояний в зоне проводимости полупроводниковых гетероструктур с учетом спина и спин-орбитального взаимодействия (эффекты Рашбы и Дрессельхауза). В тоже время эффекты спин-орбитальной связи в валентной зоне практически не изучены. Поэтому нет никаких сомнений, что тема диссертационной работы Дурнева М.В., посвященной теоретическому исследованию спиновых расщеплений дырочных состояний в низкоразмерных полупроводниковых структурах, весьма **актуальна**.

Отметим наиболее **значимые результаты**, полученные диссертантом.

1. В рамках 14-зонной k_p -модели с учетом интерфейсных эффектов рассчитано спиновое расщепление дырочных состояний в GaAs/AlGaAs-квантовых ямах. Показано, что в (001)-квантовых ямах линейное по волновому вектору спиновое расщепление в основном обусловлено эффектом смешивания состояний легких и тяжелых дырок на интерфейсах.

2. В магнитном поле, направленном вдоль оси роста квантовой ямы, теоретически исследован эффект Зеемана. Показано, что гигантская величина g -фактора легкой дырки, наблюдаемая в эксперименте, обусловлена резонансным «взаимодействием» ее основного состояния с первым возбужденным состоянием тяжелой дырки.

3. Теоретически исследован эффект Зеемана для тяжелых дырок в квантовых точках, выращенных вдоль направления [111], имеющих тригональную симметрию. Показано, что симметрия квантовой точки допускает смешивание состояний тяжелых дырок $|\pm 3/2\rangle$ в продольном магнитном поле. В базисе этих состояний эффект Зеемана описывается матрицей, содержащей как диагональные, так и недиагональные элементы. Полученные данные совместно с микроскопической моделью квантовой точки позволили объяснить экспериментально наблюдаемое расщепление линий фотолюминесценции трионов в этих квантовых точках в присутствии магнитного поля.

Все перечисленные результаты имеют как **научное**, так и **практическое** значение и получены диссертантом **впервые**.

Замечания.

1. Не могу согласиться с утверждением автора, содержащимся в первом научном положении, о невозможности описания спин-орбитального расщепления валентных подзон в GaAs/AlGaAs-квантовых ямах с барьерами конечной высоты в рамках эффективного гамильтониана зоны Γ_8 размерности 4×4 .

В качестве пояснения отмечу, что на протяжении всей диссертационной работы для определения энергетического спектра носителей заряда в квантово-размерных структурах автор использует обычное координатное представление эффективного уравнения Шредингера. Однако это уравнение является континуальным приближением точного уравнения, которому должна удовлетворять огибающая волновая функция. Точное уравнение в координатном представлении является нелокальным интегро-дифференциальным уравнением. Поэтому более удобным для решения подобных задач является k -представление эффективного гамильтониана, где k пробегает все возможные значения только в зоне Бриллюэна кристалла. В рамках этого подхода не составляет труда включить в гамильтониан кубические по k члены, ответст-

венные за спин-орбитальное взаимодействие в зоне Γ_8 . Для гетероструктур их вид, также как и в объемных материалах, может быть получен методом инвариантов. Более того, в континуальном приближении при использовании координатного представления данный подход позволяет осуществить правильную расстановку операторов дифференцирования и зависящих от координат зонных параметров (см. В.А. Foreman, Phys. Rev. B 72, 165345 (2005); Г.Ф. Глинский. В кн. Нанотехнология: физика, процессы, диагностика, приборы, под ред. В.В. Лучинина, Ю.М. Таирова, М., Физматлит, 2006, с. 16.; Г.Ф. Глинский. Полупроводники и полупроводниковые гетероструктуры: симметрия и электронные состояния, СПб., Технолит, 2008).

2. В гамильтониане предложенной диссертантом 14-зонной модели пренебрегалось диагональными членами, пропорциональными k_z^2 . На наш взгляд такое приближение не является оправданным, т.к. при больших, но не выходящих за зону Бриллюэна, значениях k_z , учет только недиагональных кр-членов для невырожденных состояний приводит к линейной зависимости энергии от $|k_z|$ и появлению дополнительных ложных решений. В то время как диагональные члены, пропорциональные k_z^2 должны восстанавливать истинный ход дисперсионной зависимости $E(k_z)$ в многозонной модели. Здесь, по-видимому, требуется проведение дополнительного анализа степени локализации огибающих волновых функций в k -пространстве.

3. В разделе 1.4 на стр. 25 граничные условия, накладываемые на огибающие волновые функции, определялись из условия сохранения z -компоненты потока частиц через интерфейс, рассчитанного на этих функциях. Однако поток частиц следует рассчитывать на полных волновых функциях, включая и блоховские функции, которые терпят разрыв на интерфейсе.

4. На стр. 27 утверждается, что оператор \hat{k}_z^3 неэрмитов. С нашей точки зрения это утверждение ошибочно, т.к. оператор \hat{k}_z эрмитов и любые его степени являются эрмитовыми операторами. Свойство эрмитовости не связано с выбором базиса представления этого оператора. Так, например, в координатном представлении матрица $\langle z | \hat{k}_z^3 | z' \rangle = i \nabla_z^3 \delta(z - z')$ эрмитова. В связи с этим отметим также, что все сложности, связанные с наличием резких гетерограниц и необходимостью дифференцирования разрывных на гетерограницах функций обусловлены тем, что диссертант использует, отмеченное выше континуальное приближение, в рамках которого вместо зоны Бриллюэна рассматривается все бесконечное k -пространство.

5. В большинстве случаев автор не делает различий в написании векторов состояний $|\psi\rangle$ и волновых функций в рассматриваемом базисе $\psi(n) = \langle n|\psi\rangle$, что затрудняет понимание некоторых формул, приведенных в диссертации.

Отмеченные замечания не снижают научной значимости и общей положительной оценки работы. Диссертация выполнена на высоком теоретическом уровне и представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на актуальную тему, связанную с анализом спиновых эффектов в полупроводниковых наногетероструктурах. Результаты работы докладывались на многочисленных, в том числе и международных, конференциях, а также опубликованы в ведущих журналах у нас в стране и за рубежом. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Учитывая актуальность выполненных исследований, научную новизну и практическую значимость полученных результатов, считаю, что представленная диссертационная работа удовлетворяет требованиям п. 9 Положения ВАК о присуждении ученых степеней, а ее автор – Дурнев Михаил Васильевич – заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры микро- и нанoeлектроники
Санкт-Петербургского государственного
Электротехнического университета «ЛЭТИ»
им. В. И. Ульянова (Ленина).

Глинский Г.Ф.

197376, Санкт-Петербург,
ул. проф. Попова.5.
www.eltech.ru
(812) 234-2888

Подпись проф. Глинского Г.Ф. удостоверяю:
Начальник отдела диссертационных советов
СПбГЭТУ, к.э.н.
29.05.2014 г.



Русяева Т.Л.