

## ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию

**Барышникова Кирилла Александровича**

**«Релаксационные и резонансные переходы в ян-теллеровских центрах в кубических полупроводниках»,**

представленную в диссертационный совет Д 002.205.02 при Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников

Исследование свойств примесных центров в полупроводниковых кристаллах имеет важное значение как с практической, так и с фундаментальной точек зрения. Примесные центры могут проявлять необычные оптические свойства, а также сильно влиять на рекомбинацию носителей заряда в полупроводнике. В случае вырождения электронных состояний примеси и высокой симметрии лигандного комплекса вибронное взаимодействие приводит к появлению эффекта Яна-Теллера, выражающегося в сильном изменении локальной структуры электронно-колебательных уровней. Эти изменения сказываются, в частности, на релаксации спина и поэтому существенны для спинтроники. Таким образом, исследование вибронного взаимодействия и внутренних переходов в примесных центрах в полупроводниках является **актуальной** задачей.

Диссертация Барышникова К.А. затрагивает круг вопросов, связанных с определением собственных состояний и времен релаксаций ян-теллеровских точечных дефектов в кубических полупроводниковых кристаллах, широко используемых в электронике и оптике – GaAs и ZnSe. Большая часть исследования посвящена особенностям взаимодействия анизотропных центров с ультразвуковыми волнами разной поляризации, распространяющимися в данных кристаллах. Диссертационная работа включает в себя анализ вибронных состояний центра Cu в GaAs, расчет их туннельного расщепления и вычисление коэффициентов поглощения для двух типов поглощения ультразвука (резонансного и релаксационного) на ян-теллеровских центрах. Также рассчитывается время релаксации неравновесных искажений окружения центра Cг в кубическом ZnSe в нулевом и ненулевом магнитном поле, приводится теоретико-групповой анализ симметрии дефектов и их колебаний, обсуждаются общие принципы взаимодействия ультразвуковой волны с ян-теллеровскими дефектами разной симметрии.

Отметим наиболее **значимые результаты** диссертации:

- Аналитически рассчитана энергия туннельного расщепления центра Cu в GaAs в квазиклассическом приближении и приближении слабого квадратичного вибронного смешивания двух дырок, локализованных на центре, с локальными тетрагональными колебаниями примесного окружения.

- Аналитически и численно показано, что основное вибронное состояние центра Cu в GaAs в зависимости от величины обменного взаимодействия дырок может быть как двукратно вырожденным, так и невырожденным.

- Показано возможность наблюдать резонансное поглощение ультразвука на центре Cu в GaAs, вызванное резонансными переходами между туннельно-расщепленными вибронными уровнями энергии.

- Показано наличие релаксационного поглощения медленной поперечной ультразвуковой волны, распространяющейся вдоль направления [110] в кристалле GaAs, на центре Cu. Показано отсутствие поглощения быстрой поперечной волны.

- Построена модель ян-теллеровского центра Cr в кубическом кристалле ZnSe с учетом слабого спин-орбитального взаимодействия и доказано отсутствие туннелирования между анизотропными конфигурациями его окружения в отсутствие внешних полей.

- Определен механизм релаксации между эквивалентными конфигурациями примесного комплекса  $Cr_{Zn}4Se$  в ZnSe, рассчитаны интенсивности таких релаксационных переходов за счет однофононных переходов в ближайшее возбужденное по спину состояние в другой конфигурации и последующего спонтанного излучения в третью конфигурацию.

- Продемонстрировано наличие нового эффекта магнитоиндуцированного туннелирования между эквивалентными конфигурациями примесного комплекса  $Cr_{Zn}4Se$  в ZnSe, происходящего за счет орбитального смешивания электронных состояний комплекса в магнитном поле.

- Продемонстрирован вклад фактора вибронной редукции и времени дефазировки собственных состояний во время релаксации примесного комплекса  $Cr_{Zn}4Se$  при магнитоиндуцированном туннелировании между его конфигурациями; показана связь этого вклада с резким и сильным увеличением поглощения медленной поперечной звуковой волны, распространяющейся вдоль оси кристалла ZnSe [110], на данном комплексе во внешнем постоянном магнитном поле, приложенном вдоль той же оси.

- Предложено объяснение поведения поглощения ультразвука на центре Cr в ZnSe при приложении магнитного поля вдоль оси кристалла [001]; показано наличие перехода

от релаксационного поглощения звука в нулевом поле к хвосту резонансного поглощения в сильных магнитных полях (до 2 Тл).

Большая часть представленных результатов получена автором диссертации **впервые** и, безусловно, имеет **научное и практическое значение**. Барышниковым К.А. была проведена серьезная теоретическая работа, результаты которой прошли апробацию на российских и международных конференциях и школах и опубликованы в ведущих научных отечественных и зарубежных журналах.

Однако по содержанию диссертации следует сделать следующие **замечания**:

- В связи с предлагаемым в диссертационной работе использованием поглощения ультразвука ян-теллеровскими центрами для диагностики примесей в полупроводниковых кристаллах представляется необходимым хотя бы качественное сравнение с другими способами обнаружения парамагнитных примесей, такими как, например, ЭПР.

- В диссертации встречается большое число неудачных выражений. Например, «Поляризацию упругой волны можно задать направлением смещения возбуждающих звук пьезоэлектрических элементов» (стр.10), «комплексы, подверженные ЭЯТ» (стр.10 и другие), «седлообразные точки» (стр.39).

- В диссертации развивается теория вибронного взаимодействия и поглощения ультразвука за счет эффекта Яна-Теллера в полупроводниковых (кубических) кристаллах. Возникает естественный вопрос, в чем автор видит различие с теоретическим описанием для изоляторов, которое рассматривалось ранее. Должно ли сказываться присутствие подвижных носителей заряда? Эти вопросы недостаточно затронуты в диссертации.

- На стр. 28 имеется несогласованность обозначений нормальных координат в связи с тем, что равновесные значения и отклонения от равновесных значений обозначены одинаково.

- Качественные графики типа 1.4 требуют стрелок на осях и обозначения начала координат.

- Частотная зависимость в формуле 2.10 отличается от обычного вида для резонансного поглощения, что требует разъяснения.

- Формула для коэффициента поглощения звука на стр.95 написана с ошибкой.

Сделанные выше замечания не умаляют научной и практической значимости диссертации, выполненной на высоком уровне. Полученные автором результаты достоверны, выводы и защищаемые положения обоснованы. Диссертация логично построена и аккуратно оформлена. По каждой главе сделаны четкие выводы.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации. Результаты прошли **апробацию** на всероссийских и международных конференциях и опубликованы в

5 статьях в рецензируемых научных журналах с хорошим индексом цитирования, что является подтверждением того, что исследования проведены на мировом уровне.

Резюмируя все вышесказанное, можно заключить, что диссертация Барышникова К.А. посвящена актуальной теме, содержит ряд новых, важных в научном и практическом плане результатов, которые вносят значительный вклад в развитие физики полупроводников. Диссертация Барышникова К.А. полностью соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников.

Официальный оппонент, д.ф.-м.н., профессор

Физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (СПбГУ)

Чарная Елена Владимировна

\_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (СПбГУ)

Почтовый адрес: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб. д.7-9.

тел.: +7 (812) 328-20-00

Электронная почта: [srbu@srbu.ru](mailto:srbu@srbu.ru)

Электронный адрес Университета: [srbu.ru](http://srbu.ru)