

Отзыв официального оппонента

На диссертационную работу Волчкова Ивана Сергеевича «Воздействие слабых магнитных полей на реальную структуру и свойства полупроводниковых кристаллов CdTe (Cl) и CdTe (Cl,Fe)», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.18 – кристаллография, физика кристаллов.

Полупроводник CdTe является важным и интересным объектом исследования, как с точки зрения фундаментальной физики, так и с точки зрения практических применений. Современные работы в мировой литературе направлены на исследование квантовых точек и квантовых ям в этом полупроводнике, квантового спинового и аномального эффектов Холла. В ведущих журналах по физике было продемонстрировано влияние сильных постоянных магнитных полей ~ 10 Тл на темновую проводимость кристаллов и пленок CdTe с преднамеренно созданными квантовыми ямами и-или точками. Отметим, что квантовая точка, например, может возникать самопроизвольно в результате замены в локальном узле атома основной решетки на примесный атом. С другой стороны, полупроводниковые устройства на основе CdTe широко применяются в качестве детекторов рентгеновского и мягкого гамма-излучений. Поэтому различные новые возможности для управления их электрическими свойствами важны для практических применений. Однако диссертация посвящена иным аспектам исследования этих кристаллов. Конечно, И.С. Волчков не был первым, кто обнаружил магнитное влияние на темновую проводимость полупроводников. Первая работа сделана, видимо, Е.Л.Франкевичем на полупроводниковых органических материалах с прыжковой проводимостью в 1965 году (полидиацетилен). Однако главными исследователями в этой области так называемых «слабых» полей, конечно, являются Головин Ю.И. и Альшиц В.И. и Кведер В.В., работы которых внесли исторический вклад и заложили

основу слабополевых эффектов в физике, химической физике и материаловедении. Помимо фундаментальных работ упомянутых групп, в литературе можно встретить также множество разрозненных сообщений о влиянии магнитного поля на полупроводники A3B5 и A2B6 и их механические, оптические, электрические и другие свойства.

Важной особенностью и отличием диссертационной работы И.С. Волчкова является систематическое исследование остаточных изменений, которые накапливаются в кристаллах под действием магнитного поля, попытка их регистрации различными методами по отклику разных свойств, а также использование и постоянного и импульсного магнитного поля. Все эти условия экспериментов являются новыми, и они безусловно интересны и важны для понимания процессов, вызванных магнитным и-или электрическим полем в кристаллах. Систематическое накопление данных о хорошо аттестованных полупроводниках CdTe(Cl) и CdTe(Cl,Fe), с известным химическим составом, а также надежно воспроизводимые эксперименты по регистрации изменений, создаваемых в нем магнитным полем, определяет **актуальность** темы диссертационной работы Волчкова И.С.

Диссертация И.С. Волчкова состоит из введения, четырех глав и заключения, списка цитируемой литературы, состоящего из 169 ссылок. Объем диссертации составляет 139 страниц, включая 45 рисунков и 7 таблиц.

Во **введении**, автор обсуждает предмет диссертации и обосновывает её актуальность, формулирует цель и задачи работы, научную новизну и практическую значимость, защищаемые положения, приводит информацию о личном вкладе и описывает структуру диссертации.

Первая глава диссертации посвящена аналитическому обзору литературы по теме диссертации, касающейся влиянию магнитных полей на структурно-чувствительные свойства диамагнитных кристаллов. Приведен детальный анализ свойств основных объектов исследований, используемых в

данной работе, а именно полупроводниковых кристаллов CdTe. Особое внимание уделено рассмотрению работ, посвященных изучению влияния примесей, как важного фактора воздействия слабых магнитных полей на структуру и свойства исследуемых кристаллов. Кроме того, подробно рассмотрены работы, посвященные воздействию импульсных магнитных полей на структуру и свойства немагнитных кристаллов. Представлен обзор работ, посвященных структуре и свойствам данного полупроводникового соединения. Особое внимание уделено рассмотрению работ, посвященных изучению дефектов в кристаллах CdTe, изучению собственных дефектов и примесных дефектов Cl и Fe.

Вторая глава посвящена методике проведения экспериментов. Описаны основные этапы подготовки исследуемых образцов, а также особенности подготовки для исследований различных структурно-чувствительных свойств кристаллов. Описаны основные установки и методики, используемые в данной работе: для измерения электрических и механических свойств кристаллов, а также для исследования состояния поверхности. Описана модернизированная установка по непрерывной записи электрических характеристик, сохраняющая стабильность работы в течении длительного времени.

В третьей главе представлены результаты исследования воздействия магнитных полей на свойства кристаллов CdTe:Cl. Показано, что воздействие слабых магнитных полей приводит к долговременным изменениям электрических и механических свойств кристаллов, а также к изменению шероховатости поверхности кристаллов CdTe:Cl. Показано, что изменения твердости и шероховатости кристаллов CdTe, после магнитного воздействия, обратимо. Обнаружено, что знак эффекта изменения удельной проводимости кристаллов CdTe после магнитного воздействия различен в кристаллах p- и n-типов проводимости. Показано, что кристаллы CdTe(Cl) n-типа, имеют немонотонную динамику изменения удельной проводимости, при воздействии на них импульсных и постоянных магнитных полей, с

последующей релаксацией до исходных значений. Принципиально важным кажется установление необратимости изменений, инициированных магнитным полем, что означает наличие магнитостимулированной релаксации состояний дефектов, «запертых» запретом по спину в метастабильном состоянии и пребывающих в нем длительное время после изготовления кристаллов. Показано, что длительность, форма и количество импульсов магнитного поля, воздействующего на образец, существенно влияют на величину обнаруженного эффекта.

В **четвертой главе** представлены результаты исследования воздействия магнитных полей на микротвердость и электропроводность кристаллов CdTe в зависимости от типа проводимости, концентрации и типа легирующей примеси. Показано, что вариации электрических и механических свойств кристаллов наблюдаются при весьма разных условиях легирования, однако всегда немонотонны, необратимы и демонстрируют некоторое остаточное изменение на больших временах.

В **заключении** сформулированы предполагаемые механизмы воздействия слабых магнитных полей на структуру и свойства немагнитных полупроводниковых кристаллов CdTe(Cl) и CdTe(Cl,Fe), а также основные выводы диссертационной работы.

Среди наиболее значимых результатов, полученных в данной работе, можно отметить следующие данные:

- 1) Обнаружение одновременного изменения микротвердости, удельной проводимости и шероховатости кристаллов результате действия постоянного и импульсного магнитного поля.
- 2) Появления систематической базы данных для анализа различий в действии постоянного и импульсного магнитного поля.
- 3) Установление необратимого характера изменений, вызываемых в кристаллах магнитным полем.
- 4) Кажется очень привлекательным для исследования эффект многократных стохастических биений проводимости, наблюдаемых на

общем фоне релаксации проводимости. Судя по данным автора, это выходит за пределы погрешности эксперимента и не может быть объяснено наводками и шумами приборов. Следовательно, система дефектов, на которую действует магнитное поле, проявляет кооперативные свойства по типу лавин, локальных кооперированных процессов.

Вышеуказанные результаты обладают высокой степенью новизны и представляют большую научную и практическую значимости. **Достоверность** результатов не вызывает сомнений, поскольку они тщательно проверены в контрольных опытах, а диссертант убедился в их воспроизводимости. В частности, с помощью высокочувствительно СКВИД магнетометра было установлено отсутствие ферромагнитных включений в количестве, способном повлиять на результаты экспериментов. В диссертации предложено и реализовано много других проверочных опытов.

Основные утверждения и выводы диссертации достаточно аргументированы. Диссертация Ивана Сергеевича Волчкова, как и любая новая работа, не лишена недостатков. Необходимо сделать следующие **замечания**:

1. Все механизмы воздействия на физические и химические процессы хорошо известны и классифицированы. Вряд ли в диссертации можно ожидать открытий, аналогичных силе Лоренца. Поэтому акцент на «слабость» магнитного поля является софизмом – противоречивой формулировкой известных фактов. Магнитное поле обычное и его влияние на процессы в кристаллах тоже обычно – никакой специфики «слабого» поля не существует.

2. Указание шероховатости ΔS_q с точностью до сотой доли нанометра (десятые доли Ангстрема) соответствует обсуждению изменений на уровне размеров атомов. Учитывая, что радиус Бора составляет 0.52 Ангстрема (в 5 раз больше), следует ли думать, что автор считает возможным регистрировать изменение размеров атомов в своих экспериментах? Этот тип измерений требует независимой калибровки инструмента на калибровочной

решетке (использования стандарта).

Сделанные замечания являются рекомендацией на будущее. Они не изменяют положительную в целом оценку проделанной работы, и не свидетельствуют о потере теоретической и практической значимости полученных результатов, их научной новизны. Основные выводы, представленные в работе, заслуживают доверия.

По материалам диссертационной работы было опубликовано 2 статьи в рецензируемых журналах. Результаты представлены на 16 международных и всероссийских конференциях в виде устных и стендовых докладов. Автореферат и опубликованные статьи полностью отражают основное содержание диссертационной работы.

Диссертационная работа И.С. Волчкова представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, соответствующую всем критериям и требованиям раздела II «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, а её автор, Волчков Иван Сергеевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.18 – «Кристаллография, физика кристаллов».

Официальный оппонент

Главный научный сотрудник, руководитель группы
Магнитных и спиновых логических процессов и устройств
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки
«Институт проблем химической физики РАН,
доктор физико-математических наук, профессор

Роман Борисович Моргунов
15.07.2020

Почтовый адрес: 142432, Московская область, г. Черноголовка, ул. Проспект академика Семёнова д.1,
Телефон: +7(496)522-51-34.
E-mail: morgunov2005@yandex.ru

Подпись профессора Моргунова Р.Б. заверяю:

Ученый секретарь ИХФ РАН



15.07.2020