



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и  
инновациям НИТУ «МИСиС»

М.Р. Филонов

«*Филонов*» 2020 года

## ОТЗЫВ

ведущей организации 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»

Диссертационная работа Волчкова И.С. посвящена исследованиям результатов воздействий слабых магнитных полей на реальную структуру и свойства полупроводниковых кристаллов группы АІІВVI, а именно CdTe(Cl) и CdTe(Cl,Fe). В работе впервые получены результаты, говорящие о значительном изменении темновой проводимости кристаллов CdTe, после воздействия слабыми магнитными полями, а также обнаружено отсутствие латентного периода выдержки.

В настоящее время остро стоит проблема получения в больших масштабах качественных полупроводниковых материалов. Ограничения налагают, в первую очередь, непосредственно методы роста данных кристаллов, в виду сложности и затратности самих процессов. В силу этого представляют интерес методы постростового улучшения структуры и характеристик уже выращенных кристаллов. Одним из таких методов может являться обработка полупроводниковых кристаллов слабыми магнитными

полями, так как известно о существовании необратимых изменений в немагнитных материалах, вызываемых данными воздействиями.

Волчковым И.С., в своей диссертационной работе, объектами исследований выбраны перспективные полупроводниковые кристаллы CdTe. Данные кристаллы являются наиболее перспективными материалами для разработки рентгеновских и гамма детекторов, работающих при комнатной температуре и фотоэлектронных преобразователей. В силу этого, возможности модернизации их структуры и свойств представляют непосредственный практический интерес.

Научной новизной работы, прежде всего, является обнаружение магнитного влияния на темновую проводимость полупроводниковых кристаллы, что было сделано впервые. Проведенные комплексные исследования воздействия слабых магнитных полей на механические (твердость), электрические (темновая проводимость) свойства и состояние поверхности (шероховатость), помогут в разработке принципиально новых методов улучшения характеристик уже выращенных кристаллов, создании оригинальных подходов к характеристике дефектности кристаллов, а также определения типов основных носителей зарядов.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов и списка цитируемой литературы. Во введении содержится обоснование актуальности работы, излагаются цели и задачи диссертационной работы, а также отмечены ее новизна и практическая значимость.

В первой главе приводится обзор литературы, касающейся как основных аспектов изучения воздействий слабых магнитных полей на структурно-чувствительные свойства немагнитных кристаллов и их результатов, так и основных объектов исследований, используемых в данной работе, а именно полупроводниковых кристаллов CdTe. В целом, обзор достаточно полно отражает состояние научных направлений, к которым относится данная диссертационная работа.

Во второй главе приводятся описания способов подготовки образцов, исследований различных свойств и условий воздействия на образцы слабым магнитным полем. В главе детально описаны методики измерения механических и электрических характеристик, а также измерения шероховатости поверхности образцов. Особенно стоит отметить модернизацию метода измерения электрических характеристик, что позволило производить долговременные исследования с малым шагом измерения проводимости, и отслеживать процессы изменения проводимости практически с самого воздействия, в режиме *in situ*.

В третьей главе приводятся результаты исследований воздействия слабых магнитных полей на структурно-чувствительные свойства кристаллов CdTe(Cl). Показано, что кристаллы CdTe:Cl n- и p-типов проводимости показывают различную динамику изменения удельной темновой проводимости, после воздействия слабых импульсных магнитных полей. Как оказалось, кристаллы p-типа проводимости не показывают релаксацию проводимости, в отличие от кристаллов n-типа проводимости. Изменение показателей твердости кристаллов CdTe:Cl, n- и p- типов проводимости также противоположна друг к другу. Все наблюдаемые изменения происходят примерно в идентичные времена, что дает возможность предполагать общие механизмы изменения свойств.

В четвертой главе представлены результаты исследований воздействия слабых магнитных полей на структурно-чувствительные свойства кристаллов CdTe:Cl,Fe. Полученные данные схожи с представленными в предыдущей главе, однако, времена релаксации у кристаллов с примесью Fe значительно выше, что может объясняться присутствием магнитной примеси Fe. Стоит при этом отметить, что кристаллы CdTe:Cl,Fe являлись диамагнитными.

Основными выводами диссертационной работы Волчкова И.С. являются:

1. Впервые показано, что воздействие слабого импульсного магнитного поля способно приводить к долговременным изменениям удельной темновой проводимости кристаллов  $\text{CdTe}(\text{Cl})$  и  $\text{CdTe}(\text{Cl},\text{Fe})$ . Причем кристаллы  $\text{CdTe}$ , n-типа проводимости, показывают обратимое увеличение проводимости, а кристаллы  $\text{CdTe}$ , p-типа проводимости, необратимое падение.

2. Обнаружено, что вызванное воздействием ИМП изменение удельной темновой проводимости начинается непосредственно сразу после снятия магнитного поля. Так, первичный интервал изменения удельной темновой проводимости наблюдается в течении 5 часов и 20 часов, после воздействия ИМП, для кристаллов  $\text{CdTe}(\text{Cl})$  и  $\text{CdTe}(\text{Cl},\text{Fe})$ , соответственно.

3. Показано, что воздействие импульсного магнитного поля способно приводить к долговременным обратимым изменениям показателей твердости кристаллов  $\text{CdTe}(\text{Cl})$  и  $\text{CdTe}(\text{Cl},\text{Fe})$ . Причем кристаллы  $\text{CdTe}$ , n-типа проводимости, показывают обратимое разупрочнение, а кристаллы  $\text{CdTe}$ , p-типа проводимости, обратимое упрочнение.

4. Показано, что воздействие слабого ИМП способно приводит к изменению шероховатости поверхности кристаллов  $\text{CdTe}(\text{Cl})$ . У кристаллов  $\text{CdTe}(\text{Cl})$ , n- и p-типов проводимости, наблюдается один временной интервал (50-130 часов, после воздействия ИМП) обратимого уменьшения шероховатости (~40% и ~35% для кристаллов n- и p-типов проводимости, соответственно).

5. Показано, что спустя 50-130 часов, после воздействия ИМП, происходит не только уменьшение показателей шероховатости, но и значительное увеличение разброса измеренных значений твердости (с 3-5% до 9-13%), не связанное с погрешностями измерений используемого метода.

6. Впервые показано, что динамика изменений удельной темновой проводимости и показателей твердости, после воздействия слабого ИМП,

зависит от типа проводимости полупроводниковых кристаллов CdTe. Так, кристаллы CdTe(Cl), имеющие n-тип проводимости, показывают два интервала обратимого увеличения проводимости (на ~20% и ~10%, соответственно) и три пика обратимого разупрочнения материала (на ~6%, ~10% и ~20%, соответственно). Кристаллы CdTe(Cl), n-типа проводимости, показывают три интервала необратимого падения проводимости (~25%, ~45% и ~55%, соответственно, с последующей стабилизацией на значениях ~25% ниже исходных) и три интервала обратимого упрочнения материала (~8%, ~20% и ~10%, соответственно).

7. Показано, что кристаллы CdTe(Cl) и CdTe(Cl,Fe), p-типа проводимости, имеют схожую динамику изменений свойств (падение проводимости и упрочнение кристаллов), после воздействия слабого ИМП, однако продолжительности изменений отличаются. Кристаллы CdTe(Cl) показывают стабилизацию проводимости и релаксацию твердости через 100 и 280 часов, после воздействия ИМП, соответственно. Кристаллы CdTe(Cl,Fe) показывают стабилизацию проводимости и релаксацию твердости через 175 и 350 часов, соответственно.

По диссертации Волчкова И.С. можно сделать следующие замечания:

1. Представленные в работе результаты по сравнению воздействий импульсных и постоянных магнитных полей не учитывают разницу во времени магнитного воздействия в данных полях. Следовало бы провести дополнительные исследования в условиях равенства данных воздействий.
2. Для понимания механизмов наблюдаемых изменений было крайне информативно провести эксперименты по отжигу данных образцов и сравнения их характеристик с характеристиками образцов, обработанных слабыми магнитными полями.
3. Для полноты картины следовало бы провести эксперименты с исследованиями воздействий слабых магнитных полей не только на

полупроводниковые кристаллы  $A_{II}B_{VI}$ , но и на кристаллы группы  $A_{III}B_V$ .

4. В работе имеется ряд опечаток.

Отмеченные недостатки не снижают ценности работы и не затрагивают основные выводы, поэтому не влияют на ее общую положительную оценку.

Необходимо отметить личный вклад соискателя, который состоит в получении и подготовке всех исследуемых образцов, постановке ряда экспериментов, а также обработке всех полученных экспериментальных данных и написания статей. Волчковым И.С. была проведена модернизация экспериментальной установки по снятия электрических характеристик. Автор непосредственно принимал участие в проведении экспериментов по измерении электрических и механических характеристик исследуемых образцов.

Материал диссертации изложен достаточно четко и последовательно. Рисунки, графики и таблицы хорошо иллюстрируют полученные автором результаты. Диссертация представляет собой цельную, завершенную научно-исследовательскую работу по актуальной тематике и обладает значительной практической значимостью. Достоверность представленных в работе результатов подтверждается использованием современных методов эксперимента и современного программного обеспечения, а также наличием публикаций в рецензируемых научных изданиях и докладами на различных национальных и международных конференциях.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 18 публикациях, из которых 2 статьи в рецензируемых научных изданиях из списка ВАК. Также работы были апробированы на семинарах, научных школах, российских и международных конференциях.

Диссертационная работа Волчкова И.С. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, соответствующую всем

критериям и требованиям раздела II положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842, а ее автор, Волчков Иван Сергеевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.18 – «кристаллография, физика кристаллов».

Диссертационная работа Волчкова И.С. «Воздействие слабых магнитных полей на реальную структуру и свойства полупроводниковых кристаллов CdTe(Cl) и CdTe(Cl,Fe)» заслушана и обсуждена на заседании семинара кафедры материаловедения полупроводников и диэлектриков Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», протокол № 01/20 от 5 марта 2020 года.

Отзыв заслушан и утвержден на заседании кафедры материаловедения полупроводников и диэлектриков Национального исследовательского технологического Университета «МИСиС» протокол № 02/20 от 12 марта 2020 года.

Отзыв составили:


Доцент кафедры МПид,

канд.ф.-м.н.

Уч. Секретарь

кафедры МПид, к.ф.-м.н.

  
\_\_\_\_\_ М.Д. Малинкович

  
\_\_\_\_\_ И.С. Диденко

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальных исследовательский технологический Университет «МИСиС».

Адрес: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д.4. Тел.: +7(495) 955-00-32.

Оф. Сайт: <https://misis.ru/> E-mail:kancela@misis.ru