

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КРИСТАЛЛОГРАФИЯ И ФОТОНИКА»
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

На правах рукописи

ВОЛЧКОВ ИВАН СЕРГЕЕВИЧ

**ВОЗДЕЙСТВИЕ СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА РЕАЛЬНУЮ
СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛОВ
CdTe (Cl) И CdTe(Cl,Fe)**

Специальность 01.04.18 – кристаллография, физика кристаллов

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
Каневский Владимир Михайлович

Москва 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	15
1.1 Воздействия слабых магнитных полей на структуру магнитных полей на структуру и свойства немагнитных материалов	15
1.1.1. Воздействие слабых магнитных полей на механические характеристики и дислокационное поведение диамагнитных материалов	16
1.1.2. Воздействие слабых магнитных полей на электрические характеристики немагнитных кристаллов	25
1.1.3. Примеси, как объект воздействия слабых магнитных полей	28
1.1.4. Воздействие слабых импульсных магнитных полей на свойства и структуру немагнитных материалов	30
1.1.5. Представления о механизмах магнитоиндуцированных изменениях структуры и свойств немагнитных материалов	35
1.2. Полупроводниковые кристаллы CdTe	38
1.2.1. Кристаллическая структура CdTe	40
1.2.2. Система Cd-Te	42
1.2.3. Электрофизические свойства CdTe	43
1.2.4. Собственные дефекты и примеси в CdTe	46
1.2.5. Примеси и комплексы хлора CdTe	51
1.2.6. Примеси и комплексы Fe в CdTe	55
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА И УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ	58
2.1. Установки для воздействия слабыми магнитными полями	58

2.2. Подготовка исследуемых образцов	62
2.3. Установки для измерения электрических характеристик кристаллов CdTe, до и после воздействия слабых магнитных полей	66
2.4. Установки для измерения твердости монокристаллов CdTe, до и после воздействия слабых импульсных магнитных полей	69
2.5. Установки для измерения шероховатости поверхности монокристаллов CdTe(Cl), до и после воздействия слабых импульсных магнитных полей	73
2.6. Выводы в главе 3	77
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА СТРУКТУРНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ CdTe(Cl)	78
3.1. Результаты воздействия слабого импульсного магнитного поля на удельную темновую проводимость (σ) кристаллов CdTe(Cl)	79
3.2. Результаты воздействия слабого импульсного магнитного поля на твердость кристаллов CdTe(Cl)	87
3.3. Результаты воздействия слабого импульсного магнитного поля на состояние поверхности кристаллов CdTe(Cl)	93
3.4. Влияние ориентации кристалла в слабом импульсном магнитном поле на величину относительного изменения свойств кристаллов CdTe(Cl)	101
3.5. Сравнение результатов воздействий слабых ИМП и ПМП на электрические свойства кристаллов CdTe(Cl)	106
3.6. Выводы по главе 3	111

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА СТРУКТУРНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ CdTe(Cl,Fe)	113
4.1. Результаты воздействия слабого импульсного магнитного поля на удельную темновую проводимость (σ) кристаллов CdTe(Cl, Fe)	114
4.2. Результаты воздействия слабого импульсного магнитного поля на твердость кристаллов CdTe(Cl,Fe)	117
4.3. Выводы по главе 4	120
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	123
БЛАГОДАРНОСТИ	126
ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ	127
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	129

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Прогресс в области полупроводниковых материалов и технологий способствует их широкому применению в электронике и энергетике. Все более актуальным становится получение в больших масштабах качественных полупроводниковых кристаллов, в частности, CdTe. Данные кристаллы являются наиболее перспективными материалами для разработки рентгеновских и гамма детекторов, работающих при комнатной температуре и фотоэлектронных преобразователей. В силу сложности получения качественных кристаллов CdTe представляют интерес методы улучшения характеристик уже выращенных кристаллов. Известно, слабые магнитные поля (поля, для которых выполняется условие $\mu_B V \ll kT$, где μ_B – магнетон Бора, k – постоянная Больцмана, T – температура, V – индукция магнитного поля) оказывают воздействие на дефектную примесную структуру полупроводников, что приводит, во многих случаях, к необратимому изменению дефектной структуры и свойств. Таким образом, слабое магнитное поле является перспективным методом управления характеристиками полупроводниковых материалов. Например, известно [1] о долговременных, необратимых изменениях структуры и свойств кристаллов CdHgTe, CdTe и InSb после воздействия слабых импульсных магнитных полей (далее ИМП). Однако, не были проведены комплексные исследования воздействия слабых магнитных полей на структурно-зависимые свойства полупроводниковых кристаллов с разными содержаниями и типами примесей. Эти исследования позволят использовать воздействия слабыми магнитными полями в качестве метода оценки дефектности кристаллов (в частности определения типов основных примесей в кристаллах), а также в качестве метода влияния на дефектную структуру кристаллов. Важной задачей являются исследования воздействия слабых магнитных полей на свойства полупроводниковых кристаллов и приборов, так как слабые магнитные поля являются постоянным фоновым фактором. Представляют интерес исследования воздействий слабых ИМП и постоянных магнитных полей (далее ПМП) на структурные свойства диамагнитных полупроводниковых кристаллов, в связи с родственностью этих внешних

воздействий, которые имеют и явные различия в механизмах воздействия на кристаллы.

К началу настоящей работы воздействия слабых ИМП на диамагнитные кристаллы считались несущественным частным случаем воздействий ПМП. Известно, что приложение электрического поля к объекту, подвергавшемуся воздействию слабыми ПМП, способно приводить к усилению отклика материала на магнитное воздействие. При включении электромагнита или помещении образца в ПМП наблюдается единичный интервал роста индукции B магнитного поля от времени, что вызывает однократное возбуждение в образце вихревого электрического поля, напряженность которого по закону электромагнитной индукции пропорциональна скорости нарастания B , что также могло бы оказывать усиливающее влияние на магнитный отклик материала. Однако данное предположение, по результатам [2, 3] оказалось не соответствующим действительности, а воздействие электрических полей, возникающих при единичном первичном нарастании магнитного поля, было определено как столь малое, что оно не могло оказать какого-либо заметного влияния на процессы, происходящие при воздействиях слабыми ПМП. Этот вывод был принят и касательно слабых ИМП. Однако, слабые ИМП представляют собой повторяющиеся с определенной периодичностью этапы нарастания магнитного поля до максимума с последующим его падением. Причем интервалы нарастания максимума амплитуды в случае слабых ИМП могут быть значительно короче. В виду этого, в слабых ИМП электрические поля являются постоянным фактором, оказывающим влияние на исследуемые материалы.

Целью диссертационной работы было исследование индуцированных слабыми ИМП и ПМП долговременных изменений реальной структуры и свойств диамагнитных полупроводниковых кристаллов CdTe.

Основными **задачами** исследования являлись:

- Проведение комплексных исследований результатов воздействий слабых ИМП на объемные (темновая проводимость и микротвердость) и поверхностные (шероховатость поверхности) свойства кристаллов CdTe(Cl) и CdTe(Cl,Fe). Проведение сравнительных исследований воздействий слабых ИМП и ПМП на полупроводниковые кристаллы CdTe(Cl) и CdTe(Cl,Fe).
- Определение возможности улучшения характеристик полупроводниковых кристаллов CdTe(Cl) и CdTe(Cl,Fe), после воздействия слабых ИМП.
- Определение условий существования отклика свойств кристаллов CdTe(Cl) и CdTe(Cl,Fe), на воздействие слабыми ИМП.
- Определение возможных механизмов воздействия слабых ИМП на свойства кристаллов CdTe(Cl) и CdTe(Cl,Fe).

Научная новизна

- Проведены комплексные исследования воздействий слабых магнитных полей на кристаллы CdTe(Cl) и CdTe(Cl,Fe), различных типов проводимости. Показано, что воздействие слабых ИМП приводит к долговременным изменениям серии структурно-чувствительных свойств, таких как твердость кристаллов, удельная темновая проводимость и шероховатость поверхности образцов. При этом кристаллы CdTe, легированные различными примесями, имеют различную величину относительного изменения свойств, вызванных воздействием слабого ИМП.
- Впервые установлено, что воздействие слабых магнитных полей на диамагнитные полупроводниковые кристаллы CdTe(Cl) и CdTe(Cl,Fe) приводит к значительным изменениям электрических характеристик, в частности удельной темновой проводимости кристаллов. Обнаружен первичный пик изменения проводимости, наблюдаемый сразу после воздействия слабого

ИМП, и, предположительно, характеризующий первичную перестройку в системах дефектных комплексов, инициируемую внешним магнитным полем.

- Обнаружено, что кристаллы $\text{CdTe}(\text{Cl})$ и $\text{CdTe}(\text{Cl,Fe})$, n-типа проводимости, показывают обратимое увеличение удельной темновой проводимости, в то время, как кристаллы $\text{CdTe}(\text{Cl})$ и $\text{CdTe}(\text{Cl,Fe})$, p-типа проводимости, показывают необратимое падение удельной темновой проводимости, после воздействия слабых ИМП.
- Проведены сравнительные исследования результатов воздействия слабых ИМП и ПМП, в одинаковых по амплитуде V_{max} и длительности воздействия $t_{\text{эксп}}$, на удельную темновую проводимость кристаллов CdTe . Показано, что изменение удельной проводимости кристаллов CdTe наблюдается в обоих случаях, однако, амплитуда пикового увеличения проводимости отличается: первичный пик увеличения проводимости в ~ 2 раза выше для случая воздействия ПМП, вторичный пик увеличения проводимости в ~ 4 раза выше для случая воздействия ИМП. Показано, что связь концентрации преобразованных комплексов в магнитном поле с характеристиками используемого поля, имеющая вид $V^2 \cdot t_{\text{эксп}}$ справедлива для случая ПМП, но для случая воздействия ИМП требует учета таких параметров поля как, длительность, форма и количество импульсов магнитного поля, воздействующего на образец.

Практическая значимость работы. Результаты, полученные в работе, демонстрируют возможность направленной модификации свойств полупроводниковых кристаллов $\text{CdTe}(\text{Cl})$ и $\text{CdTe}(\text{Cl,Fe})$ с помощью слабых ИМП, что позволяет проводить пост-ростовое улучшение характеристик кристаллов, не требуя при этом дополнительного дорогостоящего и сложного оборудования. Результаты позволяют использовать воздействие ИМП, как метод определения основного типа носителей заряда и определения устойчивости реальной структуры кристалла к внешним воздействиям, в частности к электромагнитному.

Модернизации экспериментальных установок по измерению проводимости

сти, а также генерации ИМП, расширили характеристики генерируемого ИМП и позволили провести непрерывные долговременные исследования результатов воздействия слабых ИМП на электрические свойства исследуемых полупроводниковых кристаллов.

Объекты и методики исследований. Объектами исследования были выбраны кристаллы CdTe(Cl) и CdTe(Cl,Fe), выращенные методом Обреимова-Шубникова в Институте Кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН. Исследуемые образцы имели форму прямоугольного параллелепипеда и обладали различными геометрическими размерами, никогда не превышающими 10x5x5 мм. В каждом эксперименте, за исключением специально оговоренных случаев, использовались образцы, обладающие идентичными геометрическими размерами. Состав и содержание примесей в исследуемых кристаллах были определены с помощью современного масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой iCAP-Q (Thermo Scientific). Слабое ИМП, используемое в работе, имело следующие характеристики: амплитуда $V_{\max}=1,04$ Тл, частота следования импульсов $\nu=12$ Гц, длительность магнитного воздействия $t_{\text{эксп}}=10$ мин, продолжительность импульса магнитного поля $\sim 6 \cdot 10^{-4}$ с, причем продолжительность фронта нарастания импульса $\sim 10^{-6}$ с, интервал между импульсами магнитного поля $\sim 8,3 \cdot 10^{-2}$ с. Образец в процессе воздействия находился на немагнитной подставке, расположенной в центре магнитной катушки, своими размерами во много раз превышающей геометрические размеры образца. Слабое ИМП приводит к незначительному нагреву образцов CdTe (не более чем на 1,5 К), что не может приводить к каким-либо значительным изменениям. ПМП создавалось с помощью электромагнита, образец в процессе данного воздействия свободно стоял на немагнитной подставке между полюсами электромагнита, диаметр которых во много раз превышал размеры образца. Слабое ПМП, используемое в работе, имело следующие характеристики: амплитуда $V_{\max}=1$ Тл, длительность экспозиции в магнитном поле $t_{\text{эксп}}=10$ мин, продолжительность фронта нарастания магнитного поля $\sim 0,1$ с. Воздействие слабыми ИМП производилось при различной ориентации образцов в магнитном поле, а именно: вектор **V** перпенди-

кулярен плоскости (110) или плоскости ($\bar{1}11$) исследуемых кристаллов. Воздействие слабыми ПМП производилось при ориентации вектора **V** перпендикулярно плоскости образца (110). Свойства исследуемых кристаллов исследовались на:

- лабораторной установке по измерению электрических характеристик на базе пикоамперметра Keithley 6487,
- нанотвердомере «НаноСкан-3D»,
- металлографическом фотомикроскопе NEOPHOT-21,
- Сканирующих зондовых микроскопах Solver PRO M (NT-MDT) и NTEGRA PRIMA (NT-MDT).

Положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментальное обнаружение изменений удельной темновой проводимости, твердости и шероховатости поверхности кристаллов CdTe(Cl) и CdTe(Cl,Fe), после воздействия слабого ИМП. Кристаллы CdTe, легированные различными примесями, имеют различную величину относительного изменения свойств, вызванных воздействием слабого ИМП.
2. Экспериментальное обнаружение различной динамики магнитоиндуцированных изменений удельной темновой проводимости и твердости кристаллов CdTe(Cl) и CdTe(Cl,Fe), имеющих различный тип проводимости: кристаллы CdTe, n-типа проводимости показывают интервалы увеличения проводимости и разупрочнения; кристаллы CdTe, p-типа проводимости показывают интервалы падения удельной темновой проводимости, а также упрочнение.
3. Эффект необратимого падения проводимости кристаллов CdTe(Cl) и CdTe(Cl,Fe), имеющих p-тип проводимости, после воздействия слабого ИМП.
4. Обнаружение различий в динамике магнитоиндуцированного изменения удельной темновой проводимости кристаллов CdTe(Cl), после воздействия слабых ПМП и ИМП, имеющих сходные характеристики амплитуды **V** и времени экспозиции образца в поле $t_{\text{эксп}}$, для удовлетворения условию

$B^2 t_{\text{эксп}}$. При этом показано, что связь концентрации преобразованных комплексов в магнитном поле с характеристиками используемого поля, имеющая вид $B^2 \cdot t_{\text{эксп}}$ справедлива для случая ПМП, но для случая воздействия ИМП требует учета таких параметров поля как, длительность, форма и количество импульсов магнитного поля, воздействующего на образец.

Личный вклад автора. В диссертации изложены результаты работ, выполненные автором в течение последних 5 лет. Личный вклад автора в диссертационную работу заключается в восстановлении и модернизации используемого оборудования, постановке задач исследований, отборе и подготовке образцов, в проведении исследований электрических характеристик, в обсуждении, анализе и обработке результатов, а также формулировании основных выводов. Анализ и обобщение результатов по атомно-силовой микроскопии, масс-спектрометрии и исследованию механических характеристик выполнены в соавторстве. Подготовка основных публикаций по работе.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на молодежном конкурсе ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, в секции «Кристаллография» 2018 г. (Работа удостоена третьей премии). Основные положения и результаты работы докладывались на: Совещании и Молодежной конференции РНСИ-КС-2014; Российском симпозиуме по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твёрдых тел (РЭМ-2015); VI, VII и VIII (2 доклада) Международной конференции «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов»; Школах Физики Конденсированного Состояния (ФКС) 2014, 2015, 2018 (2 доклада), 2019; Первом Российском Кристаллографическом Конгрессе (2016); Международной научно-технической конференции INTERMATIC – 2018; Российской конференции по электронной микроскопии (РКЭМ-2018); Международном семинаре МНТ-XV «Структурные основы модифицирования материалов», г. Обнинск (2019); XII Ежегодном заседании Научного Совета РАН по физике конденсированных сред (2019).

Публикации по теме диссертации. Основные результаты работы изложе-

ны в 18 научных работах, в том числе в 2 статьях в журналах, индексируемых международными базами (Scopus, Web of Science) и рекомендованных ВАК, а также в 16 докладах на конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, основных результатов, выводов и списка литературы. Общий объем диссертации – 139 страниц, включая 45 рисунков, 7 таблиц и 169 цитируемых источника литературы.

По своей структуре диссертация состоит из четырех глав, введения и заключения.

В *первой главе* данной работы приведен обзор литературы, касающейся основных аспектов изучения воздействий слабых магнитных полей на структурно-чувствительные свойства немагнитных кристаллов и их результатов. Особое внимание уделено рассмотрению работ, посвященных изучению влияния примесей, как важного фактора воздействия слабых магнитных полей на структуру и свойства немагнитных кристаллов. Приведен обзор литературы, касающейся основных объектов исследований, используемых в данной работе, а именно полупроводниковых кристаллов CdTe. В частности, посвященных структуре и свойствам данного полупроводникового соединения. Приведен обзор 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 непрерывному снятию электрических характеристик в течении длительных времен с малым шагом измерения (1,5 секунды), позволяющая получать большой массив экспериментальных точек (до нескольких миллионов

измерений).

В *третьей главе* представлены результаты исследования воздействия слабых магнитных полей на структурно-чувствительные свойства кристаллов CdTe(Cl). Показано, что воздействие слабых магнитных полей приводит к долговременным изменениям удельной темновой проводимости и твердости кристаллов, а также к изменению шероховатости поверхности кристаллов CdTe. Показано, что изменения твердости и шероховатости кристаллов CdTe, после магнитного воздействия, обратимо. Показано, что динамика изменения удельной проводимости и твердости кристаллов CdTe, после магнитного воздействия, имеет различный характер, для кристаллов p- и n-типов проводимости. Так кристаллы CdTe, n-типа проводимости показывают обратимое немонотонное увеличение проводимости и разупрочнение, а кристаллы CdTe, p-типа проводимости показывают необратимое немонотонное падение проводимости, а также обратимое упрочнение. Показано что кристаллы CdTe(Cl) n-типа, имеют различную динамику роста удельной проводимости, при воздействии на них слабых ИМП и ПМП, с последующей релаксацией до исходных значений. Показано, что связь концентрации преобразованных комплексов в магнитном поле с характеристиками используемого поля, имеющая вид $B^2 \cdot t_{\text{экс}}$ справедлива для случая ПМП, но для случая воздействия ИМП требует учета таких параметров поля как, длительность, форма и количество импульсов магнитного поля, воздействующего на образец.

В *четвертой главе* представлены результаты исследования воздействия слабых магнитных полей на структурно-чувствительные свойства кристаллов CdTe(Cl,Fe), а также проведено сравнение относительного изменения удельной темновой проводимости и твердости кристаллов CdTe(Cl) и CdTe(Cl,Fe), обработанных ИМП. Показано, что у кристаллов CdTe(Cl,Fe) магнитоиндуцированные изменения темновой проводимости и твердости, после воздействия ИМП, более продолжительны по времени, по сравнению с магнитоиндуцированными изменения в кристаллах CdTe(Cl).

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.

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1. Воздействия слабых магнитных полей на структуру и свойства немагнитных материалов

В наше время воздействие магнитных полей на материалы, в том числе и немагнитные (материалы, имеющую разупорядоченную магнитную структуру, такие как диамагнетики), в случае равновесных систем находит последовательное объяснение в рамках квантовой теории магнетизма [4]. В рамках этих объяснений появились классификации величины магнитного поля, способного воздействовать на те, или другие процессы. Стоит учесть, что под слабыми магнитными полями подразумеваются поля, в которых выполняется условие:

$$\mu_B B \ll kT, (1)$$

а в случае металлов добавляется [5]:

$$\omega = eV/m \ll \omega_c, (2)$$

где μ_B – магнетон Бора, k – постоянная Больцмана, T – температура, B – индукция магнитного поля, ω – циклотронная частота, e и m – заряд и масса электрона, ω_c – частота столкновений электрона с рассеивающими центрами.

Слабые магнитные поля могут оказывать существенное воздействие на структуру и характеристики разнообразных материалов [6-14]. В этом ключе особенно интересными представляются воздействия магнитных полей на макрохарактеристики немагнитных материалов, характеризующихся неравновесной структурой.

Кроме того, магнитные поля могут иметь не только природное, но и техногенное происхождение. Существуют как специально генерируемые магнитные поля, использующиеся в военной технике, так и магнитные поля, широко

применяемые в медицине, например, в магнитно-резонансной томографии и в различных физиотерапевтических установках. Широко известно о широком использовании магнитных полей в сельском хозяйстве, в частности для предпосевной подготовки семян и вегетирующих посевов [15,16]. Известно о влиянии, оказываемом слабыми магнитными полями на процессы роста и фазовых переходов многих материалов [17,18]. Применяются магнитные поля и в качестве метода исследования тонкой структуры вещества различными методами магнитного резонанса, такими как электронный парамагнитный резонанс (ЭПР), ядерный магнитный резонанс (ЯМР) и иными видами магниторезонансной спектроскопии, где необходимо быть уверенным в отсутствии существенного влияния используемого зондирующего поля на процессы в исследуемом объекте. Аналогичное требование возникает при создании высокочувствительных физических установок, таких как гравитационные антенны, и обработки полученных на них результатов. В описанных выше случаях необходимо учитывать возможность влияния слабых магнитных полей, близких по своим величинам к естественным полям Земли (~25-65 мкТл), на характеристики элементов оборудования, способных приводить к изменению их физико-механические характеристики. Все это в результате может сказываться на их работе и на показаниях измерительных приборов [5]. В результате крайне необходимо понимание последствий и механизмов воздействия слабых магнитных полей на структуру и свойства как магнитоупорядоченных, так и немагнитных материалов.

1.1.1. Воздействия слабых магнитных полей на механические характеристики и дислокационное поведение диамагнитных материалов

Физико-механические характеристики твердых тел и твердых растворов на их основе, определяются упругими свойствами и процессами неупругости, протекающими на различных уровнях структуры: атомарном, дислокационном, мезоструктурном и макроскопическом. Для идеального немагнитного кристал-

ла требуются крайне высокие магнитные поля, порядка 100 Тл и выше, для изменения его механических свойств. Лишь в редких случаях достигается «квантовый предел», при котором в области гелиевых температур можно наблюдать «магнитный пробой», способный оказать воздействие на различные термодинамически равновесные свойства немагнитного кристалла, в том числе и механические [19]. Однако происходит это лишь в случае окислов, сплавов и некоторых металлов, таких как Bi, Be, Al, Nb, с малым перекрытием зон или узкой щелью между зонами. В данных случаях магнитная энергия $U_m \sim \mu_B B$ превышает ΔU (пороговое значение) при B равном уже 10 Тл. В нормальных условиях, при комнатной температуре $T_{\text{комн}}$ экспериментальные магнитные поля с $B \leq 10$ Тл уже считаются слабыми в случае их приложения к немагнитным материалам. Считается, что малые магнитные поля не могут в принципе заметно влиять на структуру и свойства немагнитных твердых тел. И действительно, если рассмотреть термодинамически равновесную систему, при использовании магнитного поля, имеющего $B \sim 1$ Тл, можно предполагать наличие процессов, имеющих только слабую энергию ($\mu_B B / kT_{\text{комн}} \sim 10^{-3}$).

Примером таких воздействий, оказываемых слабыми магнитными полями на механические характеристики кристаллов, несмотря на слабую энергетическую составляющую данного воздействия, могут служить работы [20-22]. В [22], в частности, было продемонстрировано воздействие магнитного поля на ход зависимости предела текучести от температуры и скорости деформации в кристаллах Nb и Mo при 77 – 300 К. Так как используемые магнитные поля были крайне малы, порядка 0,15 – 0,25 Тл, то они удовлетворяли критериям «слабости». Пластичность и релаксация напряжений в этих кристаллах растет в определенной области температур, а энергия активации уменьшается при деформации в магнитном поле.

Подробные исследования воздействия слабых магнитных полей на немагнитные кристаллы начались с 1970-х годов XX века. Известны работы [23, 24], в которых приводились результаты исследований, посвященных крайне

продолжительному по времени воздействию слабых магнитных полей, с $B \leq 5$ Тл, на физико-механические характеристики ионных кристаллов. В частности, исследовалось воздействие магнитных полей на микротвердость [23] и на изменение пробегов дислокаций [24], однако тогда эти изменения объяснялись не воздействием магнитного поля на дефекты кристаллов, а действием вихревых электрических полей на заряженные краевые дислокации. При этом данную гипотезу впоследствии пришлось отбросить, так как для возбуждения смещения дислокаций необходимы электрические поля значительно больше, чем те, что создаются при включении ПМП с $B \sim 1$ Тл (подробнее в гл. 1.6.). Позднее были обнаружены и многие другие магнитоэластические эффекты на немагнитных кристаллах, наблюдаемые по изменениям механических характеристик материалов. Так на ионных кристаллах (NaCl, LiF, KCl, KBr) были показаны изменения скорости макропластического течения [25], ползучести [26, 27], предела текучести [28, 29], микротвердости [30], внутреннего трения [31-34] под действием магнитного поля. Стоит отметить, что результаты данных исследований объяснялись не с точки зрения воздействия электрических вихревых полей, как в [23,24], а с точки зрения представлений о воздействиях магнитного поля на протекание «коротких» стадий спин-зависимых взаимодействий между дефектами, так как в немагнитных кристаллах магнитным моментом способны обладать только дефектные структуры. Позднее, эффекты магнитоиндуцированных изменений механических характеристик были обнаружены и на других материалах, например, на Al [10,35] и полупроводниковых кристаллах GaP и AsGa [36]. Все наблюдаемые изменения механических свойств были получены несколькими независимыми группами, что лишь подтверждало существование отклика на слабое магнитное воздействие. Дальнейшее изучение воздействия слабых магнитных полей на свойства и структуру немагнитных кристаллов были направлены, как на попытки более четкого понимания механизмов происходящих процессов, так и на обнаружения совершенно новых откликов материалов на магнитное воздействие.

Новый толчок в понимании процессов воздействий слабых магнитных полей на структуру и свойства немагнитных материалов дала работа В.И. Альшица [37]. В ней авторы описывали стимулированное слабым ПМП, имеющим $B \approx 1$ Тл, движение дислокаций в монокристаллах NaCl. Дислокации в описанном эксперименте вводились слабым ударом и являлись маркером происходящих процессов в кристалле. Отсутствие каких-либо внешних нагрузок и использование оборудования, не чувствительного к воздействиям магнитного поля, позволило избавиться от проблем, возникших у ряда авторов, в схожих исследованиях [38-42]. Упоминаемые проблемы, возникали при использовании испытательного оборудования, подвижные части которого чувствительны к магнитным полям. Данной проблемой можно пренебречь при использовании сильных магнитных полей, однако при использовании полей, удовлетворяющих критериям слабости, погрешности, вносимые воздействием магнитного поля на аппаратуру, приходится учитывать. Так, в работах [38-42], из-за описанной выше проблемы, величины регистрируемых магнитоэластических откликов уменьшились практически на порядок измеряемых значений, а некоторые результаты [42] повторить так и не удалось.

Опыты, проводимые группой В.И. Альшица, проводились при комнатных температурах, что полностью удовлетворяло критериям «слабости» используемых полей. Опубликованные результаты, в тот момент, представлялись чем-то спорным, в связи с чем, сами авторы первоначально относились к своим данным с некоторой долей скепсиса. Однако, именно эта работа [37] позволила начать систематическое изучение воздействия слабых магнитных полей на механические свойства кристаллов, а также исследования нового физического явления, названного магнитоэластическим эффектом.

Данные исследования оказались крайне ценны еще и потому, что поведение дислокаций является хорошим маркером изменения свойств кристаллов. После работы [35] движение дислокаций в ПМП в отсутствие внешних нагру-

жений было обнаружено в щелочно-галогидных кристаллах NaCl [43,44], LiF [45,46] CsI [46], металлах Zn [47], Al [45,48], полупроводниках InSb [49].

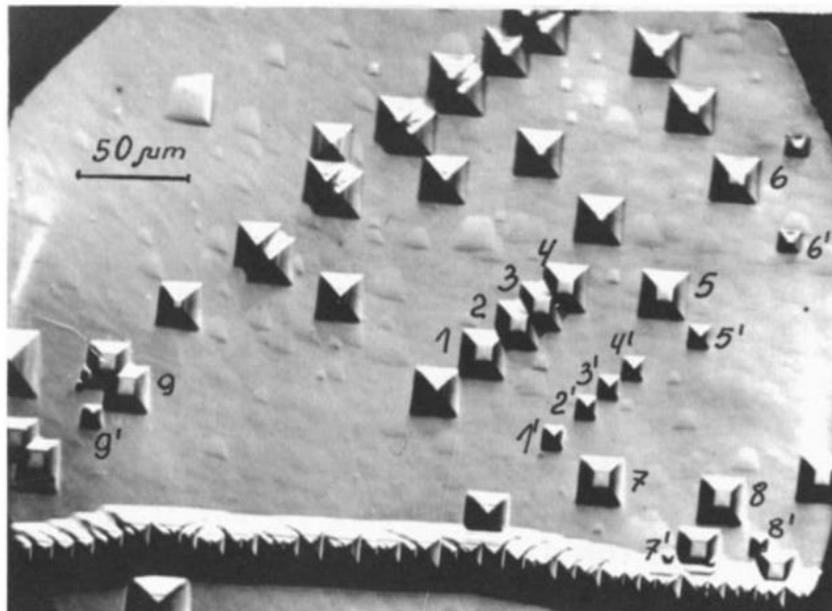


Рис. 1. Дислокационные смещения в кристалле NaCl под действием магнитного поля $B = 0,5$ Тл в течение 3 мин: 1,2 и т.д. - начальные положения дислокаций; 1', 2' и т.д. - конечные позиции дислокации. [44].

Наблюдаемая зависимость пробега дислокаций от величины магнитной индукции (B) в [44] являлась квадратичной. При этом стоит отметить, что зависимость магнитоиндуцированных изменений от величины магнитной индукции не всегда носит квадратичный характер [50,51]. В описанных выше опытах также была показана нечувствительность дислокаций к смене направления поля, что, вкупе с малыми используемыми полями, исключало предположение о силовом возбуждении заряженной дислокации магнитным полем. Также наблюдалось движение и незаряженных винтовых дислокаций [45,46]. Оценка величин магнитострикционных констант для этих материалов, на несколько порядков превышающая необходимые значения, при которых должны были наблюдаться данные эффекты, позволяла предположить, что природа наблюдаемых эффектов не была магнитострикционной.

Позднее, наряду с движением дислокаций непосредственно в процессе приложения магнитного поля, в немагнитных кристаллах были обнаружены процессы роста подвижности дислокаций, уже после отклонения внешнего поля. Вышеописанные эффекты наблюдались в ПМП [52,53], ИМП [54,55], а также в переменном электрическом поле [56]. Регистрировалось это в виде роста пробега дислокаций при смещении дислокаций, имеющих место в случае внешнего нагружения кристаллов. Экспериментальные реализации различных вышеописанных эффектов дали возможность сделать предположение о модификации системы точечных дефектов кристаллов в магнитном поле. Проведение экспериментов, позволяющих наблюдать за движением дислокаций в немагнитных кристаллах в режиме реального времени, как в импульсе магнитного поля, так и после отклонения данного поля, продемонстрировали, что движение дислокаций имеют эффекты последствия, с достаточно продолжительными временными интервалами «остановок», после окончания импульса. Данные результаты наглядно продемонстрировали, что изменения в магнитных полях могут происходить, как во время экспозиции в поле [43], когда задействованы дислокация-парамагнитный центр, так и через некоторое время, после снятия магнитного поля. В последнем случае предполагаются изменения в подсистемах точечных дефектов, не способных перестраиваться мгновенно. Реакции какого вида будут преобладать, зависит от примесного состава и предыстории кристалла [57,58], при это важно, как обрабатывались образцы до эксперимента: термообработкой, отжигом или закаливанием.

Научной группой Н.А. Тяпуниной [33] были представлены результаты, говорящие о воздействии, оказываемом приложением магнитного поля на амплитудные зависимости внутреннего трения. В ряде работ [31,33,59-61] приводились результаты воздействий слабых магнитных полей на неупругие свойства кристаллов, не являющихся магнитными, а также предложены теоретические описания данных процессов. При этом стоит упомянуть, что нагружение образцов в данных работах, после воздействия магнитного поля, являлось зна-

копеременным. Из вышеприведенных работ были сделаны выводы, что внутреннее трение, как амплитудно-зависимое, так и независимое, увеличивается в магнитном поле, в отличие от модуля Юнга, значения которого падают. При этом рост внутреннего трения происходит линейно, с увеличением квадрата магнитной индукции, при достижении некоторого пограничного значения. Также в работах [31,33,59-61] были обнаружены различные временные зависимости изменения свойств, такие как эффекты магнитной памяти или магнитного последействия [61]. Таким образом, исследования дислокационного движения кристаллов и изменения неупругих свойств кристаллов под действием слабых магнитных полей убедительно продемонстрировали, что магнитоиндуцированные изменения способны происходить не только непосредственно в магнитном поле, но и после его снятия (рис. 2.).

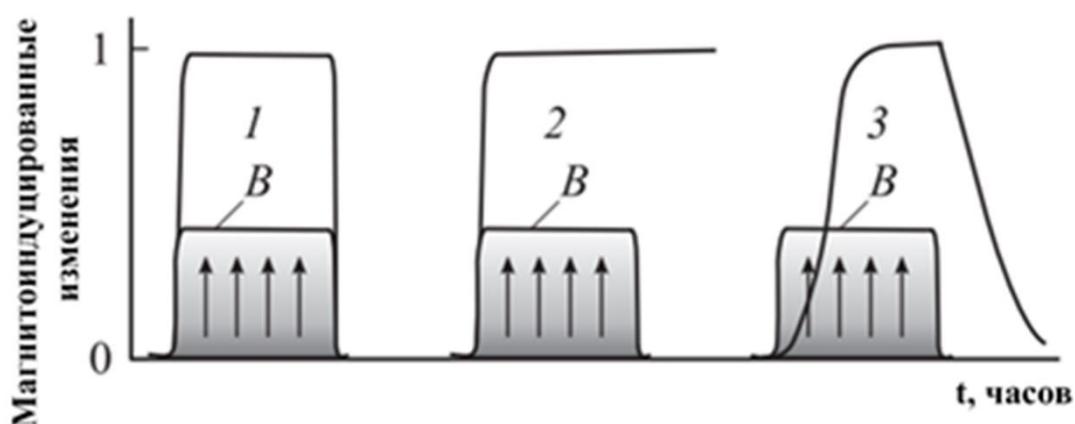


Рис. 2. Три основных типа поведения немагнитных материалов в магнитном поле по [5]: 1 – эффекты *in situ*; 2 – необратимые постэффекты; 3 – эффекты последействия с медленной релаксацией.

Кроме того, было определено, что в немагнитных кристаллах, таких как щелочно-галоидные, при комплексном воздействии ультразвука и магнитного поля, происходит увеличение количества дислокаций [59]. Схожие результаты были получены и на других материалах, таких как металлы [62], что позволяет сделать вывод о схожести поведения амплитудной зависимости внутреннего трения при приложении магнитного поля в щелочно-галоидных кристаллах и

металлах. В результате авторы [54] пришли к выводу, что магнитные поля оказывают комплексное воздействие на немагнитные кристаллы, воздействуя как на точечные дефекты, так и на дислокации по отдельности. Данные выводы основываются на чувствительности дислокаций к состояниям точечных дефектов, позволяющих оценить кинетику возбуждения точечных дефектов немагнитных кристаллов при приложении магнитных полей (в том числе и импульсных), а также произвести относительно точную оценку кинетики их релаксации, после отключения внешнего поля. Релаксация дефектов до нового состояния происходит в результате рекомбинационных процессов, возникающих в момент снятия внешней силы, и имеет много общего с диффузионными процессами, в силу чего является термоактивируемыми [58].

Важным вкладом в исследованиях воздействий слабых магнитных полей на механические характеристики немагнитных кристаллов стали результаты, полученные группой А.А. Урусовской [23,63]. В них было показано воздействие магнитного поля на пластичность ионных кристаллов на макроскопическом уровне, а также изменение твердости после экспозиции в магнитном поле образцов LiF. Стоит заметить, что вышеописанные эффекты имели прямую зависимость от величины магнитного поля [54,63]. Эти изменения свойств кристаллов невозможны, если магнитное поле не достигает некоторой критической величины, и достигают насыщения при увеличении значений магнитного поля [63-65]. Обнаруженные эффекты имеют связь и со скоростями деформации, принимающими, однако обратно пропорциональные зависимости. При всем этом, величины предела текучести имеют сильную зависимость от примесного состава образцов [31,66].

В некоторых работах [67] совместно с магнитным полем к кристаллам прикладывалось и малое электрическое поле, которое усиливало воздействие магнитных полей на регистрируемые деформационные процессы. Этот эффект был изучен подробнее научной группой Ю.И. Головина при изучении кинетики точечных дефектов и их состояний в немагнитных кристаллах [68-70] в услови-

ях включения импульса магнитного поля, вызывающего скачкообразное увеличение деформации (рис. 3.). В некоторых же работах [71,72] было обнаружено наличие зависимостей вышеописанного эффекта от величины магнитных полей, в том числе в виде эффектов последействия.

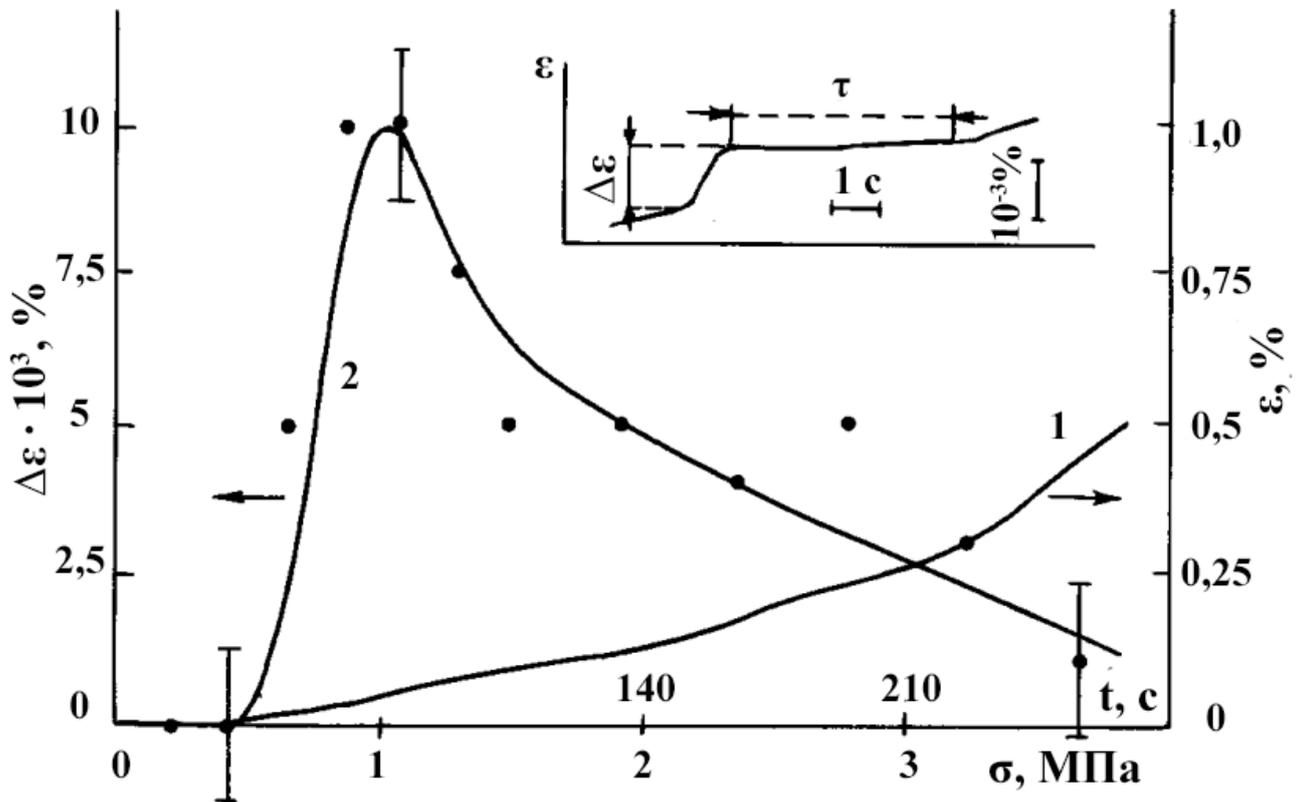


Рис. 3. Зависимости относительной деформации ε (1) и величины ее скачка $\Delta\varepsilon$ (2), вызванного импульсом магнитного поля, от линейно нарастающей со временем механической нагрузки σ и времени нагружения t для кристаллов KCl. На врезке — фрагмент зависимости ε от t после включения импульса магнитного поля при $\varepsilon \sim 0.1\%$. [68]

Измерение микротвердости кристаллов может служить способом детектирования качественных изменений, происходящих в дефектной структуре кристаллов. Так, в группе Ю.И. Головина измерение величины микротвердости использовалось для определения изменений, происходящих в дефектной структуре различных немагнитных кристаллов [68,69,73] под действием магнитных полей и различных температурных обработок. Аналогичным образом, в каче-

стве косвенного метода анализа изменения дефектной структуры кристаллов, оцениваются и изменения микротвердости кристаллов поликристаллического алюминия [74] под действием слабого ПМП, а также эффект магнитной «памяти» в монокристаллах ZnO [75], наблюдаемый на примере изменения твердости кристаллов, после воздействия на них слабых ПМП. Также были обнаружены эффекты изменения микротвердости кристаллов KDP [76], после воздействия на них магнитного поля, причем в данной работе изменение твердости отличается, в зависимости от сектора роста, из которого был вырезан образец. В последнее время наибольшее количество исследований по воздействиям слабых магнитных полей на механические характеристики кристаллов ведется с использованием как воздействия на кристаллы слабых магнитных полей [61-63], так и обработки исследуемых кристаллов в полях в схеме ЭПР [76,77]. Проведение данных экспериментов обусловлено тем, что именно при проведении экспериментов в схеме ЭПР было получено экспериментальное подтверждение спиновой природы рассматриваемых явлений [78-80]. Позднее, в работе [81], были получены результаты, также говорящие о спиновой природе магнитоиндуцированных изменений. Стоит заметить, что все перечисленные работы используют в качестве рабочей модели наблюдаемых изменений представления о перестройке подсистем точечных дефектов, присутствующих в кристалле в результате магнитного воздействия, либо стимулированное магнитным полем движение дислокаций.

1.1.2. Воздействие слабых магнитных полей на электрические характеристики немагнитных кристаллов

Воздействие на немагнитные кристаллы различных слабых магнитных полей способно приводить не только к изменению механических характеристик материалов, но и к изменению иных свойств, таких как электрические. Так, в

работах [82-84] было выявлено заметное изменение фотопроводимости S_{60} в магнитном поле с индукцией $B < 1$ Тл (рис. 4.).

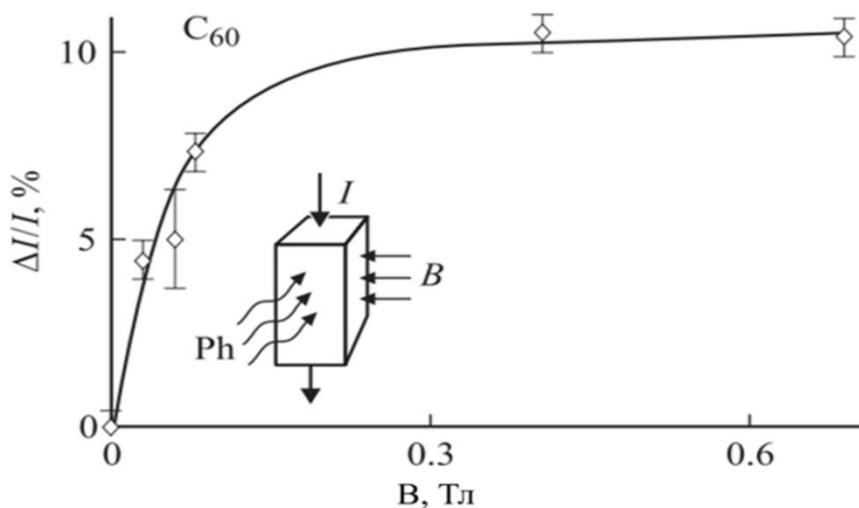


Рис. 4. Зависимость прибавки фототока ΔI , вызванной наложением постоянного магнитного поля, от его индукции B для монокристаллов C_{60} . [82-84].

Так как измерения проводились в нормальных условиях, то поле удовлетворяло критерию «слабости». Увеличение фототока ΔI в момент включения магнитного поля не обуславливалось взаимной ориентацией векторов поля и плотности тока и достигало точки насыщения уже при $B \sim 0.2$ Тл. Однако само магнитное поле не воздействовало на величину темнового тока. Данные особенности не дают объяснить наблюдаемое явление с точки зрения сугубо классических гальваномагнитных эффектов, таких как эффект Холла или магнитосопротивление. Оно скорее схоже с воздействием магнитного поля на фотопроводимость молекулярных кристаллов ароматических углеводородов, нашедшее объяснение в рамках спин-зависимой теории рекомбинации электронно-дырочных пар [84,85]. Такое объяснение обнаруженного отклика в C_{60} согласуется с резким ростом фототока ΔI , возникающего при создании парамагнитного резонанса, реализованного за счет наложения друг на друга постоянного и микроволнового магнитного поля [83].

Это же согласуется с выводами большого количества работ [86-93], в которых изучалось воздействие магнитных полей на электрические и фотоэлектрические характеристики крайне различного списка немагнитных материалов. Во всех вышеописанных работах авторы связывали обнаруженные эффекты со спин-зависимыми процессами, активируемыми и управляемыми магнитным полем. При этом из этих работ следует, что активация слабых магнитных полей ($B \approx 10^{-2} - 10^{-1}$ Тл) оказывает крайне малое воздействие на электрические характеристики. Так при гелиевых температурах изменения составляли не более нескольких процентов, в то время как при комнатных условиях наблюдаемые изменения были еще меньше. В то же время, изменения пластических характеристик в аналогичных условиях на тех же кристаллах составляли десятки – сотни процентов. Стоит учесть, что в вышеописанных работах не проводились исследования темновой, собственной проводимости полупроводниковых кристаллов, которая, также должна быть способна изменяться после воздействия слабыми ИМП. Данное предположение обусловлено тем, что в легированных полупроводниках примесная проводимость значительно превышает собственную, а слабые магнитные поля воздействуют на дефектную структуру кристаллов, к которой относятся и примесные комплексы. При этом ИМП поля имеют, видимо, несколько отличный механизм воздействия на немагнитные кристаллы, обусловленные различиями магнитного воздействия. Так, при запуске электромагнита, или при помещении образца в уже созданное магнитное поле, возникает интервал нарастания величины магнитного поля. Данный интервал крайне непродолжителен по времени, но он приводит к образованию замкнутых вихревых электрических полей на поверхности образца, что, предположительно, также могло бы оказывать усиливающее влияние на магнитный отклик материала. Однако данное предположение оказалось не соответствующим действительности в случае воздействия ПМП, так как слабые вихревые электрические поля, возникающие при единичном первичном нарастании магнитного поля, оказались столь малы, что они не могли оказать какого-либо заметного влияния на происходящие процессы [2,3]. Этот вывод был принят и касательно слабых

ИМП, делая их частным случаем ПМП. Однако, в слабых ИМП, нарастание магнитного поля происходит более стремительно, приводя к образованию вихревых электрических полей, имеющих большую напряженность электрического поля. Кроме того, они могут представлять собой повторяющиеся, с определенной периодичностью, описанные выше этапы нарастания магнитного поля до максимума, с последующим его падением. В виду этого, в слабых ИМП замкнутые вихревые электрические поля являются постоянным фактором, оказывающим влияние на исследуемые материалы.

Таким образом, учитывая периодичность резких нарастаний и падений величины магнитного поля, при воздействии ИМП, можно предположить, что воздействие ИМП и ПМП на диамагнитные кристаллы будет несколько различным.

1.1.3. Примеси, как объект воздействия слабых магнитных полей

Особый интерес представляет воздействие слабых магнитных полей на свойства и структуру немагнитных материалов, имеющих различные легирующие примеси, так как было выдвинуто предположение, что магнитные поля оказывают воздействие на точечные дефекты (к комплексам которых относятся и примесные комплексы) и дефекты кристалла. Важный вклад в данное представление оказали работы В.П. Лебедева [94,95]. Эксперименты проводились в области гелиевых температур, так что используемые магнитные поля не удовлетворяли условиям «слабости», однако показанный упрочняющий прирост деформирующего напряжения, возникающий при приложении и снятии магнитного поля, зависит от количества примеси. В рассматриваемых чистых кристаллах Al эффект значителен и проявляется на более широком диапазоне степени деформации. Данные выводы оказались справедливы и в случае воздействий магнитных полей, удовлетворяющих критериям слабости.

Позднее были сделаны выводы, что неравновесность кристаллов, возникающая из-за дефектов или наличия примесей, является важным, и как выяснилось, необходимым условием, обеспечивающим высокую чувствительность свойств и структуры кристаллов к слабым внешним или внутренним магнитным полям [5]. Это предположение, в дальнейшем подтвержденное независимыми исследованиями, было сделано исходя из термодинамической и кинетической особенности открытого магнитоэластического эффекта. Стоит заметить, что влияние даже малых легирующих примесей на отклик регистрируемых свойств при магнитном воздействии на кристаллы, было весьма значительно [7-9,50,95-102]. В работе [101] измерялись зависимости средней длины пробега (l) дислокаций от частоты (ν) вращения образцов чистых кристаллов NaCl и кристаллов NaCl(Ni) в ПМП. Характер двух экспериментальных кривых оказался схож, однако, критические частоты вращения принципиально отличались: для кристаллов NaCl(Ni) критическая частота $\nu_c \approx 80$ Гц, для кристаллов NaCl ≈ 10 Гц, при магнитном поле в 0,3 Тл. В дальнейшем, принципиальная разница в длине пробега дислокаций, после воздействия слабого ПМП, для кристаллов NaCl и NaCl(Ni) была определена и при обычном воздействии магнитного поля. Исследования [94,95] этого эффекта на сериях других кристаллов показали, что критическая частота (ν_c) характеризует элементарный акт магнитного преобразования примесного центра на дислокации. В частности, оказалось [7], что величина ν_c обратно пропорциональна времени $\tau_{др}$ открепления дислокации от примесного центра. Из этого был сделан вывод, что время магнитного открепления дислокации от примеси Ni примерно на порядок меньше, чем от примеси Ca, являющейся постоянной фоновой примесью кристаллов NaCl. В работе [101] пошли дальше и обнаружили, что магнитоэластический эффект для кристаллов NaCl и NaCl(Ni) (причем концентрация Ni $\approx 0,06$ ppm) при их экспозиции в ПМП, различался. Для кристаллов NaCl(Ni) наблюдаемый эффект был более интенсивным, а пороговая величина магнитного поля, в условиях резонанса, для данных кристаллов была в 5 раз меньше, при идентичной величине порогового ПМП. В [76] наглядно продемонстрировали разницу динамики из-

менения свойств кристаллов, после магнитного воздействия, в зависимости от содержания примесей, а также в зависимости от секторов роста, из которых были вырезаны кристаллы. В работах [50,104] было обнаружено, что одним из источников магнитопластичности является объединение диффундирующих парамагнитных ионов примесей в кластеры, димеры и тримеры, причем стоит отметить, что используемые в работе [50] единожды деформированные кристаллы не имели отклика на повторное ИМП воздействие, в то время как данный отклик стабильно наблюдался при предварительном повторном деформировании кристалла.

В [76] было показано, что кристаллы KDP имеют различную динамику изменения микротвердости, после воздействия магнитного поля, в зависимости от сектора роста, из которого они были вырезаны, и как следствие, в зависимости от концентрации внедренных наночастиц TiO_2 , выступающих в роли примеси. Образцы, вырезанные из различных секторов роста, показывали различную динамику изменения твердости, в то время как с увеличением концентрации «примесных» наночастиц TiO_2 разупрочнение образцов после магнитного воздействия постепенно сходит на нет, что говорит о принципиальном влиянии концентрации примеси на интенсивность изменения характеристик кристаллов, после магнитного воздействия.

1.1.4. Воздействия слабых импульсных магнитных полей на свойства и структуру немагнитных материалов

Исследования воздействий слабых ИМП на свойства и структуру немагнитных материалов берут свое начало в 1980х годах. Так, в 1983 году Г.И. Дистлером с коллегами была опубликована работа [105], в которой приводились данные о распаде примесной фазы в кристаллах NaCl после выдержки в

слабом ИМП с максимумом индукции $B \sim 2$ Тл и частотой следования импульсов в 5 Гц (рис. 5).

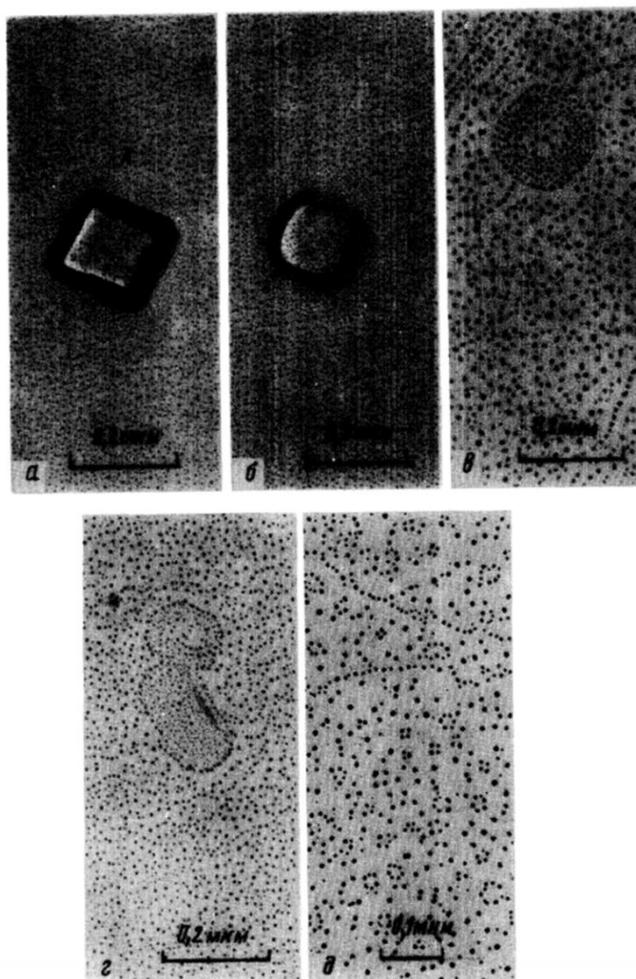


Рис. 5. Стадии распада примесной фазы в кристалле NaCl с CdCl₂, инициированного воздействием слабого импульсного магнитного поля: а, б - до воздействия; в, г, д - через 6, 10, 20 суток после магнитного воздействия [105].

Примеси, изначально имевшие состояние крупных частиц, перестраивались в результате воздействия слабого ИМП, за продолжительные времена, до состояний комплексов точечных дефектов. Наблюдаемая перестройка была аналогична перестройке при отжиге с температурой в 500–600°C с последующей закалкой. Результаты, фиксирующиеся методом декорирования спустя 10–20 суток после магнитного воздействия, также говорили о воздействии магнитного поля на примесные структуры и дефекты в немагнитных кристаллах, что коррелирует с выводами, приводившимися в других работах [94,95].

Между тем, данные работы в то время рассматривались только как любопытные артефакты, не находившие себе места в представлениях о слабых магнитных полях того времени по нескольким причинам. До открытия в 1987 году магнитопластического эффекта [37] не существовало достоверного подтверждения и объяснения возможности долгоиграющих изменений физико-механических характеристик в диамагнитных кристаллах. Поэтому, например, работы [23,24,106], хоть и были посвящены исследованиям воздействий ПМП на физико-механические характеристики немагнитных материалов, не вызывали большого интереса. В случае слабых ИМП [1,105-110] ситуация складывалась немного иным образом. ИМП воздействуют на структуру и свойства кристалла, как магнитным полем, так и образующимся вихревым электрическим полем. Последнее также имеет место при запуске ПМП или переменного магнитного поля и при внесении исследуемого образца в магнитное поле. Но вклад вихревого поля в этом случае намного меньше, чем при систематической накачке образцов короткими импульсами магнитного поля, имеющими практически вертикальный фронт нарастания, из-за которого присутствует значительная вихревая электрическая составляющая, поэтому в исследованиях, не связанных с импульсами магнитного поля им пренебрегают.

Вихревое же электрическое поле создает сложную систему внутренних электрических полей, что усложняет процессы, происходящие в кристалле при выдержке в магнитных полях. Поэтому объяснение механизма воздействия ИМП на свойства и структуру немагнитных кристаллов было и является очень сложной задачей. Большинство же экспертов рассматривало воздействия, оказываемые ИМП не как сложный комплекс электромагнитных сил, а с точки зрения преобладания либо электрических, либо магнитных сил, считая одну из них несущественной. Например, еще в 1965 году в работе Н.В. Загоруйко [24] были опубликованы результаты, говорившие о перемещении дислокаций на фронте нарастания импульса магнитного поля с амплитудой в 17 Тл. Так как направление перемещений дислокаций было чувствительно к направлению по-

ля, наблюдаемый рост пробегов авторы связали только с движением заряженных дислокаций под действием возникающего электрического поля. При этом само электрическое поле не оказывает столь значительного воздействия на свойства и структуру кристаллов, как магнитное поле. Также следует учитывать, что суммарное магнитное воздействие серии коротких импульсов будет много меньше, чем энергия ПМП, схожей величины магнитной индукции B_{\max} . При этом конкретное определение величины магнитной составляющей импульсов магнитного поля крайне трудоемкий процесс даже в наше время, в связи с нелинейной связью общей величины магнитного поля и количества импульсов данного поля. Все это заставило специалистов относиться крайне скептически к опубликованным данным, а отсутствие в ближайшие годы достоверных попыток объяснить механизмы воздействия ИМП на структуру диамагнитных кристаллов от независимых групп ученых только уменьшило заинтересованность в исследованиях ИМП в то время.

Открытие магнитопластического эффекта поспособствовало возобновлению исследований воздействий ИМП на немагнитные кристаллы. Так, под действием единичного импульса магнитного поля наблюдали движение дислокаций без дополнительных нагрузок в кристаллах NaCl, LiF, KCl [54,55], схожее с движением дислокаций, возникающим после приложения ПМП. Активизировались исследования воздействий слабых ИМП на немагнитные материалы. Наблюдались значительные изменения температуры плавления полупроводниковых кристаллов InAs, после воздействия слабых ИМП ($B \sim 0,3$ Тл и $B \sim 0,5$ Тл) [111]. Исследовались особенности магнитопластического эффекта после однократного воздействия импульса магнитного поля (B от 5 до 40 Тл) на фольги из Al и Al-Zn [112]. Причем, в работе [112] наблюдалось необратимое упрочнение исследуемых фольг (рис. 6.).

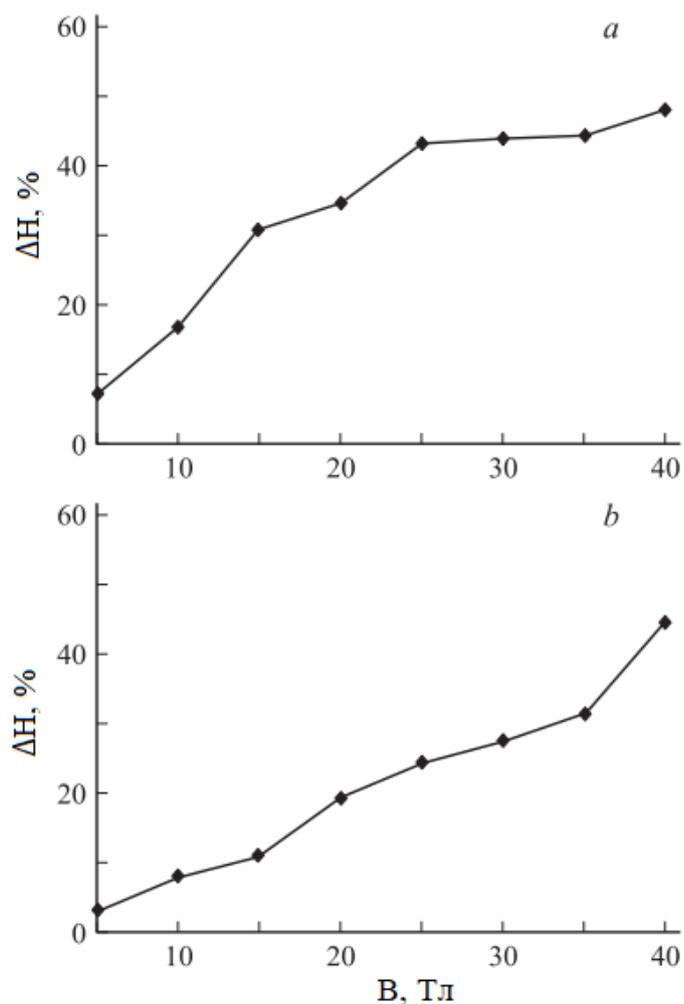


Рис. 6. Зависимости относительного изменения твердости (ΔH) от амплитуды индукции (B) импульсного магнитного поля для фольги из Al(a) и фольги из Al-Zn(b) [112].

Проводились исследования по изучению воздействия ИМП на микротвердость монокристаллов C_{60} [113], а также исследования перемещения дислокаций в кристаллах NaCl в схеме ЭПР в магнитном поле Земли с импульсной накачкой (амплитуда $B \sim 3 \text{ мТл}$) [114]. Кроме того, существующие работы говорят об изменениях состояния поверхности и приповерхностных слоев немагнитных материалов под действием слабых ИМП [1,115] и слабых ПМП [116].

В целом, наблюдаемые изменения принято связывать с реакциями перестроения дефектных структур в кристаллах, за счет снятия запрета на определенные спин-зависимые переходы.

1.1.5. Представления о механизмах магнитоиндуцированных изменениях структуры и свойств немагнитных материалов

Изменения физико-механических характеристик немагнитных материалов под воздействием слабых магнитных полей [23,24] изначально объяснялись не магнитнопластическим эффектом, а действием вихревых электрических полей на заряженные краевые дислокации. Данная гипотеза была отброшена, так как согласно [117] для запуска смещения дислокаций необходимы электрические поля $\sim 10^6$ В/м, в то время как возникающие при включении электрические поля [117]:

$$\sim \frac{B_0 d}{t} \sim 0,1 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}, \quad (3)$$

При $B_0 \sim 1$ Тл (для удовлетворения условий слабости магнитного поля) и размерах образца $d \sim 10^{-2}$ м за время $t = 0,1-1$ с. Где d – размер образца, B_0 – индукция магнитного поля, возникающие при включении, t – время, за которое магнитное поле выходит на постоянные значения индукции. Видно, что сила Лоренца, оказывающая влияния на магнитострикционные эффекты и заряженные дислокации, при включении ПМП, удовлетворяющего критериям слабости, не может вызывать смещение дислокаций, так как она на 6-7 порядков меньше необходимой для открепления дислокаций от стопоров.

Спустя некоторое время, после открытия магнитопластического эффекта, как авторами [35], так и другими независимыми группами были обнаружены схожие отклики структуры и свойств материалов не только на NaCl, но и на множестве других материалов, таких как - LiF, CsI, InSb [43,47,51,118-122], Zn [47], Al [35,49]. Было обнаружено значительное количество родственных явлений, заключающихся в заметном воздействии различных магнитных полей на спектр физико-механических и других структурно-чувствительных свойств немагнитных материалов. Важным шагом стало проведение дополнительных экспериментов по перемене знака поля на обратный. Это показало отсутствие су-

щественного влияния пондеромоторных сил магнитных полей и вихревого электрического поля, возникающего при запуске и отключении ПМП или внесении в него образца. Как результат, у исследователей появилась возможность интерпретировать изменения наблюдаемых характеристик под воздействием магнитного поля с точки зрения только магнитных сил и их воздействия на несовершенства или дефекты кристаллов, опуская иные процессы.

Попытки точного теоретического объяснения наблюдаемых процессов и механизмов магнитоэластического эффекта, предпринятые во многих вышеперечисленных экспериментальных работах, а также в [98,104,123-127], позволяют надежно связывать его происхождение с представлениями о спин-зависимых электронных переходах как в системе дислокация – примесный центр, так и в системе точечных дефектов. Существуют также теоретические исследования природы магнитоэластичности, из которых наибольший интерес представляет серия работ Бучаченко [98,123,124,127], содержащих целый ряд оригинальных идей, касающихся объяснения магнитоэластического эффекта с позиций спинового «нанореактора».

Гипотеза о том, что процессы, протекающие в системе дефектов немагнитных кристаллов под действием слабых магнитных полей, подобны спиновым эффектам в химических реакциях, была выдвинута и экспериментально доказана в [119]. Позднее данная гипотеза получила подтверждение в [79,81].

Также существуют теории, дающие объяснения механизма изменения структуры и свойств немагнитных кристаллов на примере движения дислокаций. Они представляют интерес из-за того, что спиновая конверсия в магнитном поле может произойти только в процессе короткоживущих возбуждений, возникающих из-за безуспешных попыток дефектов кристалла, например, дислокаций, преодолеть энергетический барьер. Так М. Молоцкий полагает [126,128], что дислокация преодолевает стопор с помощью возникновения бокового движения перегиба по дислокационной линии, и оценивает характерное время их взаимодействия величиной $\sim 10^{-7}-10^{-9}$ с. Описанный им способ пре-

одоления локальных барьеров вряд ли может быть основным и единственным. Но данное предположение хорошо описывает длительность стадии преодоления стопора. Ю.И. Головин в своем обзоре [5] приводит данные о том, что можно выделить еще несколько промежуточных стадий преодоления дислокацией стопора. Так, при приближении дислокации к стопору, должно возникнуть и электронное, и молекулярное возбуждение структуры взаимодействующего дислокационного сегмента и атомов стопора, и только затем начнется ожидание необходимой флуктуации. Однако, происходит это только в том случае, если стопор не был преодолен вначале. Аналогично, после успешного спинового преобразования в радикальной паре, необходимо некоторое время, за которое заторможенный дислокационный сегмент на параметрах решетки удаляется от атомов стопора. Но и на этом пути он тоже может быть захвачен другими частями примесного комплекса. Таким образом, крайне вероятно многостадийное преодоление комплекса.

На сегодняшний день предложены различные объяснения спектра наблюдаемых изменений во внешнем магнитном поле. Например, авторы [129,130] придерживаются модели возникновения магнитного момента, создаваемого током переполяризации кристалла при смещении доменной границы. Также существует версия механизма [131], связывающего наблюдаемые эффекты с магнитостимулированным изменением дефектной подсистемы кристалла, на которой происходит пиннинг доменных стенок. Однако, несмотря на огромный шаг, сделанный в сторону понимания механизмов воздействия слабых магнитных полей, возникло множество вопросов, касающихся их природы. Даже в настоящее время нет четкого понимания, единственный механизм или несколько разных определяют природу и процессы магнитного воздействия на структурные и иные свойства материалов с различным типом связи, дефектной структуры, состава и т.п.

Также стоит учитывать и то, что все зафиксированные эффекты, возникшие из-за экспозиции в магнитном поле, имеют различные временные ха-

раактеристики. Так, некоторые отклики проявляются только в процессе выдержки в магнитном поле, другие имеют длительное последствие, при этом изменения свойств и структуры могут быть как обратимыми, так и необратимыми. Кроме того, в ряде случаев наблюдаются временные зависимости с латентным периодом выдержки после отключения магнитного поля, немонотонные или же знакопеременные [5]. Несмотря на большой объем работ по изучению магнитного поля, а также большое количество экспериментальных результатов, объяснить различие поведения временных характеристик для немагнитных материалов на данный момент не удастся.

1.2. Полупроводниковые кристаллы CdTe

В качестве объектов исследования воздействий слабых магнитных полей на структуру и свойства немагнитных материалов были выбраны полупроводниковые кристаллы CdTe, выращенные методом Обреимова-Шубникова в Институте Кристаллографии им. А.В. Шубникова. Теллурид кадмия (CdTe) является представителем класса широкозонных полупроводников соединения A_2B_6 , выделяющимся среди аналогов по целому ряду свойств. Образующие CdTe атомы теллура Te и кадмия Cd имеют высокие атомные номера (52 и 48, соответственно), что обуславливает большую эффективность торможения гамма-излучения и использование меньших объемов материалов при создании рентгеновских детекторов, по сравнению с распространенными полупроводниками: Si, Ge, GaAs. Данные обстоятельства имеют особенно важную роль при создании многоэлементных детекторов рентгеновского излучения, так как высокая тормозная способность материала позволяет создавать детекторы, используемые в широком диапазоне энергий – от 5 КэВ до 10 МэВ, а использование меньших объемов материала способствует увеличению пространственного разрешения и, соответственно, качества изображения. Ширина запрещенной зоны CdTe ($E_g \approx 1,513$ эВ при 300 К [132]) превосходит таковую в Si, Ge и GaAs,

вследствие чего детекторы рентгеновского и гамма-излучения на основе CdTe могут эффективно работать при комнатной температуре. Таким образом, CdTe и твердые растворы на его основе такие как CdZnTe, HgCdTe (реже CdZnTeSe или др.) на сегодняшний день являются лучшими для изготовления детекторов ионизирующего излучения. Наряду с детекторными свойствами CdTe обладает неординарными оптическими свойствами. Их характеризует высокое пропускание в ИК-диапазоне спектра излучения (0,8-25 мкм). Величина электрооптического коэффициента CdTe в 4 раза превосходит GaAs. Кристаллы CdTe, легированные переходными металлами обладают фоторефрактивными свойствами. В связи с этим материал весьма перспективен для инфракрасной оптики и электрооптики. CdTe широко применяется в лазерных затворах (Q – switch), используемых в CO₂ - лазерах. Особое место кристаллы CdTe занимают при использовании их в виде подложек для эпитаксиального наращивания слоев HgCdTe, применяемых в качестве инфракрасных детекторов. Теллурид кадмия наряду с перечисленными важными свойствами, обеспечивающими его применение в целом ряде областей, обладает еще одним уникальным свойством.

С недавних пор растет применение теллурида кадмия при создании тонкопленочных фотоэлектропреобразователей (ФЭП). Среди соединений A₂B₆ он обладает идеальной шириной запрещенной зоны для прямого преобразования солнечного света в электроэнергию, так как полупроводниковые материалы с шириной запрещенной зоны 1,5-1,6 эВ имеют наилучшую эффективность как солнечные элементы. Лишь высокие цены на достаточно чистый материал и подложки из CdTe, а также значительные трудности получения больших объемов CdTe необходимой чистоты и качества ограничивают их применение в настоящее время. В связи с этим, возможности улучшения структуры и свойств уже выращенных кристаллов CdTe, с помощью внешних воздействий, таких как слабые магнитные поля, являются крайне интересными и перспективными.

1.2.1. Кристаллическая структура CdTe

Соединения A_2B_6 при нормальных статических давлениях могут принадлежать к двум основным структурным типам: кубической структуре цинковой обманки (сфалерита) – тип ВЗ, пространственная группа (T_d^2) и гексагональной структуре вюрцита $P6_3mc$ (C_{6v}^4) [133], для которых характерно тетраэдрическое расположение атомов, аналогично наблюдаемому у полупроводников IV группы. Структуры сфалерита и вюрцита очень сходны между собой. Обе структуры имеют 4 атома в первой координационной сфере и 12 – во второй. Межатомные расстояния в тетраэдрах обеих модификаций очень близки как видно из таблицы 1. Сфалеритная фаза является наиболее стабильной, вюрцитная модификация может получена только в неравновесных условиях при осаждении на охлаждаемую подложку или на подложку из другого вюрцитного материала A_2B_6 [134,135]. Ввиду близости обоих типов структур, халькогениды кадмия в процессе получения из газовой фазы, кристаллизуются не только в трехслойной (кубической), но и в двухслойной (гексагональной) упаковке. Возможны структуры с нарушением порядка чередования слоев, что приводит к многослойным политипным формам, как это наблюдается в SiC.

Таблица 1. Основные параметры кристаллической структуры халькогенидов кадмия [133,136].

Соединение	Тип кристаллической структуры	Период решетки, нм		Плотность, г/см ³
CdS	Сфалерит	0,583	-	-
	Вюрцит	0,41348	0,6749	4,82
CdSe	Сфалерит	0,6084	-	-
	Вюрцит	0,4309	0,7021	5,81
CdTe	Сфалерит	0,6481	-	5,86
	Вюрцит	0,457	0,747	-

CdTe, в большинстве случаев, кристаллизуется в структуре цинковой обманки (рис. 7. а.), на одну элементарную ячейку которой приходится 4 молекулы ZnS, атомы которых занимают особые положения с координатами: 4S в положениях (а) $0, 0, 0; 0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}; \frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2}; \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0$ и 4Zn в положениях (с) $\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}; \frac{1}{4}, \frac{3}{4}, \frac{3}{4}; \frac{3}{4}, \frac{1}{4}, \frac{3}{4}; \frac{3}{4}, \frac{3}{4}, \frac{1}{4}$. Кристаллическая структура сфалерита, или цинковой обманки, близка к структуре алмаза, но отличается от него тем, что она содержит атомы разного сорта.

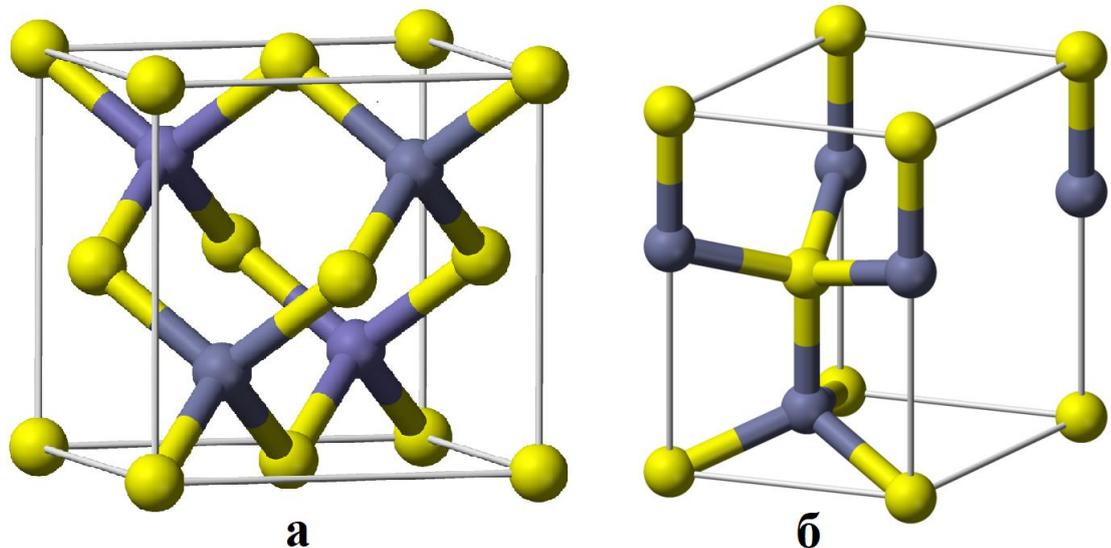


Рис.7. Структуры цинковой обманки (а) и вюрцита (б). Расположение атомов металла (желтые сферы) и неметалла (серые сферы) в структуре.

Важная особенность строения цинковой обманки – отсутствие центра симметрии или инверсии. Слои Zn – S (или тетраэдры ZnS_4) ориентированы вдоль направлений $\langle 111 \rangle$. Вследствие этого кристаллы являются полярными, а противоположно расположенные в них плоскости (hkl) и направления $[hkl]$ могут иметь различные физические и химические свойства. Благодаря этому кристаллы цинковой обманки проявляют пьезоэлектрические свойства. Кроме того, в соединениях A_2B_6 со структурой сфалерита наблюдается спайность остова по плоскостям куба (100), которая характерна для веществ с большей долей ионности связи.

1.2.2. Система Cd-Te

Соединение CdTe плавится конгруэнтно при температуре 1365 К и образует вырожденные эвтектики со своими компонентами. Образование соединения CdTe характеризуется на диаграмме состояния острым пиком, который смещен от стехиометрического состава в сторону избытка Te на величину $1,4 \cdot 10^{17}$ ат/см³.

На рисунке 8 показана область гомогенности соединения CdTe [137], построенная на основе массива данных о CdTe. Данные о предельной растворимости соединений в CdTe, были получены с помощью масс-спектрометрии и измерения оптической плотности пара [138,139]. Температуры фазовых переходов вблизи границ гомогенности были определены с помощью анализа изломов температурных зависимостей, полученных методом э.д.с. [140]. Температурные области существования смеси двух фаз получены из исследований диффузии примесей индия в кристаллах CdTe [141].

Использованные методы измерения концентраций растворенных компонентов не зависят от зарядового состояния точечных дефектов и поэтому дают значительно большие величины растворимостей порядка $10^{19} - 10^{20}$ см⁻³, по сравнению с методами, основанными на измерении концентраций заряженных дефектов [142].

Установленный сложный характер границ гомогенности, обусловлен наличием в CdTe полиморфных превращений, связанных с переходом вюрцит-сфалерит.

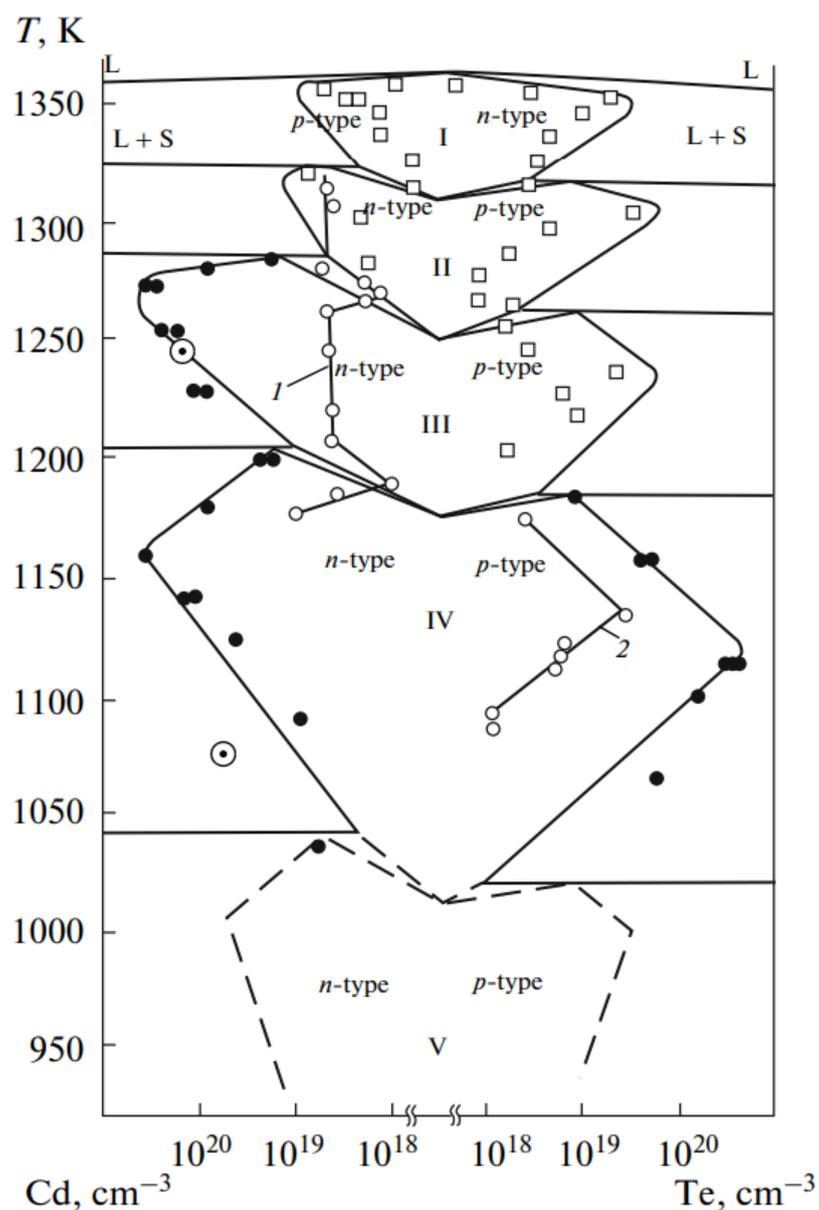


Рис. 8. Область гомогенности CdTe.

1.2.3. Электрофизические свойства CdTe

Химическая связь в CdTe носит смешанный ковалентно-ионный характер. Ионная составляющая связи в этих соединениях достигает 45-70%. Большая доля ионной составляющей связи в соединениях A_2B_6 обусловлена значительными различиями в электроотрицательности элементов ($A_2 < B_6$), образующих

соединение. Это приводит к большим значениям ширины запрещенной зоны и более низким значениям подвижности носителей заряда в гомологическом ряду. В таблице 2 приведены наиболее важные электрофизические характеристики CdTe.

Один из основных механизмов образования фаз переменного состава на основе этих соединений состоит в расположении избыточных атомов компонентов в узлах своей подрешетки, в то время как в другой подрешетке возникают вакансии, образуются растворы вычитания. Удельное сопротивление и тип проводимости в этих соединениях определяются не столько легирующими примесями, сколько характерными для них структурными дефектами, связанными с отклонением их состава от стехиометрического. Избыток металлической составляющей обуславливает электронную проводимость, избыток халькогенов — дырочную.

Таблица 2. Электрофизические свойства CdTe [143].

	Ср. ат. номер Z	Плотность, г/см ³	Тем-ра плавления, °C	Микротвердость, кг/мм ²	Энергия атомизации, ккал/моль	Ширина запрещенной зоны (при 300 К), эВ	Энергия образования e – h пары ε, эВ	Подвижность носителей заряда μ, см ² /(В·с)		Время жизни носителей заряда τ, с	
								e	h	e	h
CdTe	50	5,86	1092	60	102,55	1,5	4,4	1200	100	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶

Наиболее важными электрофизическими характеристиками кристаллов CdTe являются удельное сопротивление, концентрация носителей заряда и произведение времени жизни на подвижность. Так, ширина запрещенной зоны E_g – одна из наиболее существенных характеристик полупроводника. Она определяет ряд других параметров, от которых зависит качество работы детектора. Это, например, подвижность носителей заряда $\mu_{e,h}$, которая, как правило, изменяется обратно пропорционально ширине запрещенной зоны, или удельное сопротивление ρ , которое увеличивается с ростом E_g . Соответственно, темновые токи и шумы уменьшаются с ростом E_g .

Для применения радиационных детекторов требуется материалы с высоким электрическим удельным сопротивлением и высоким временем жизни (рекомбинация и захват ловушкой) носителей заряда, а также по хорошему переносу обоих носителей заряда. Эти требования минимизированы самим выбором CdTe, так как он обладает сравнительно хорошими подвижностями носителей зарядов, а теоретические времена жизни для дырок и электронов, вычисленные с помощью коэффициента оптического поглощения, пригодны для непосредственного использования [144,145]. При этом надо учитывать, что эти параметры достигают максимума только в собственном материале и очень чувствительны к точечным дефектам, которые играют роль центров рекомбинации. В результате, в реальных кристаллах время жизни на много порядков меньше теоретических значений. В общем случае точечные дефекты (химические примеси и собственные дефекты), ведущие себя как неглубокие ловушки, и линейные или объемные дефекты являются главными причинами деградации данных параметров.

Глубокие примеси в кристалле CdTe могут работать как ловушки для носителей заряда, захватывающие электроны и дырки. Также они могут работать как центры рекомбинации, захватывая электроны и дырки, уничтожая их. Захваты и рекомбинации способствуют потере носителей заряда и, следовательно, уменьшают среднее время жизни носителей. Структурные дефекты, такие

как точечные дефекты (вакансии и межузельные дефекты, которые ведут себя как акцепторы и доноры соответственно), а также линейные дефекты или дислокации, появляются в решетке напряженных кристаллов, и могут вести к захвату и потере носителей.

Магнитные свойства кристаллов CdTe значительно зависят от состава кристаллов и легирующих примесей, добавляемых в процессе роста для компенсации собственных дефектов и улучшения необходимых характеристик. Так, известно, что кристаллы CdTe(Ge) [146] CdTe(In) [147], CdTe(Cl) [147] и CdZnTe [148] ведут себя как парамагнетики при температурах ниже 50К, за счет вклада Ван-Флековского парамагнетизма. В области температур 50-300К парамагнитная составляющая уменьшается, пока не пропадает вовсе. Тем не менее, даже при 300К магнитные свойства кристаллов CdTe существенно отличаются, что показано в табл. 3

Таблица 3. Физические свойства кристаллов CdTe [147].

Образец	Тип проводимости	Удельное электросопротивление, Ом·см	Магнитная восприимчивость, $\chi \cdot 10^8$, см ³ /г
CdTe	p	10^4	-23
CdTe(In)	n	3×10^7	-15
CdTe(Cl)	p	3×10^8	-35

1.2.4. Собственные дефекты и примеси в CdTe

Наличие в кристаллах различных структурных дефектов и незначительных примесей, как писалось выше, оказывает сильное влияние на свойства кристалла. Свойства соединений A_2B_6 , также, как и других соединений с узкой областью гомогенности и чередованием фаз, определяются главным образом природой и концентрацией точечных дефектов.

В равновесном состоянии точечные дефекты в кристалле термодинамически стабильны. Как собственные дефекты, так и примеси в CdTe могут принимать участие в создании дефектных комплексов. Концентрации разных типов дефектов в кристалле являются взаимосвязанными. Процессы образования точечных дефектов обычно представляются в виде химических реакций, которые получили название «квазихимических» [149,150], поскольку компонентами реакций являются не химические элементы, а дефекты и их комплексы. Несмотря на наличие значительного количества экспериментальной информации о разнообразных дефектных центрах в CdTe, природа этих центров, их химический состав, процессы образования, температуры существования находятся только в стадии изучения.

Так, бинарное соединение теллурида кадмия при заданной температуре образует кристаллическую структуру, которая отвечает минимуму свободной энергии Гиббса G :

$$G = H - T \cdot S \quad (4),$$

где H — энтальпия, S — энтропия системы, T — абсолютная температура.

При $T = 0$ $G = H$ и все атомы Cd и Te находятся на своих собственных узлах кристаллической решетки. При данных условиях кристалл находится в стехиометрическом и полностью упорядоченном состоянии. При $T \neq 0$ состояние с минимумом энергии Гиббса (G) будет соответствовать кристаллу с определенной неупорядоченностью. Атомы Cd и Te в данном случае могут находиться не на своих собственных узлах решетки, образуя собственные точечные дефекты: вакансии (V_{Cd} , V_{Te}), межузельные атомы (Cd, Te) и иные межузельные дефекты. Собственные дефекты могут также вводиться в кристалл при определенных условиях роста для получения нестехиометрических кристаллов, или с помощью отжига кристалла в атмосфере паров Cd или Te. Кроме того собственные дефекты могут возникать и при радиационном облучении кристаллов.

Очевидно, что избыток кадмия может привести к образованию межузельного Cd или же вакансиям теллура V_{Te} , а избыток теллура — межузельного Te или вакансиям кадмия V_{Cd} . Межузельный металл Cd, как и вакансии неметалла V_{Te} должны быть донорами, тогда как межузельный неметалл Te и вакансии металла V_{Cd} — акцепторами. В действительности ситуация представляется несколько сложнее.

Если полное число узлов решетки обозначить N , а число атомов в узлах Cd и Te как N_{Cd} и N_{Te} , соответственно, то мерой стехиометричности кристалла S_{st} , может служить соотношение:

$$S_{st} = \frac{N_{Cd} - N_{Te}}{N} \quad (5)$$

Полностью стехиометрическому кристаллу будет соответствовать $S_{st}=0$. При $S_{st} > 0$ в кристалле будет наблюдаться избыток кадмия, при $S_{st} < 0$ — избыток теллура.

Таблица 4. Фрагмент таблицы Менделеева с химическими элементами, которые формируют соединения A_2B_6 [151].

I	II	III	IV	V	VI	VII
		5 B	6 C	7 N	8 O	9 F
		13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl
29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br
47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I
79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At

Кроме того, в кристалл могут попадать примесные атомы какого-либо элемента X , которые могут становиться примесями замещения (X_{Cd} , X_{Te}) или примесями внедрения (X_i). Тогда, если N_X — число примесных атомов, то относительная концентрация примесей будет:

$$n_x = \frac{N_x}{N} \quad (6),$$

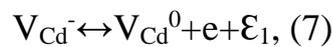
Как видно из таблицы 3 элементы V группы P, As, Sb являются акцепторами, когда они замещают Te, а Cu, Ag, Au, являются акцепторами, когда они замещают Cd. Соответственно Al, Ga, In на месте Cd, а Cl, Br, I — на месте Te должны быть донорами.

Другими словами, если примесями замещения металла или неметалла выступают атомы химических элементов из соседней группы таблицы Менделеева, то они могут отдавать или принимать лишь один электрон. Такие примеси называются простыми примесями. Они могут находиться в нейтральном или однократно заряженном состоянии и образуют в запрещенной зоне локальный энергетический уровень. Примеси IV группы таблицы Менделеева могут образовывать как однократно, так и двукратно ионизированные дефекты замещения в обеих подрешетках и являются достаточно сложными в описании.

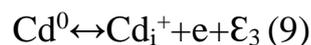
Простой донор, например, характеризуется энергией самого низкого уровня электрона E_D (энергетический уровень донора), находящегося на данной примеси. Энергия ионизации такого донора равна разнице $E_C - E_D$ и соответствует минимуму энергии, необходимому, для перехода электрона из связанного состояния, на нейтральном доноре, в состояние свободного электрона, на дне зоны проводимости E_C . Примесь при этом будет получать положительный заряд. Аналогично, простой акцептор захватывая электрон из валентной зоны, приводит к образованию в последней свободной дырки. При этом примесь будет иметь отрицательный заряд. Энергия ионизации акцепторного уровня будет равняться разнице между энергетическим уровнем акцептора E_A и максимальным энергетическим уровнем валентной зоны — $(E_A - E_V)$. Уровни примесей и других точечных дефектов часто используются в виде маркера дефекта в двух зарядовых состояниях, которые отвечают занятому и незанятому уровням. В таких обозначениях донорный уровень E_D будет отражаться $E(+/0)$ или $E^{(+/0)}$; акцепторный E_A — соответственно $E(-/0)$ или $E^{(-/0)}$.

Если точечный дефект может принимать или отдавать больше чем один электрон, то энергетический спектр такого центра является сложнее. В случае, когда акцепторная примесь X, например, может принимать один или два электрона, то это означает, что она может находиться в трех зарядовых состояниях — X° , X^{-} , X^{2-} и приводить к появлению в энергетическом спектре двух локальных энергетических уровней.

Так, вакансия кадмия может находиться в трех зарядовых состояниях: V_{Cd}^{2-} , V_{Cd}^{-} , V_{Cd}° . Процессы образования разных зарядовых состояний V_{Cd} можно описать с помощью квазихимических реакций [152]:



Верхний индекс отвечает эффективному заряду, ϵ_1 и ϵ_2 - энергии реакций, которая равняется в данном случае энергиям ионизации соответствующих состояний. Атомы Cd или Te могут выходить из межузельной позиции, образуя межузельные дефекты. Процесс ионизации межузельного кадмия может быть описан, например, так:



Относительно энергетического положения уровней этих дефектов в CdTe в литературе есть определенные расхождения. Большинство авторов сходятся на том, что энергетические уровни вакансий V_{Cd}^{-} и V_{Cd}^{2-} находятся в интервалах $E(-/0) = E_v + 0,05 \div 0,4$ эВ и $E(2-/-) = E_v + 0,6 \div 0,9$ эВ, соответственно. Хотя по данным, которые получены более точными и более надежными экспериментальными методами [149], только дважды заряженная вакансия кадмия дает уровень в запрещенной зоне, энергия ионизации которого не больше 0,47 эВ, то есть $E(2-/-) = E_v + 0,47$ эВ. Уровень с энергией $E(-/0)$ не попадает в запрещенную зону. Межузельный же кадмий является мелким донором с энергией $E_{Cdi} = E_C - 0,002$ эВ.

Вакансия теллура в CdTe также может находиться в трех зарядовых состояниях V_{Te}^{2+} , V_{Te}^{+} , V_{Te}^0 . В запрещенной зоне находится только уровень $E(+/0) = E_V + 0,2$ эВ, тогда как уровень $E(2+/+)$ находится в валентной зоне [153].

Из всех возможных легирующих примесей основное внимание уделено примесям хлора и комплексам с их участием, поскольку именно CdTe, легированный хлором, является перспективным материалом для изготовления детекторов в гамма-излучения.

1.2.5. Примеси и комплексы хлора CdTe

Поведение хлора в CdTe изучается многими исследователями с тех пор, как было предложено использовать CdTe(Cl) в качестве материала для детекторов ионизирующего излучения.

Выращенный методом направленной кристаллизации и легированный хлором CdTe является, в отсутствие других легирующих компонентов, высокоомным материалом ($\rho > 10^7$ Ом·см) p-типа с концентрацией дырок $p \sim 10^8$ см⁻³ (при 300 К) и холловской подвижностью дырок $\mu_h \sim 50$ см²·В⁻¹·с⁻¹ [154]. Высокое удельное сопротивление материала возникает из-за компенсации и образования дефектных комплексов из примесных (Cl_{Te}) и собственных (V_{Cd}) дефектов. После отжига в атмосфере насыщенной парами кадмия при температурах $T = 500$ - 900°C , в течение нескольких часов, кристалл становится низкоомным, с n-типом проводимости. В этом случае компенсация практически исчезает, и концентрация свободных электронов может достигать $n \sim 2 \cdot 10^{17}$ см⁻³. Согласно классическим работам [149, 152] отжиг в атмосфере паров кадмия приводит к уменьшению концентрации вакансий кадмия до 10^{15} см⁻³, в нарушении, таким образом, условия компенсации.

Емкостные измерения, проводившиеся в данных работах, показали, что $(N_D^+ - N_A^-) \sim 9,6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, что хорошо согласуется с концентрацией свободных электронов. То есть, в этом случае хлор, который имеет 7 электронов на внешней оболочке, замещает теллур и ведет себя, как простой донор. Аналогичные результаты были получены и для CdTe(In) [155]. Трехвалентный индий, замещающий кадмий, ведет себя также как донор.

В реальных кристаллах разноименно заряженные примеси и собственные дефекты при определенных условиях могут вступать во взаимодействие и образовывать комплексы (ассоциаты). Энергетические уровни составляющих комплекса исчезают и появляются уровни, которые приписываются новообразованному комплексу. Комплексы могут также диссоциировать. Концентрации составляющих и их комплексов могут быть определены на основе закона действующих масс:



Если $[A]$, $[B]$ и $[AB]$ — соответствующие концентрации, то температурная зависимость концентрации комплекса $[AB]$ определяется соотношениями:

$$[AB] = C[A][B] \exp\left(\frac{\Delta\varepsilon}{kT}\right) \quad (11)$$

А константа диссоциации:

$$K = C \exp\left(-\frac{\Delta\varepsilon}{kT}\right) \quad (12)$$

позволяет найти энергию связи комплекса $\Delta\varepsilon$. В качестве компонентов А и могут выступать как примеси, так и межузельные атомы и вакансии.

В CdTe наиболее известными и изученными являются комплексы, одной из компонент которых выступает акцепторная вакансия Cd, а в качестве донора выступают элементы VII (Cl) или III (In) групп таблицы Менделеева, которые замещают Te или Cd соответственно. Глубина залегания уровней комплексов может быть оценена из соотношения:

$$E_{(V_{Cd}Cl)} = E_{V_{Cd}} - \frac{e^2}{\epsilon R_n} \quad (13)$$

Слагаемое $e^2/\epsilon R_n$ задает смещение уровней вакансий V_{Cd}^{2-} или V_{Cd}^- которое предопределено наличием заряженного донора, например, Cl_{Te}^+ в отдалении R_n от вакансии. В зависимости от положения уровня Ферми эти уровни могут играть роль центров захвата и обеспечивать равновесную проводимость. В работе [156] из измерений эффекта Холла и спектральной зависимости эффекта фото-Холла установлено наличие уровня $E_V+0,95$ эВ, который приписывается V_{Cd}^{2-} .

Следовательно, легирование хлором CdTe приводит к уменьшению концентраций изолированных вакансий V_{Cd} . На рисунке 9 [157], приведена зависимость концентраций разных дефектов и комплексов при участии хлора (N_T) от концентраций введенного хлора Cl. Видно, что концентрация V_{Cd} , которые действуют как акцепторы, сильно уменьшается, в то время как концентрации межузельного кадмия и комплексов при участии хлора — растут. По оценкам авторов [155] при $T=450^\circ C$ V_{Cd} в основном связаны в комплексы. Доминируют акцепторные ($V_{Cd}^{2-}Cl^+$) (59%) и нейтральные ($V_{Cd}^{2-}2Cl^+$) (40%) комплексы, тогда как изолированными остаются только 0,089% от всего количества вакансий кадмия.

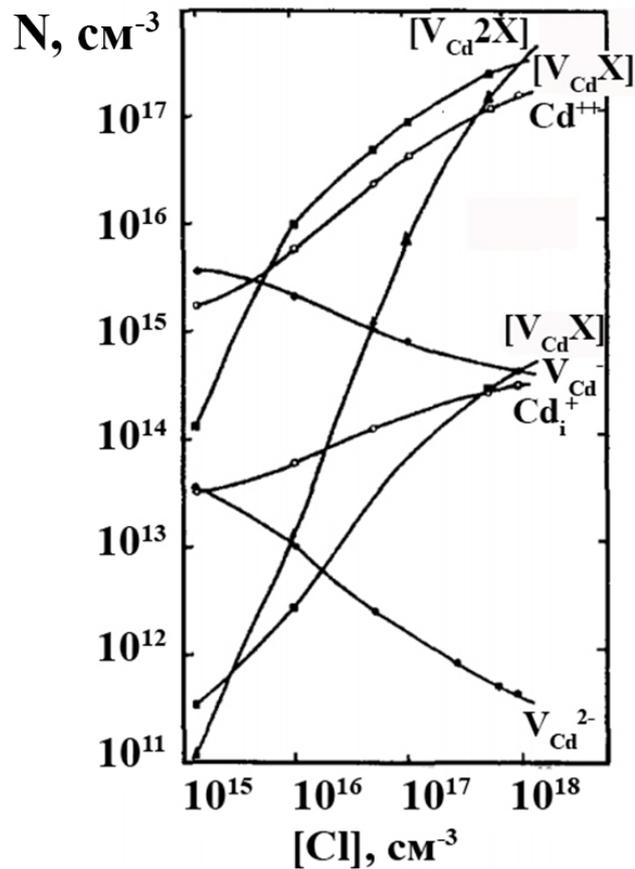


Рис. 9. Зависимость концентрации дефектов и комплексов от количества хлора для кристаллов CdTe(Cl) [157].

В кристаллах CdTe(Cl) имеет место ряд интересных эффектов, которые нельзя объяснить в рамках моделей изолированных доноров или акцепторов. В частности, в [158] наблюдалась очень медленная кинетика фотопроводимости и фотоемкости в образцах с концентрацией хлора $N_{Cl} \sim 10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Причем интересно отметить, что кристаллы CdTe(Cl) оказались весьма чувствительны к микроволновому излучению [159,160], которое, активируя центры Cl_{Te}, приводит к увеличению линий фотолуминесценции экситонов, связанных с соответствующими донорными центрами Cl_{Te}.

В условиях гидростатического давления $P > 10^8 \text{ Па}$ в таких образцах имеет место сильный рост сопротивления, а также коэффициента Холла R_H . Эти и другие эффекты свидетельствуют о том, что хлор введенный в CdTe предподре-

деляет, кроме простых случаев, появление более сложных центров с необычными свойствами.

Хлор и вакансии кадмия могут участвовать и в больших сложных комплексах. В частности, при одновременно легировании CdTe Cu и Cl могут образовываться комплексы с (V_{Cd}^-, Cl^+) и Cu_{Cd} или $Cu_i^+ - (Cl_{Te}^+ V_{Cd}^- Cu_{Cd,i}^{\pm})$ [160,161]. Одним из методов исследования симметрии и микроскопической структуры этих комплексов является метод инфракрасной спектроскопии [162], который дает возможность изучить частоты локальных колебаний, который обусловлены комплексами.

1.2.6. Примеси и комплексы Fe в CdTe

Железо, в качестве легирующего компонента кристаллов CdTe, на сегодняшний день, довольно широко исследовано. Данный элемент так же, как и Cl, используется для компенсации выращенных кристаллов. Кристаллы CdTe(Fe) представляют из себя высокоомные полупроводниковые кристаллы p-типа, при отсутствии дополнительных легирующих компонентов. Однако, в случае поликристаллических слитков CdTe(Fe), представляющих из себя текстуры с размером монокристаллических зерен 1-2 мм, полученный материал будет низкоомным ($\rho \approx 10^{-3}-10^{-4}$ Ом·см [157]). Кристаллы CdTe(Fe), в рамках данной работы, интересны тем, что данные кристаллы легированы магнитным материалом. Высокое удельное сопротивление [163] данных кристаллов возникает из-за упомянутой выше компенсации и образования дефектных комплексов из примесных (Fe_{Cd}) и собственных дефектов (V_{Cd} , $Te_{\text{межуз}}$). Так, Fe^{2+} замещает Cd^{2+} в случайных позициях решетки [164]. Репрезентативные спектры фотолюминесценции, полученные в работах [157,163,165] показали, что существующие полосы люминесценции соответствуют экситонному и межпримесному излучению донорно-акцепторных пар с участием мелких доноров и акцепторов А-центров

(V_{CdD}). Причем в данных работах спектры, отвечающие примесным дефектам Fe, несколько отличаются: 1,48 эВ [157], 1,475 эВ [163] и 1,465эВ [165]. Впрочем, в работе [148] упоминаются не только заряженные доноры Fe^{2+} , но и Fe^{3+} , а нижний предел расположения уровня Fe в валентной зоне определен как $(E_g - E_0)$, где E_g – ширина запрещенной зоны $\approx 1,595$ эВ [166], E_0 – энергия оптической ионизации Fe $\approx 1,465$ эВ. Нижний предел расположения Fe соответствует 130 мэВ в валентной зоне (Рис. 10.) Таким образом, было определено, что донорный уровень $Fe^{2+/3+}$ в CdTe лежит на 130-135 мэВ выше валентной зоны.

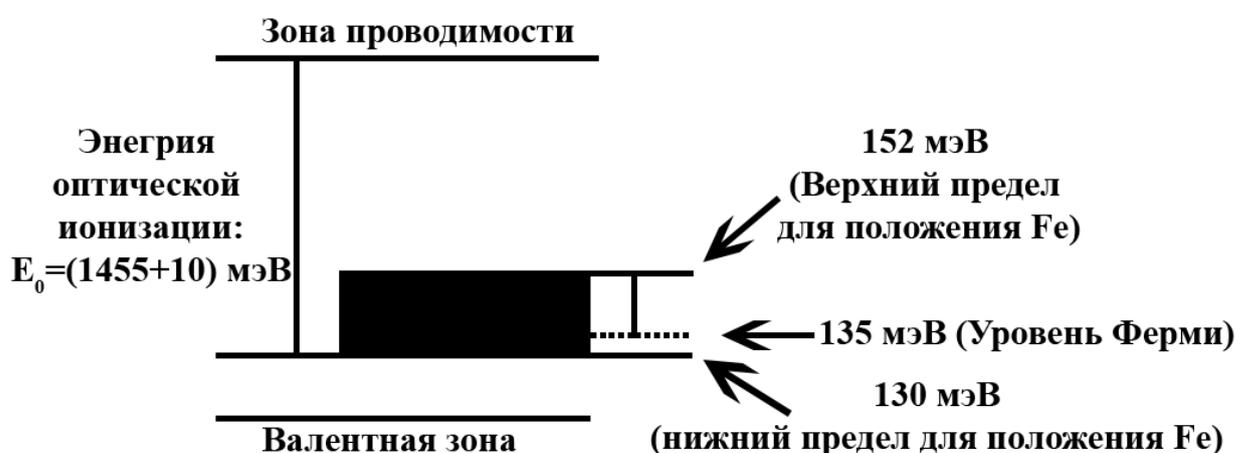


Рис. 10. Положение донорного уровня $Fe^{2+/3+}$ в запрещенной зоне CdTe. Уровень Fe расположен в затененной области [165].

Было определено, что, когда доноры Fe компенсируются мелкими акцепторами, так что уровень Ферми находится близко к уровню железа, в кристалле существуют центры железа как в зарядовых состояниях Fe^{2+} , так и в Fe^{3+} . В этом случае возможны оптические переходы между валентной зоной и уровнями железа.

По аналогии с дефектными примесными комплексами Cl при легировании CdTe уменьшается концентрация изолированных вакансий V_{Cd} . Что приводит к образованию нейтральных комплексов ($V_{Cd}^{2-}Fe^{2+}$), а также некоторых комплексов с Fe^{3+} , однако их приблизительное соотношение и концентрация несвязанных вакансий V_{Cd} , насколько известно автору данной работы, на дан-

ный момент не определено. Кроме того, остается не совсем ясно положение Fe^{3+} в системах дефектных примесных комплексов.

При легировании одновременно Cl и Fe , легирующие элементы могут участвовать как в малых комплексах, описанных выше, так и в больших сложных комплексах. В качестве примера, могут образовываться комплексы с (V_{Cd}^-, Cl^+) и Fe_{Cd} (либо обратные, т.е. Fe и Cl заменяют друг друга), а также сложные комплексы типа $Fe_i^{2+} - (Cl_{Te} + V_{Cd} - Fe_{Cdi}^{\pm})$, которые также могут являться обратными. Однако в данных системах остается непонятным место Fe^{3+} , в случае встраивания его в сложные дефектные комплексы.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА И УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

2.1. Установки по воздействию слабыми магнитными полями

Поставленная в данной работе задача по изучению результатов воздействий слабых магнитных полей на структуру и свойства монокристаллов CdTe(Cl) и CdTe(Cl,Fe), выполнялась с использованием лабораторной установки по генерации слабого ИМП и установки по генерации слабого ПМП. Воздействием слабым ИМП проводилось на установке (рис. 11.), позволяющей получать последовательность импульсов магнитного поля за счет периодического разряда накопительной емкости на индуктор. На рисунке 12 представлена осциллограмма единичного импульса магнитного поля, действующего на образец, в процессе воздействия на него слабым ИМП. Интервал между импульсами магнитного поля составлял $\approx 8,3 \cdot 10^{-2}$ с. Образец располагался на диамагнитной подставке в центре соленоида, причем размер соленоида во много раз превышает геометрические размеры образца. Положение образца, в процессе воздействия слабого ИМП соответствовало положению с минимумом градиента магнитного поля.

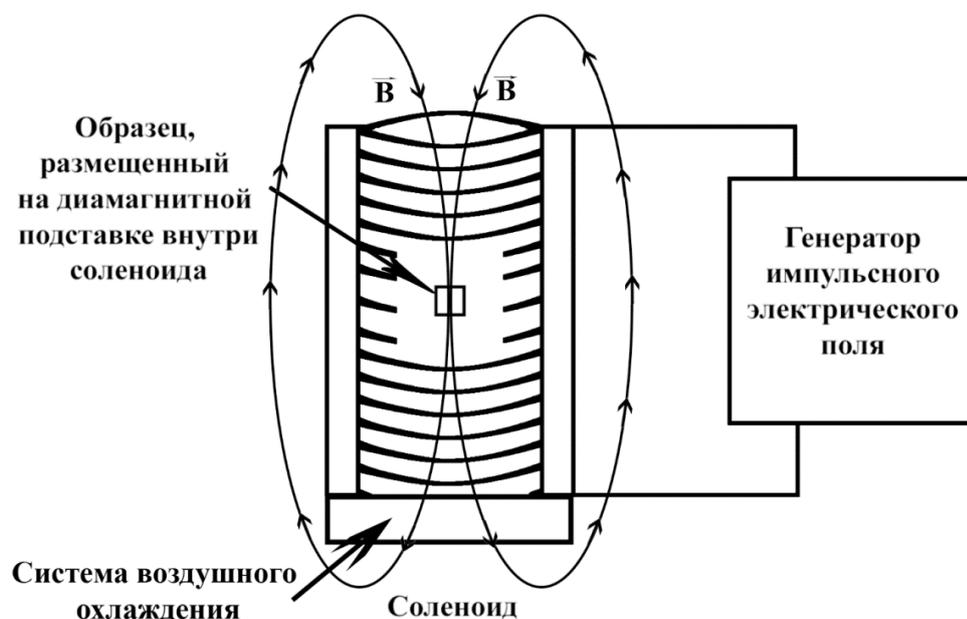


Рис. 11. Общий вид установки по генерации слабого ИМП.

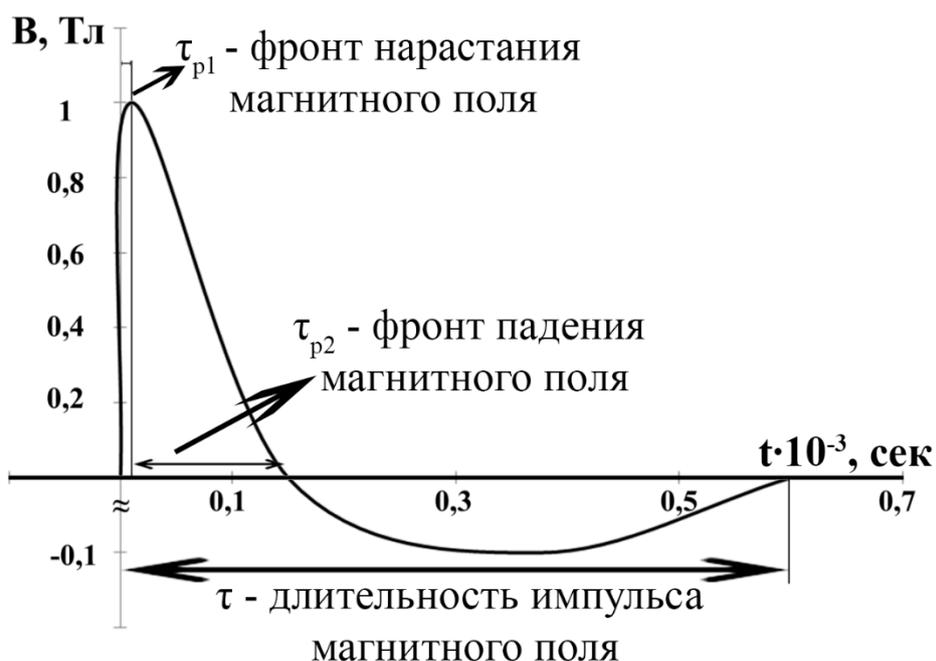


Рис. 12. Осциллограмма импульса магнитного поля. Временные периоды существования импульса, используемого в данной работе, постоянны для любых характеристик магнитного воздействия: фронт нарастания импульса $\tau_{p1} \approx 10^{-6} \text{с}$, фронт последующего падения $\tau_{p2} \approx 10^{-4} \text{с}$, и «обратная» часть импульса $\tau_{p3} \approx 5 \cdot 10^{-4}$. Общая длительность импульса $\tau \approx 6 \cdot 10^{-4} \text{с}$. Интервал между импульсами магнитного поля $\sim 8,3 \cdot 10^{-2} \text{с}$.

При воздействии ИМП на образцы, за счет диэлектрических и магнитных свойств используемых образцов, может происходить нагрев образцов из-за образования диэлектрических и магнитных потерь. Для того чтобы исключить влияние нагрева на наблюдаемые магнитоиндуцированные изменения необходимо выполнить подбор характеристик слабого ИМП, при котором будет наблюдаться значительный отклик на воздействие слабым ИМП при наименьшем нагреве образца. В ходе проведенных измерений было определено, что для выполнения данного условия оптимальными характеристиками слабого ИМП являются: максимум амплитуды магнитного поля (B_{\max})=1,04 Тл со временем ($t_{\text{эксп}}$) экспозиции в магнитном поле =10 мин и частотой следования импульсов (ν)=12 Гц. При данных характеристиках слабого ИМП наблюдается значительный отклик материала на воздействия слабыми ИМП при нагреве образца, происходящем в процессе магнитного воздействия, не более чем на 1,5 К, в случае использования системы воздушного охлаждения образцов, и не более чем на 5-6 К в отсутствие системы воздушного охлаждения. Измерение температуры образцов производилось с использованием хромель-алюмелевой термопары и универсального вольтметра ЦЗ1.

Слабое ПМП создавалось электромагнитом. Образец свободно стоял на диамагнитной подставке между полюсами электромагнита, диаметр которых во много раз превышал размеры образца. Слабое ПМП, используемое в работе, имело следующие характеристики: амплитуда $B_{\max}=1$ Тл, длительность экспозиции в магнитном поле ($t_{\text{эксп}}$)=10 мин, продолжительность фронта нарастания магнитного поля (τ_{p1})~0,1 с. На рисунке 13 представлен теоретический вид момента «включения» постоянного магнитного поля.

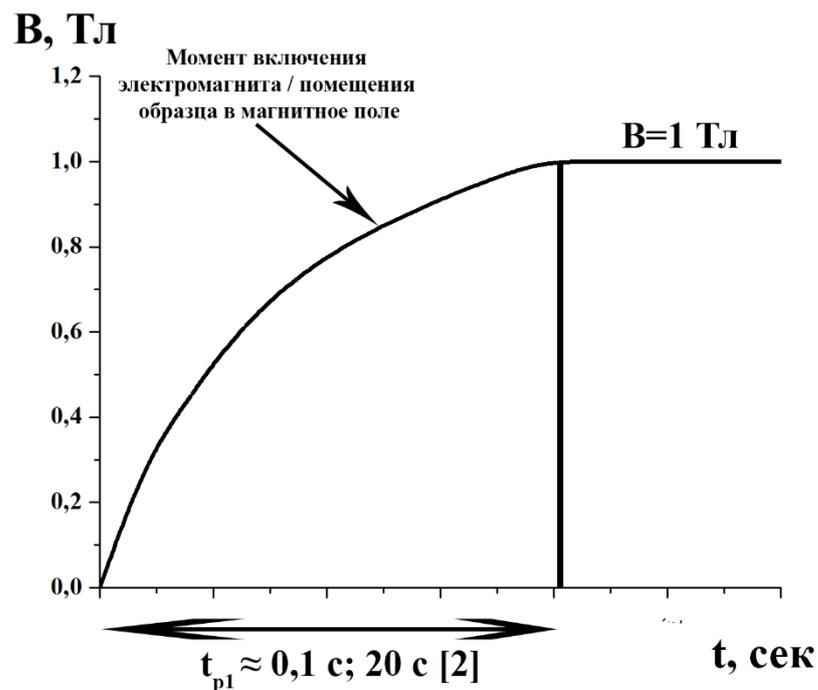


Рис. 13. Теоретический вид момента «включения» постоянного магнитного поля при $B_{\max}=1$ Тл, используемого в данной работе и в [2].

Вектор магнитной индукции \mathbf{B} в экспериментах по воздействию слабыми ИМП или ПМП на исследуемые кристаллы, был перпендикулярен плоскостям кристалла (110) или $(\bar{1}\bar{1}1)$ (Рис. 14.).

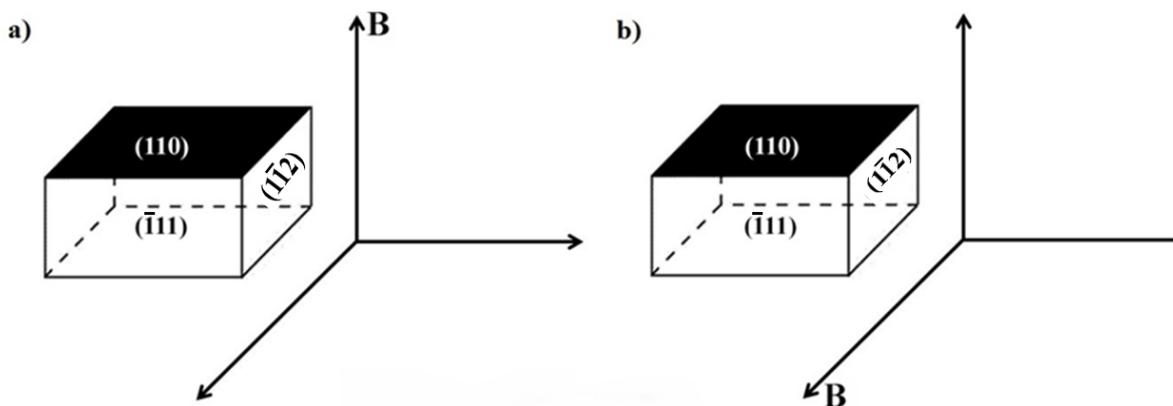


Рис. 14. Направление вектора магнитной индукции \mathbf{B} , относительно исследуемого кристалла: а) - \mathbf{B} перпендикулярен плоскости (110) ; б) - \mathbf{B} перпендикулярен плоскости $(\bar{1}\bar{1}1)$; (110) – рабочая плоскость кристалла, образованная сколом по плоскости спайности.

2.2. Подготовка исследуемых образцов

Объектами исследования являлись кристаллы CdTe, выращенные методом Обреимова–Шубникова в Институте Кристаллографии им. А.В. Шубникова с добавлением легирующих компенсационных примесей Cl или Fe. В работе использовались кристаллы CdTe(Cl), а также кристаллы CdTe(Cl,Fe). Кристаллы легировались хлором, вводимым в слабой концентрации в виде CdCl₂. Кристаллы CdTe(Cl) обладали избытком Cd в 0,0054% (n-тип проводимости), а также с избытком Te в 0,0054% (p-тип проводимости). Кристаллы CdTe(Cl,Fe) имели p-тип проводимости и обладали избытком Te в 0,0021% (подробнее о примесном составе исследуемых кристаллов в табл. 5).

Рабочие поверхности были образованы естественными сколами по плоскостям спайности (110). Для повышения качества рабочей поверхности, в случае исследований состояния поверхности, образцы скалывались при температуре жидкого азота. Плоскости ($\bar{1}11$) и ($1\bar{1}2$) образцов CdTe предварительно подвергались шлифовке алмазными порошками АСМ 7/5, АСМ 5/3 и АСМ 3/1, для снятия загрязнений и пленки окислов, а также достижения необходимых геометрических размеров. Исследуемые образцы имели форму прямоугольного параллелепипеда и обладали различными геометрическими размерами, никогда не превышающими 10x5x5 мм. В каждом исследовании использовались образцы, имеющие идентичные геометрические размеры, за исключением специально оговоренных случаев.

В каждом исследовании присутствовал контрольный образец, являющийся зеркальным сколом исследуемого образца. Каждый контрольный образец подготавливался идентично исследуемому образцу. Условия хранения и измерения контрольных образцов были идентичны исследуемым образцам. Для снятия электрических характеристик, на рабочие поверхности образцов наносились золотые контакты. После чего на образцах с нанесенными золотыми

контактами производилось предварительное измерение вольт-амперных характеристик (рис. 15.), а также снятие зависимости тока от времени ($I(t)$) для определения стабильности электрических характеристик данных образцов и оценки качества нанесенных контактов (рис. 16.). Для исключения влияния вклада контактного сопротивления проводились дублирующие проверочные эксперименты с использованием серебряных контактов.

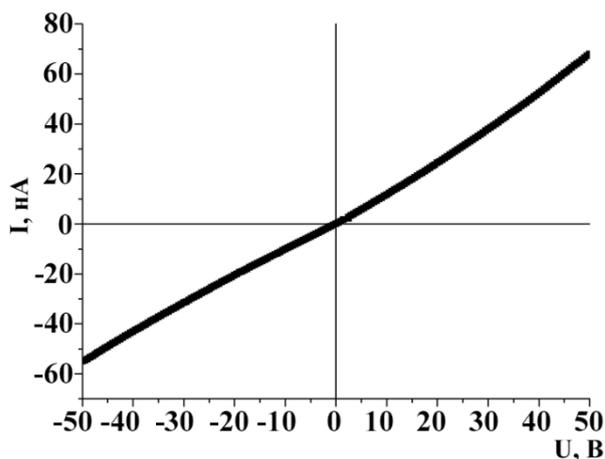


Рис. 15. Типичная Вольт-Амперная характеристика используемых образцов CdTe, с нанесенным золотым контактом.

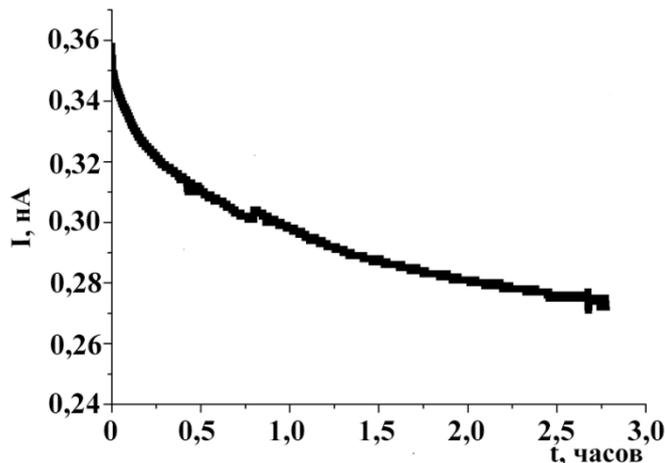


Рис. 16. Типичная зависимость тока (I) от времени (t), снятая после нанесения золотых контактов, при $U=5$ В. Первоначальное падение тока обусловлено релаксацией фототока, возникающей из-за помещения образца в изолированную от светового излучения камеру (предметный столик на рисунках 18 и 19).

Для проверки наблюдаемых эффектов использовались образцы моносulfида самария (SmS), полученные прессованием и высокотемпературным ТВЧ отжигом. Образцы SmS являлись полупроводниковым материалом, имеющим n-тип проводимости. Образцы SmS были изготовлены в виде спрессованных цилиндров, имеющих высоту и радиус $2,5 \times 10$ мм. Для измерения вольт-амперных характеристик моносulfида самария на исследуемые образцы

наносились серебряные контакты. На рисунке 17 представлены общие виды исследуемых образцов, прошедших различные стадии пробоподготовки.

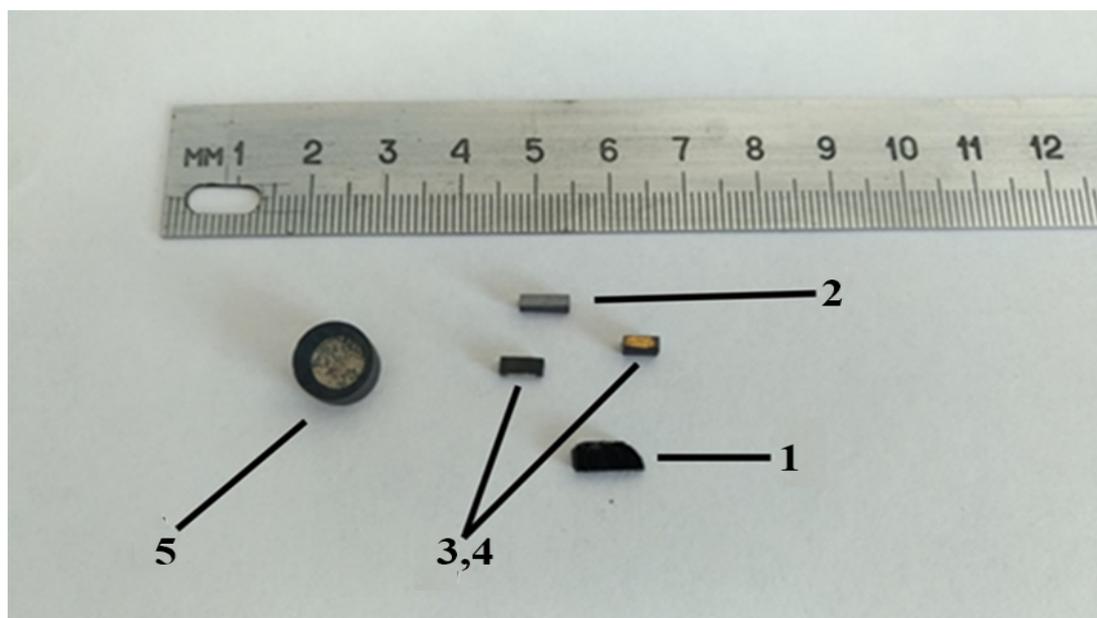


Рис. 17. Общий вид исследуемых образцов: 1-образец CdTe, образованный сколом по плоскости спайности (110); 2-образец CdTe, после шлифовки; 3-образец CdTe, с нанесенными золотыми контактами; 4-образец SmS, с нанесенными серебряными контактами; 5-образец SmS, с нанесенным серебряным контактом.

Для выполнения задачи по анализу примесного состава исследуемых монокристаллов CdTe(Cl) и CdTe(Cl,Fe) использовался масс-спектрометр iCAP-Q (Рис. 18.). Данный прибор является высокочувствительным масс-спектрометром с индуктивно-связанной плазмой и квадрупольным масс-анализатором. Конструкция масс-спектрометра позволяет анализировать примесный состав даже сверхчистых образцов. Отличительной особенностью данного прибора является наличие реакционно-столкновительной ячейки, позволяющей работать с традиционно трудноопределимыми элементами для масс-спектрометров такого типа. Данный масс-спектрометр позволяет проводить анализ образцов с различным типом и содержанием примесей с точностью не хуже 0,0001%.



Рис. 18. Масс-спектрометр iCAP-Q с индуктивно-связанной плазмой

В результате исследований методами масс-спектрометрии были получены данные примесного состава исследуемых образцов CdTe(Cl) и CdTe(Cl,Fe) (табл. 5).

Таблица 5. Примесный состав исследуемых образцов CdTe.

Избыток	CdTe(Cl), n-тип проводимости	CdTe(Cl), p-тип проводимости	CdTe(Cl,Fe), p-тип проводимости
Cd, масс. %	0,0054	-	-
Te, масс. %	-	0,0054	0,0021
Cl, масс. %	0,02-0,03	0,02-0,03	0,015
Fe, масс. %	-	-	0,0016

2.3. Установки для измерения электрических характеристик кристаллов CdTe, до и после воздействия слабых магнитных полей

Задача, поставленная в данной работе, по изучению изменения электрических характеристик монокристаллов CdTe (Cl), после воздействия слабых ИМП и ПМП, а также монокристаллов CdTe (Cl,Fe), после воздействия слабых ИМП, потребовала создания предметного столика, позволяющего изолировать исследуемый образец от внешних световых излучений для измерения темновой проводимости (далее проводимости) кристаллов. Измерение относительного изменения темновой проводимости производилось с помощью стандартного двух-контактного метода. Методическая сложность поставленного эксперимента заключается, прежде всего, в необходимости измерять электрические характеристики в широком диапазоне времен (от нескольких до сотен часов) с малым шагом измерения. На начальном этапе эксперимента использовалась экспериментальная установка, состоящая из универсального источника питания УИП – 2, программируемого вольтметра В7-46/1, а также предметного столика, описанного выше. Данная экспериментальная система (рис. 19.) позволяла снимать вольтамперные характеристики исследуемого образца в реальном времени. Шаг эксперимента составлял $\approx 0,5$ часов. Для измерения электрических характеристик было необходимо постоянное личное присутствие, что делало невозможным непрерывное снятие электрических характеристик в течение длительных времен (до 200 часов), в результате чего измерения проводились стадийно.



Рис. 19. Схема экспериментальной установки по снятию электрических характеристик, состоящая из универсального источника питания УИП – 2, программируемого вольтметра В7-46/1, а также предметного столика.

Для получения непрерывных данных об изменении электрических характеристик, в течение длительных времен, экспериментальная установка была модернизирована. Модернизированная экспериментальная установка состояла из пикоамперметра Keithley 6487, предметного столика, модуля bluetooth и управляющего компьютера (рис. 20.). Модернизированная установка позволяла производить измерение электрических характеристик в режиме реального времени в течение длительного времени, с шагом измерения от 5 до 1,5с, что позволило получать непрерывную зависимость изменения проводимости ($\Delta\sigma$) от времени (t), после воздействия слабых магнитных полей. Таким образом, был получен большой массив экспериментальных точек (до нескольких миллионов), что позволило детально рассмотреть зависимости изменения электрических характеристик после воздействия слабых магнитных полей.

В течение всего времени эксперимента исследуемые и контрольный образцы находились в светоизолированной камере. Исследуемый образец вынимался из светоизолированной камеры для осуществления воздействия на него магнитного поля, однако воздействие ИМП осуществлялось в темной комнате, в

отсутствии источников освещения. Температура окружающей среды в процессе воздействия на образец магнитного поля и измерения свойств образца не изменялась и составляла ~20-22°C.

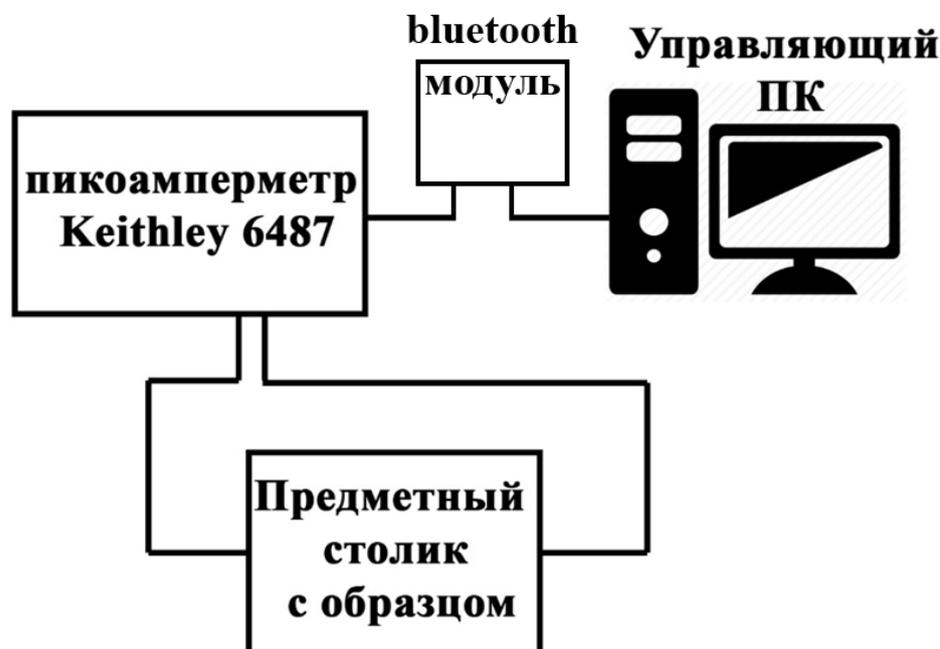


Рис. 20. Схема модернизированной экспериментальной установки по снятию электрических характеристик, состоящая из пикоамперметра Keithley 6487, предметного столика, модуля bluetooth и управляющего компьютера.

Расчёт изменения показателей структурно-чувствительных свойств (таких как изменение удельной темновой проводимости- $\Delta\sigma$; изменение твердости- ΔH ; изменение среднеквадратической шероховатости- ΔSq) кристаллов от времени (t), прошедшего после воздействия слабых магнитных полей, проводился по формуле (14):

$$\Delta X = \frac{X_i - X_0}{X_0} \times 100 \quad (14)$$

где, ΔX – относительное изменение измеряемой величины, в процентах ($\Delta\sigma$, ΔH , ΔSq); X_i – значение измеряемой величины в конкретной точке временной точки - i; X_0 – исходное значение измеряемой величины в 0 точке (до воздействия слабых магнитных полей).

2.4. Установки для измерения твердости монокристаллов CdTe, до и после воздействия слабых магнитных полей

Для выполнения задачи по изучению воздействия слабых ИМП на механические характеристики, в частности твердость, полупроводниковых кристаллов CdTe(Cl) и CdTe(Cl,Fe) использовались сканирующий зондовый микроскоп нанотвердомер «НаноСкан-3D» и металлографический фотомикроскоп НЕОРНОТ-21.

Нанотвердомер «НаноСкан-3D» (Рис. 21.) предназначен для комплексного исследования физико-механических свойств в диапазоне нагрузок до 100 мН. Нанотвердомер оснащен оптическим микроскопом и моторизованным предметным столиком для позиционирования объекта исследования.

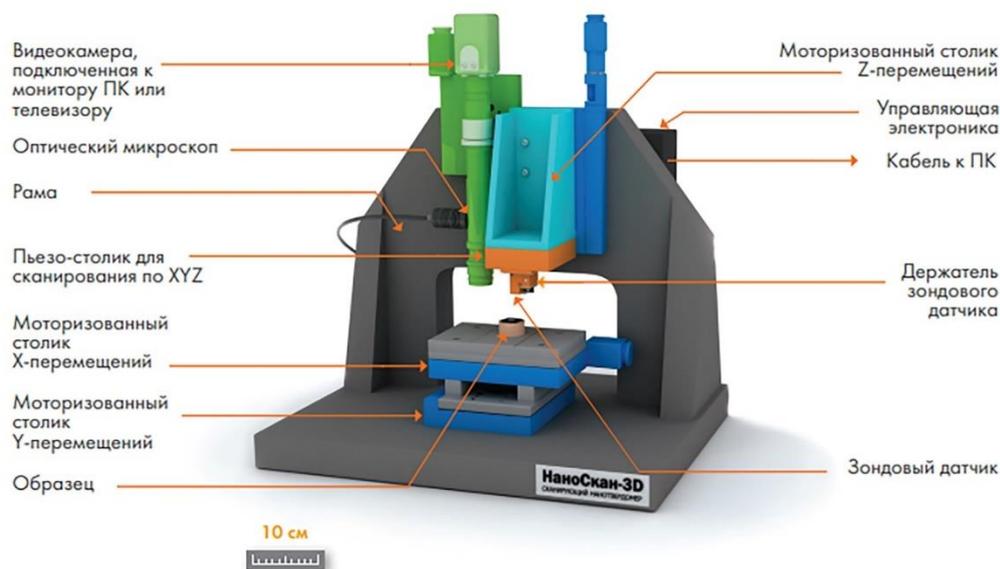


Рис. 21. Устройство сканирующего нанотвердомера «НаноСкан-3D».

Высокая степень автоматизации измерений позволяет существенно повысить производительность исследований в течение продолжительных экспериментов. Измерения твердости проводились методом динамического наноинден-тирования [167]. Результат каждой точки зависимостей изменения показателей

твердости (ΔH) от времени (t), полученных с использованием сканирующего нанотвердомера «НаноСкан-3D», является усреднением по 70 индентам, полученным с области 50x50 мкм, с нагрузкой от 5 до 30 мН. Для каждого индента вычислялось значение твердости и рассчитывалось среднее значения для всей серии. Следует отметить, что зависимости величины твердости от глубины внедрения индентора в кристалл не обнаружено во всем диапазоне приложенных нагрузок (рис. 22.). Глубина вдавливания зонда составляла до 2 мкм. Ошибка измерения твердости с помощью нанотвердомера «НаноСкан-3D» в среднем составляла $\approx 3-5\%$. На рисунке 23 представлен общий вид кривой нагружения и схема контакта индентора с поверхностью. На рисунке 24 представлены кривые нагружения и разгрузки в зависимости от глубины и приложенных нагрузок для исследуемых образцов CdTe(Cl) и CdTe(Cl,Fe).

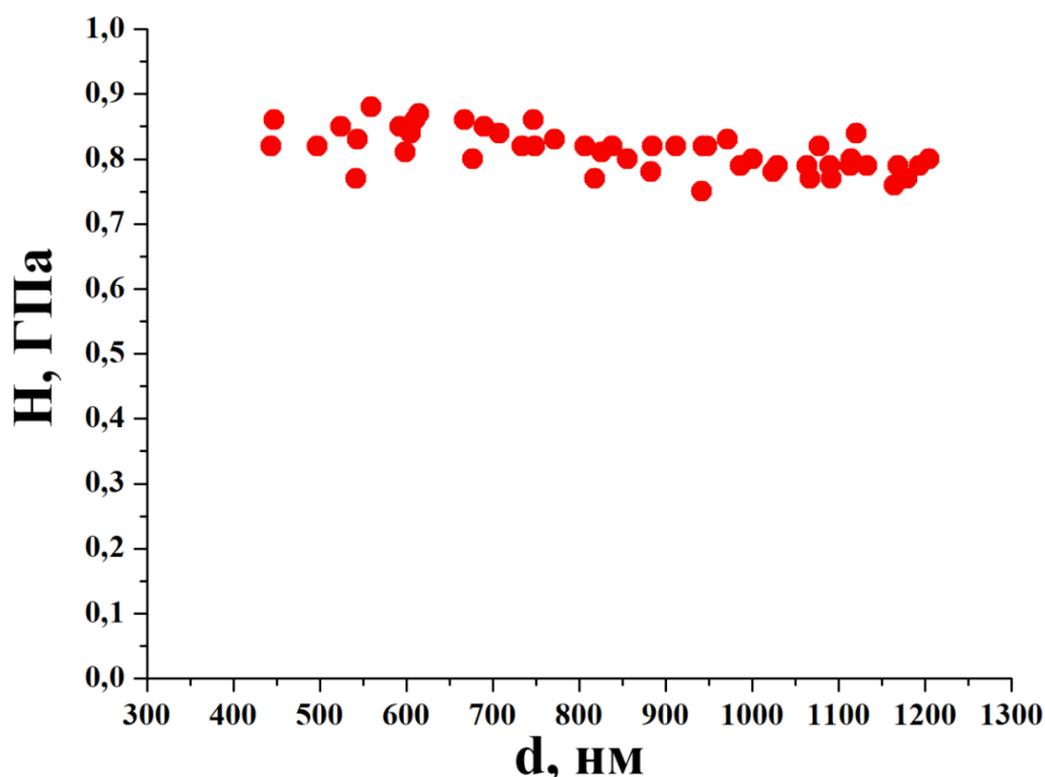


Рис. 22. Массив результатов измерения твердости (H) от глубины вдавливания (d) индентора в исследуемый образец, полученный на нанотвердомере НаноСкан-3D, при нагрузках от 5 до 30 мН. Массив такого вида дает одну точку на зависимостях относительного изменения твердости (ΔH) от времени (t).

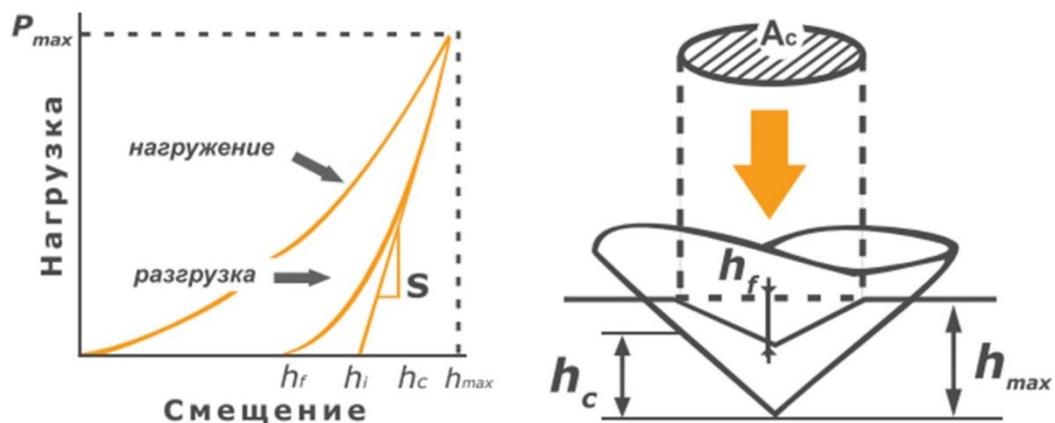


Рис. 23. Общий вид кривой нагружения и схема контакта индентора с поверхностью с обозначениями величин, используемых в методике расчета модуля упругости и твердости.

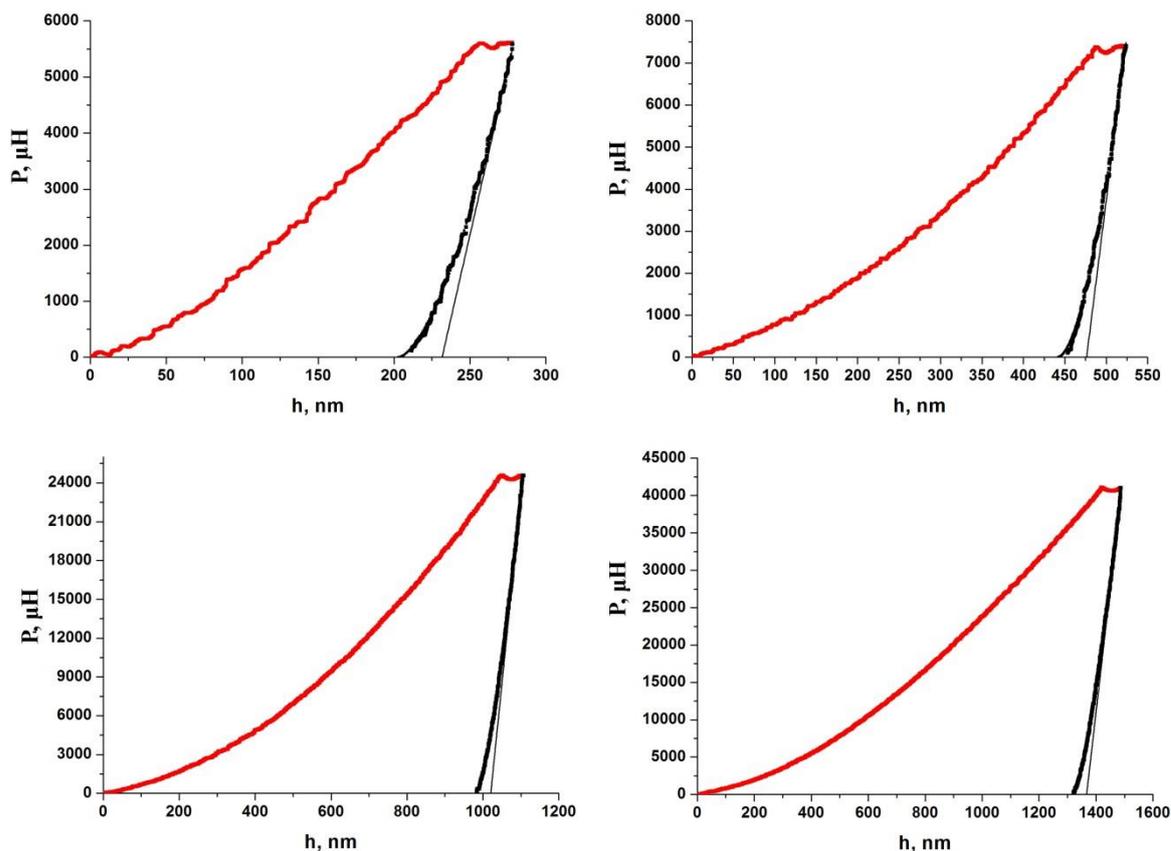


Рис. 24. Кривые нагружения и разгрузки в зависимости от глубины и приложенных нагрузок для исследуемых образцов CdTe.

Металлографический фотомикроскоп НЕОРНОТ-21 (Рис. 25.) предназначен для исследования структуры и поверхностного рельефа материалов. Позволяет проводить металлографический анализ качества материалов, количественную оценку структурных элементов. А также проводить исследования структуры по методу светлого и темного поля в отраженном свете. Измерения на металлографическом микроскопе НЕОРНОТ-21 производились с использованием индентора Викакса. Отпечаток имел форму квадрата с диагональю в 24 - 25 мм. Нагрузка составляла ≈ 16 г, глубина вдавливания 4 мкм, площадь 600 мкм в квадрате.



Рис. 25. Металлографический фотомикроскоп НЕОРНОТ-21.

2.5. Установки для измерения шероховатости поверхности монокристаллов CdTe(Cl), до и после воздействия слабых ИМП

Для выполнения задачи по изучению воздействия слабых ИМП на состояние поверхности, а именно шероховатость полупроводниковых кристаллов CdTe(Cl), использовались сканирующий зондовый микроскоп Solver PRO M (NT-MDT) и атомно-силовой микроскоп NTEGRA PRIMA (NT-MDT).

Принцип работы сканирующего зондового микроскопа NTEGRA PRIMA (Рис. 26.) высокого разрешения, основан на взаимодействии зонда-кантилевера с поверхностью исследуемого образца. Кантилевер может изгибаться не только под действием непосредственно контактных сил, но также и под действием сил, действующих на расстоянии – относительно короткодействующих Ван-дер-Ваальсовых и более дальнедействующих электрических и магнитных сил. Данный микроскоп позволяет получать изображения поверхности микро- и нано-объектов с пространственным разрешением вплоть до атомарного. Возможно получение 3D-модели поверхности, определение ее шероховатости. Позволяет получать микрофотографии высокого разрешения.



Рис. 26. Многофункциональный прибор для решения наиболее типовых задач в области Сканирующей Зондовой Микроскопии NTEGRA PRIMA (NT-MDT).

Сканирующий зондовый микроскоп Solver PRO M (Рис. 27.) позволяет работать в режиме атомно-силового микроскопа с использованием различных методик зондовой микроскопии. Атомно-силовая микроскопия реализует принцип измерений силы, действующей на острие микрозонда со стороны исследуемой поверхности, как проводящих, так и диэлектрических сред. Поддерживая с помощью обратной связи постоянной силу взаимодействия между микрозондом и поверхностью образца, регистрируют положение острия микрозонда, что позволяет получить трехмерное изображение топографии поверхности. В качестве зонда в атомно-силовой микроскопии используется чувствительный элемент - кантилевер, который представляет собой кремниевый монокристалл, на котором сформирована балочная структура с острием в виде микроиглы.

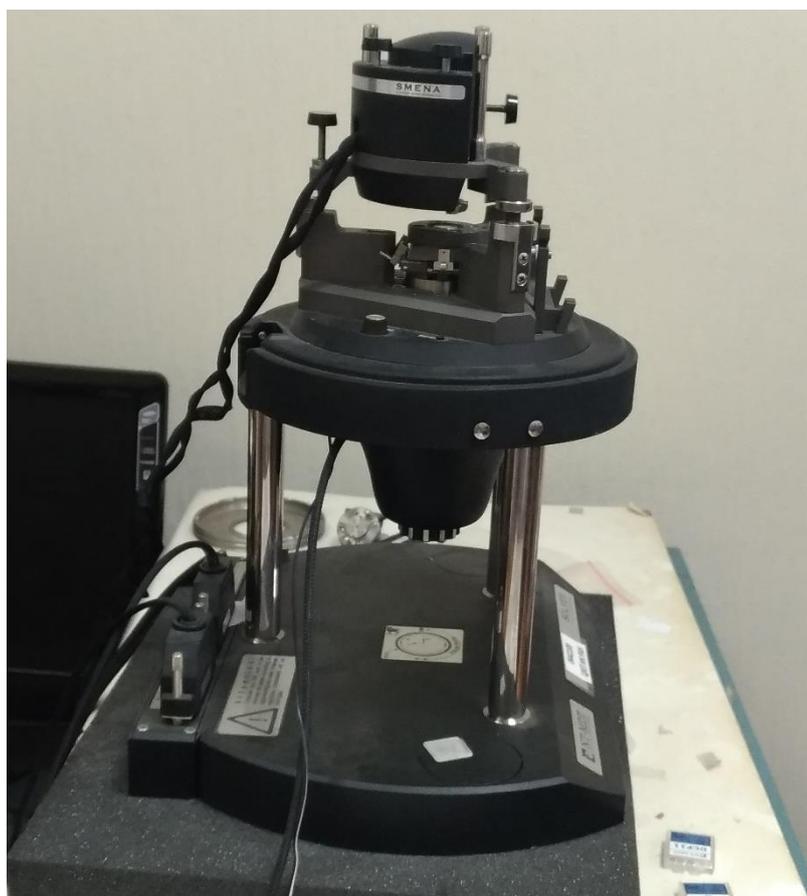


Рис. 27. Сканирующий зондовый микроскоп Solver PRO M (NT-MDT).

Образцы кристаллов CdTe(Cl), подготовленные по методике, описанной в главе 2.2, исследовались на описанных выше микроскопах для получения серии снимков поверхности, позволяющих проводить анализ показателей шероховатости поверхности кристаллов CdTe(Cl). На рисунке 28 представлены примеры АСМ – изображений, полученные на приборах Solver PRO M и NTEGRA PRIMA. В таблице 6 представлены сравнения значений средней арифметической (S_a) и среднеквадратичной (S_q) шероховатости поверхности кристаллов CdTe(Cl), полученные на приборах Solver PRO M и NTEGRA PRIMA. Значения среднеквадратичной шероховатости поверхности исследуемых образцов были получены со сканов размерами 3x3 или 3,5x3,5 мкм. Образцы, имеющие схожие показатели среднеквадратичной шероховатости (S_q) на ступенях, по всей поверхности кристалла, подвергали воздействию слабыми ИМП стандартной конфигурации.

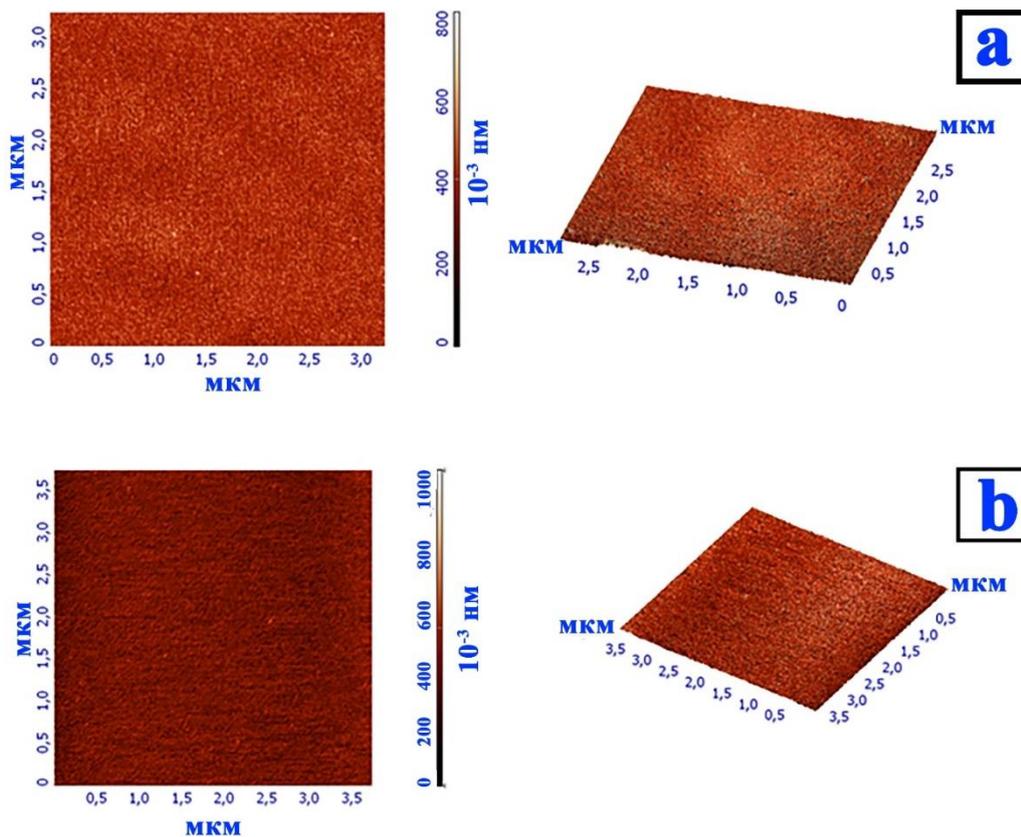


Рис. 28. Примеры АСМ-изображений поверхности кристаллов CdTe, полученные на приборе: а – Solver PRO M; б - NTEGRA PRIMA.

Таблица 6. Сравнение значений шероховатости поверхности кристалла CdTe, полученных на приборах Solver PRO M и NTEGRA PRIMA.

Название прибора	Номер скана	Sa, нм	Sq, нм
Solver PRO M	1	0,468	0,618
	2	0,615	0,812
	3	0,787	1,142
NTEGRA PRIMA	4	0,573	0,801
	5	0,591	0,800
	6	0,866	1,177

2.6. Выводы в главе 2

В этой главе описаны методы подготовки и их особенности, для кристаллов CdTe, легированных различными компенсационными примесями. Описаны основные методы исследования структурно-чувствительных свойств кристаллов CdTe(Cl) и CdTe(Cl,Fe). Приведены результаты примесного анализа исследуемых кристаллов. Описаны установки по воздействию слабыми ИМП и ПМП на исследуемые кристаллы. Описаны экспериментальные установки по снятию электрических характеристик, а также описана модернизированная установка по непрерывному снятию электрических характеристик в течении длительных времен с малым шагом измерения (1,5 секунды). Показаны общие виды исследуемых образцов, прошедших различные этапы пробоподготовки, а также типичные зависимости электрических характеристик, снятые на описанном экспериментальном оборудовании. Приведены кривые нагружения и разгрузки, полученные на нанотвердомере «НаноСкан-3D», в зависимости от глубины и приложенных нагрузок для исследуемых образцов CdTe(Cl) и CdTe(Cl,Fe), а также примеры АСМ-изображений поверхности кристаллов CdTe, полученных на приборах Solver PRO M и NTEGRA PRIMA. Также приведена таблица сравнения значений шероховатости поверхности кристаллов CdTe(Cl), полученных на приборах Solver PRO M и NTEGRA PRIMA.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА СТРУКТУРНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ CdTe(Cl)

Учитывая области применения CdTe, важнейшими его характеристиками являются электрофизические свойства, такие как электрическое удельное сопротивление, время жизни заряда и т.п., а также состояние его поверхности, так как теллурид кадмия является наиболее перспективным материалом для разработки рентгеновских и гамма детекторов, работающих при комнатной температуре. Из обзора работ, посвященных воздействиям слабых магнитных полей на структуру и свойства диамагнитных материалов видно, что воздействия слабыми магнитными полями способно приводить к изменению широкого спектра структурных-зависимых свойств диамагнитных материалов. Более того, существующие работы говорят о присутствии как обратимых, так и необратимых эффектов воздействия магнитных полей на диамагнитные материалы (Рис. 2.). Учитывая это, представляют интерес исследования воздействия слабых магнитных полей на основные структурно-зависимые свойства кристаллов CdTe, легированных различными компенсационными примесями (в частности Cl и Fe). Для решения данных задач были подготовлены кристаллы CdTe, легированные Cl, n- и p-типов проводимости, с избытком Cd и Te в 0,0054 масс.%, соответственно, а также кристаллы CdTe(Cl,Fe), p – типа проводимости, с содержанием Cl и Fe в 0,015 и 0,0016 масс.%, соответственно. Подробнее о примесном составе используемых кристаллов в главе 2.2. Стоит также отметить, что концентрации иных элементов в используемых кристаллах в среднем составляла меньше 0,00002 масс.% (меньше предела обнаружения метода масс-спектрометрии). Данные кристаллы обладали известными значениями удельного электросопротивления и удельной проводимости, а также, в течение длительных времен, показывали стабильные показатели этих характеристик.

3.1. Результаты воздействия слабого ИМП на удельную темновую проводимость (σ) кристаллов CdTe(Cl)

Одними из определяющих свойств кристаллов CdTe являются его электрические характеристики. Как было показано в главе 1, работы по изучению воздействий слабых магнитных полей на электрические свойства диамагнитных кристаллов существуют. Однако магнитостимулированные изменения темновой проводимости диамагнитных кристаллов подробно не изучались, более того, обнаруженные отклики фотоэлектрических и электрических характеристик, на воздействия слабыми ПМП оказались крайне малы [91-97]. Так, при гелиевых температурах, когда условие $\mu_B V \ll kT$ для равновесной системы не выполняется, отклик электрических характеристик на воздействия магнитными полями достигал лишь нескольких процентов. При этом магнитоиндуцированные изменения пластических характеристик, в тех же условиях на аналогичных кристаллах составляли десятки – сотни процентов. Наблюдаемые изменения электрических характеристик объяснялись в рамках спин-зависимой теории рекомбинации электронно-дырочных пар. В этом случае воздействия слабых магнитных полей на дефектную структуру диамагнитных материалов приводит к значительным изменениям в примесной дефектной структуре исследуемых объектов. Однако в случае полупроводников изменение дефектной структуры может приводить к изменению целого спектра структурно-зависимых свойств.

Как известно, для получения полупроводников различного типа проводимости и улучшения их электрических характеристик используется целый спектр легирующих материалов, приводящих к выделению примесной проводимости, как основного типа проводимости. В связи с этим можно предположить, что воздействие слабыми магнитными полями на легированные проводники, влияющее на их дефектную примесную структуру, должно приводить и к заметному изменению их электрических свойств.

Для проверки данного предположения были подготовлены кристаллы CdTe(Cl), n- и p-типов проводимости, подготовленные по методике, описанной в главе 2.2. Значения удельной проводимости (σ) подготовленных образцов соответствовали известным значениям для образцов данных типов: $\sigma=28,5 \cdot 10^{-9} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ для кристаллов CdTe(Cl) n-типа проводимости и $\sigma=2,25 \cdot 10^{-9} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ для кристаллов CdTe(Cl) p-типа проводимости. Положение образцов в соленоиде, в процессе воздействия на них слабого ИМП, было статичным, а ориентация вектора В магнитного поля была перпендикулярна плоскости (110).

После магнитного воздействия, образцы помещались в экспериментальную установку для снятия электрических характеристик. На рис. 29. представлены зависимости изменения удельной проводимости ($\Delta\sigma$) кристаллов CdTe(Cl) от времени (t), после воздействия на них слабого ИМП. Погрешность измерения электрических характеристик составляла 4% [А, В].

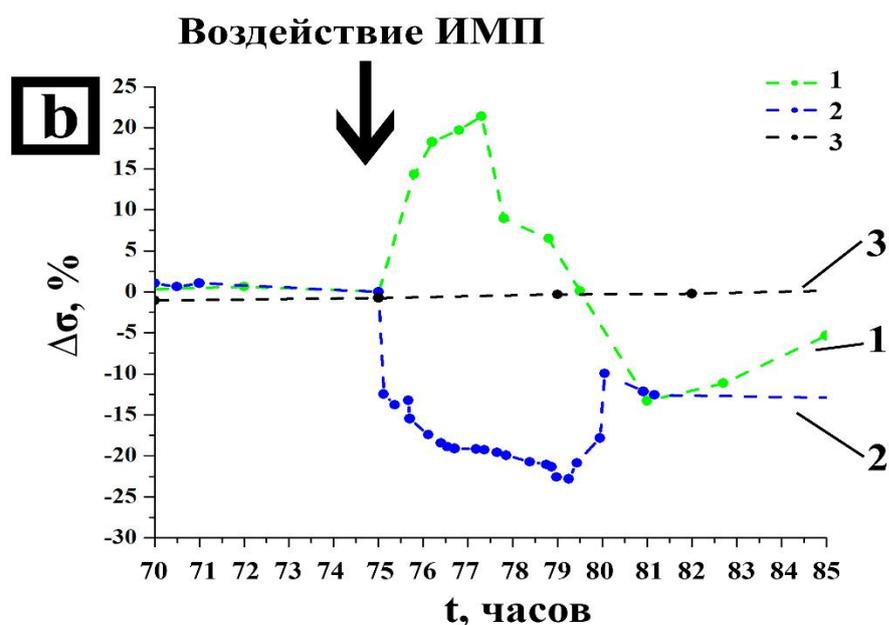
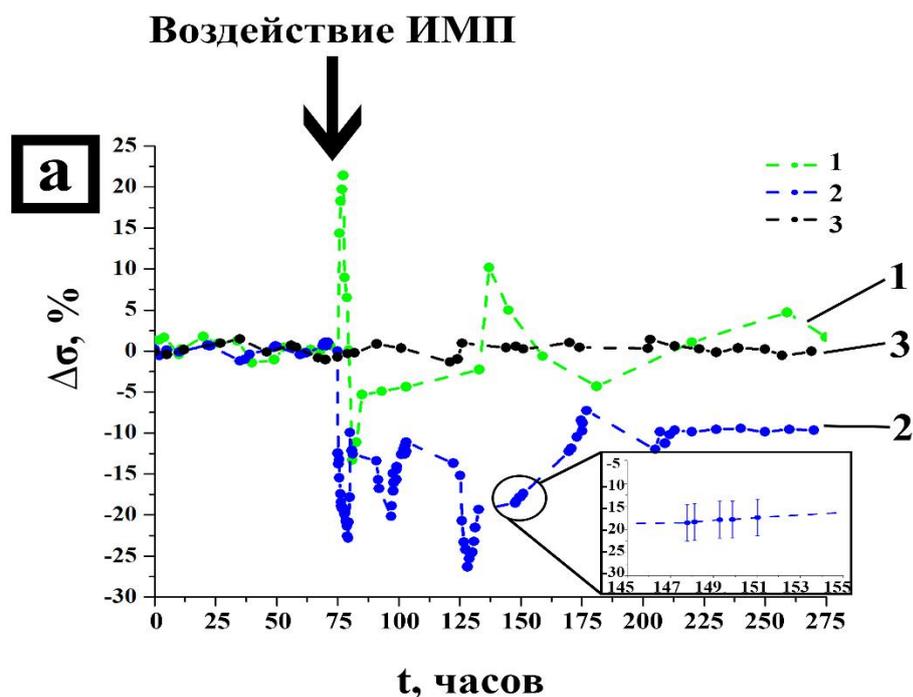


Рис. 29. Зависимости изменения удельной проводимости ($\Delta\sigma$) кристаллов CdTe(Cl) (n- и p-типов проводимости) от времени (t). Шаг измерения ≈ 1 ч. Кривая 1 - $\Delta\sigma(t)$ CdTe(Cl), n-типа, подвергнувшегося воздействию слабого ИМП; Кривая 2 - $\Delta\sigma(t)$ CdTe(Cl), p-типа, подвергнувшегося воздействию слабого ИМП; Кривая 3 - $\Delta\sigma(t)$ контрольного образца CdTe(Cl). Вектор \mathbf{B} перпендикулярен плоскости (110). Временные интервалы: **а**-0–275 часов; **б**-70–85 часов. На врезке рисунка: а - увеличенная область 145-155 часов с указанными ошибками измерений. Воздействие ИМП осуществлялось на временной отметке в 75 часов.

На представленной (рис. 29.) зависимости отчетливо заметны первичные пики изменения удельной проводимости кристаллов CdTe(Cl), происходящие в первые 5 часов, после воздействия слабого ИМП. Динамика изменений удельной проводимости кристаллов CdTe(Cl), имеющих n- и p-тип проводимости, заметно различается. Кристаллы CdTe(Cl), n-типа проводимости, показывают 2 интервала немонотонного увеличения проводимости, с последующей релаксацией до исходных (контрольных) значений. Кристаллы p-типа проводимости показывают иной отклик на воздействие слабого ИМП: наблюдается общее падение проводимости на 10-25% ниже контрольных значений. Кристаллы p-типа показывают три интервала немонотонных изменений проводимости, в данном случае – падения проводимости. Кроме того, кристаллы CdTe(Cl), p-типа проводимости, не показывают релаксации показателей σ до исходных (контрольных) значений, стабилизируясь на значениях $\sigma \approx 2 \cdot 10^{-9} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, что на $\approx 10\%$ ниже исходных показателей σ .

Представленные зависимости $\Delta\sigma(t)$ кристаллов CdTe(Cl), n- и p- типов проводимости, имеют обратную динамику изменения проводимости, после воздействия слабого ИМП. Первичные пики изменения проводимости наблюдаются в схожие времена (рис. 29. b.). Второй пик изменения проводимости кристаллов CdTe(Cl), p-типа, не имеет сопоставимого пика на зависимости $\Delta\sigma(t)$ кристаллов CdTe(Cl), n-типа. Третий пик падения проводимости кристаллов CdTe(Cl), p-типа, и второй пик увеличения проводимости кристаллов CdTe(Cl), n-типа, происходят в схожие времена: 50-60 часов и 50-80 часов, после воздействия ИМП, соответственно.

Кристаллы CdTe(Cl) p-типа не только не показывают релаксации показателей проводимости до исходных значений, но и остаются нечувствительными к повторному воздействию слабого ИМП (рис. 30.) в то время как кристаллы CdTe(Cl) n-типа показывают незначительный отклик на повторное воздействие слабым ИМП (рис. 31.). Последующие воздействие слабыми ИМП на кристаллы CdTe(Cl) n-типа также не показывало какого-либо отклика.

Первое воздействие ИМП

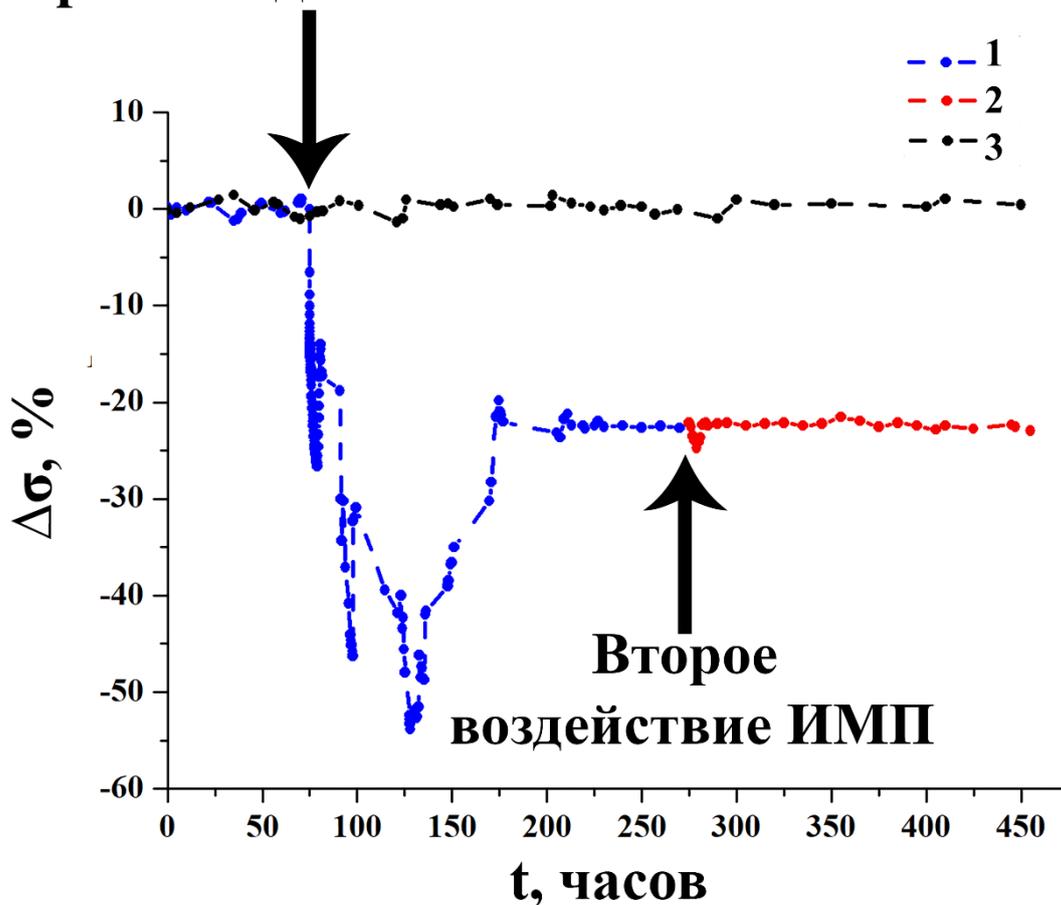


Рис. 30. Зависимости изменения удельной проводимости ($\Delta\sigma$) кристаллов CdTe(Cl) (p-типа проводимости) от времени (t). Шаг измерения ≈ 10 ч. Кривая 1 - $\Delta\sigma(t)$ CdTe(Cl), p-типа, после первого воздействия слабого ИМП; Кривая 2 - $\Delta\sigma(t)$ CdTe(Cl), p-типа, после повторного воздействия слабого ИМП; Кривая 3 - $\sigma(t)$ контрольного образца CdTe(Cl). Вектор В перпендикулярен плоскости $(\bar{1}11)$. Первое воздействие ИМП осуществлялось на временной отметке в 75 часов, Второе (повторное) воздействие ИМП осуществлялось на временной отметке в 275 часов.

Первое воздействие ИМП

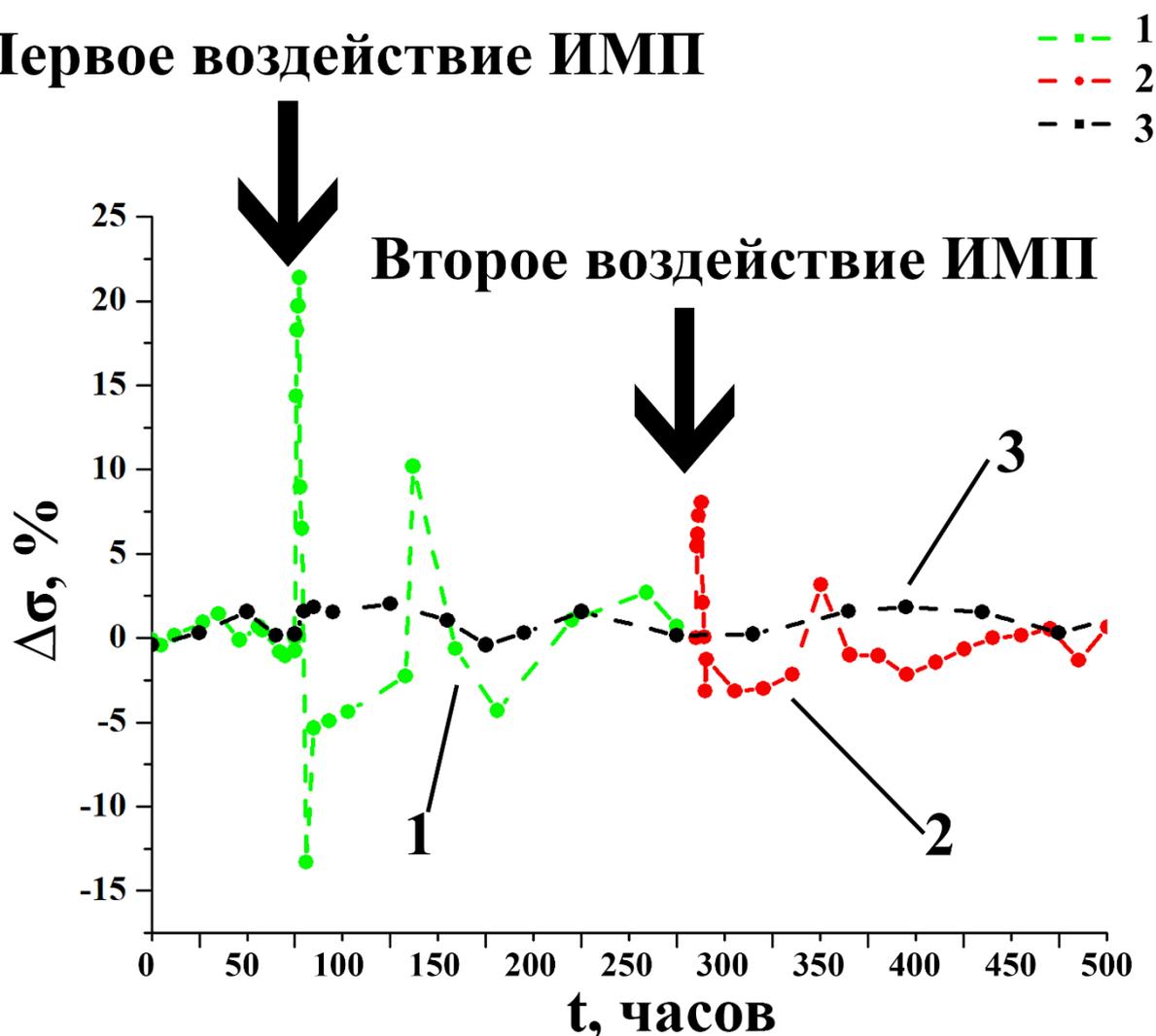


Рис. 31. Зависимости изменения удельной проводимости ($\Delta\sigma$) кристаллов CdTe(Cl) (n-типа проводимости) от времени (t). Шаг измерения ≈ 10 ч. Кривая 1 - $\Delta\sigma(t)$ CdTe(Cl), n-типа, после первого воздействия слабого ИМП; Кривая 2 - $\Delta\sigma(t)$ CdTe(Cl), n-типа, после повторного воздействия слабого ИМП; Кривая 3 - $\sigma(t)$ контрольного образца CdTe(Cl). Вектор В перпендикулярен плоскости (110). Первое воздействие ИМП осуществлялось на временной отметке в 75 часов, Второе (повторное) воздействие ИМП осуществлялось на временной отметке в 275 часов.

Для проверки наблюдаемых индуцированных воздействием слабого ИМП изменений проводимости были проведены исследования результатов воздействия слабого ИМП на керамические образцы моносulfида самария (SmS). Для измерения электрических характеристик на образцы SmS были нанесены

серебряные проводящие контакты, после чего была произведена стандартная проверка качества данных контактов и определены степени их омичности. Были отобраны 3 образца SmS, имеющие идентичные стабильные значения проводимости, два из которых подверглись воздействию слабого ИМП стандартной конфигурации ($B_{\max}=1,04$ Тл; $\nu=12$ Гц; время экспозиции образца в магнитном поле $t_{\text{эксп}}=10$ мин), а один был использован в качестве контрольного образца. Шаг измерения проводимости составлял $\approx 1,5$ с. Ошибка измерения $\pm 1\%$.

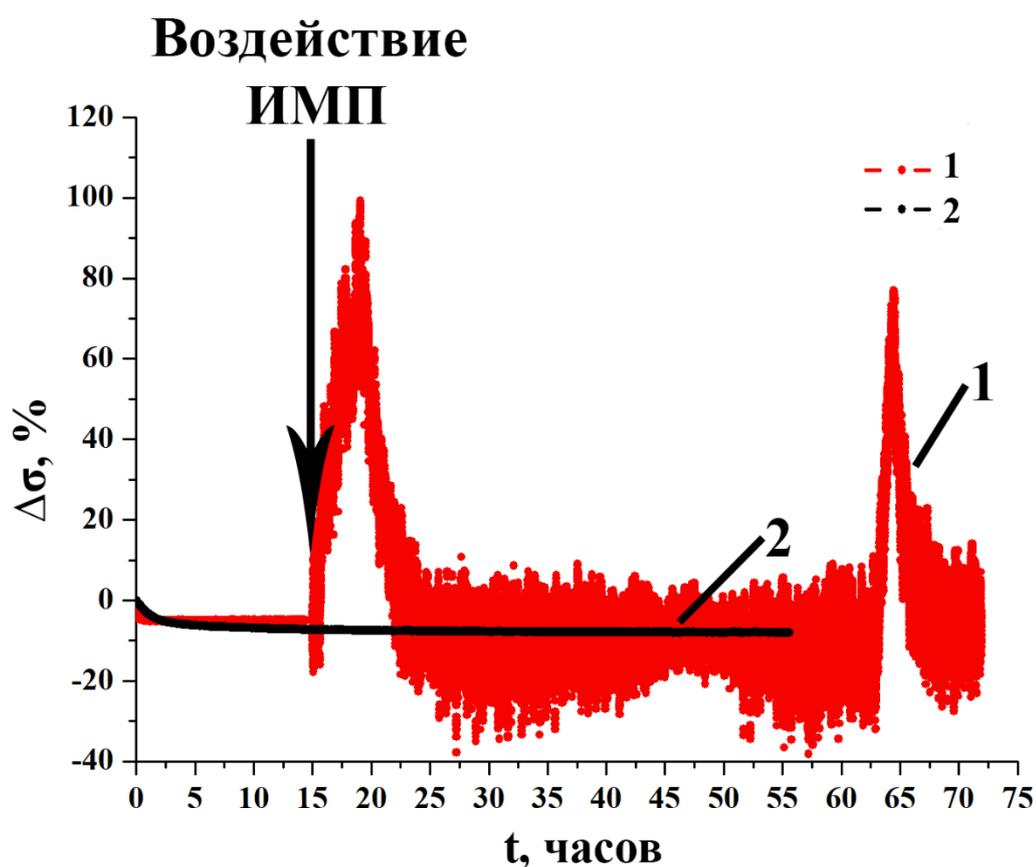


Рис. 32. Зависимости изменения удельной проводимости ($\Delta\sigma$) образцов SmS (n-типа проводимости) от времени (t). Шаг измерения $\approx 1,5$ с. Кривая 1 - $\Delta\sigma(t)$ SmS, n-типа, подвергшегося воздействию слабого ИМП; Кривая 2 - $\Delta\sigma(t)$ контрольного образца SmS. Воздействие ИМП осуществлялось на временной отметке в 15 часов.

Было обнаружено, что воздействие слабого ИМП способно приводить к значительным долговременным изменениям темновой проводимости (σ) образцов SmS (Рис. 32.) Причем зависимость $\Delta\sigma(t)$ керамических образцов SmS имеет общую динамику с зависимостями $\Delta\sigma(t)$ образцов CdTe(Cl), n-типа проводимости (рис. 29. Кривая 1), также показывая немонотонное увеличение проводимости. Так, у образцов SmS наблюдается первичный пик изменения проводимости, наблюдаемый в интервале 0-7 часов, после воздействия слабым ИМП. А также, второе интервал немонотонного увеличения проводимости, происходящий через 30 часов, после воздействия слабого ИМП. Большая величина относительного изменения удельной темновой проводимости, а также смещение временных интервалов немонотонного увеличения проводимости связано, по-видимому, с керамической природой исследуемых образцов, характеризующихся меньшей стабильностью системы, чем монокристаллические образцы. Стоит также отметить значительную нестабильность показателей проводимости образцов SmS вне областей пиковых увеличений проводимости, что также может быть связано с керамической природой данных образцов.

Таким образом, мы можем резюмировать, что, несмотря на керамическую природу, образцы SmS, n-типа проводимости, показывают схожую динамику изменения проводимости с кристаллами CdTe(Cl), n-типа проводимости. Что может говорить о том, что за общую динамику изменения структурно-чувствительных свойств, после воздействия слабыми ИМП, отвечают дефекты, определяющие тип проводимости. Причем принципиальным, по-видимому, является не конкретный легирующий элемент, определяющий тип проводимости, а именно основной тип свободных носителей зарядов.

Подводя промежуточный итог, мы можем сказать:

- Первоначальное предположение, что воздействие слабыми ИМП на легированные компенсационными примесями полупроводниковые кристаллы

CdTe, должно приводить к заметному долговременному изменению их электрических свойств оказалось верным;

- Было обнаружено необратимое изменение электрических характеристик кристаллов CdTe(Cl), p-типа проводимости, после воздействия на них слабых ИМП. Таким образом, получено подтверждение возможности пост-ростовой модификации кристаллов CdTe с помощью слабых ИМП;
- Кристаллы CdTe(Cl), p-типа, после первичного воздействия слабого ИМП становятся нечувствительными к повторным воздействиям ИМП. Кристаллы n-типа чувствительны к повторному воздействию слабым ИМП.
- Кристаллы CdTe(Cl), n-типа проводимости и образцы SmS, имеющие также n-тип проводимости, показали общую динамику изменения проводимости, причем величина изменения электрических свойств значительно отличается. Что может говорить о том, что общую динамику индуцированного воздействием слабого ИМП, изменения свойств определяют процессы перестроения дефектных комплексов, имеющих в своем составе комплексы, определяющие тип проводимости полупроводниковых образцов.

3.2. Результаты воздействия слабого ИМП на твердость кристаллов CdTe(Cl)

В главе 1 неоднократно говорилось о результатах воздействий слабого магнитного поля на механические характеристики диамагнитных материалов. Суть описываемых эффектов предположительно состоит в том, что магнитное поле стимулирует диффузионные процессы [1,5,115], происходящие в дефектной структуре различных диамагнитных кристаллов, таких как щелочно-галоидные кристаллы, полупроводники и некоторые металлы. Данные эффекты проявляются в увеличении подвижности дислокаций [37], кинетике деформационных процессов [25,27], величине предела текучести [28,29], изменении

твердости материалов [30,168], а также в изменении внутреннего трения [25,27,28,30].

Ранее уже говорилось, что механические характеристики считаются более чувствительными к слабым магнитным воздействиям, по сравнению с электрическими характеристиками диамагнитных материалов. Но, так как в предыдущей главе было определено, что воздействие слабого ИМП способно приводить к существенным долговременным изменениям электрических характеристик (в частности, проводимости) полупроводниковых кристаллов CdTe(Cl), то представляют интерес исследования изменений механических характеристик данных кристаллов, после воздействия слабыми ИМП, а также сравнение их интенсивность изменения электрических и механических характеристик.

Образцы кристаллов CdTe(Cl), n- и p-типов проводимости, подготовленные по методике, описанной в главе 2, помещали в сканирующий нанотвердомер «НаноСкан-3D» и Металлографический фотомикроскоп НЕОРНОТ-21 для определения показателей твердости (Н) кристаллов CdTe(Cl). После, полученные значения твердости (Н) исследуемых образцов сопоставляли друг с другом, для отбора, исследуемого и контрольного образцов одного типа проводимости, имеющих схожие значения микротвердости (Н) и, в случае их соответствия, подвергали воздействию слабыми ИМП. Ориентация образцов в слабом ИМП отличалась для образцов, исследуемых на нанотвердомере «НаноСкан-3D» и металлографическом фотомикроскопе НЕОРНОТ-21. В первом случае вектор В был перпендикулярен плоскости (110), во втором плоскости (111). После воздействия слабого ИМП образцы помещались в экспериментальные установки для определения показателей твердости (Н) и построения зависимости относительного изменения показателей твердости (ΔH) от времени (t), после воздействия ИМП. Ошибка измерений составляла $\pm 3-5\%$

Было обнаружено как упрочнение, так и разупрочнение кристаллов CdTe(Cl), после воздействия на них слабых ИМП. Причем различия в динамике

изменений наблюдаются у кристаллов CdTe(Cl), имеющих различный тип проводимости.

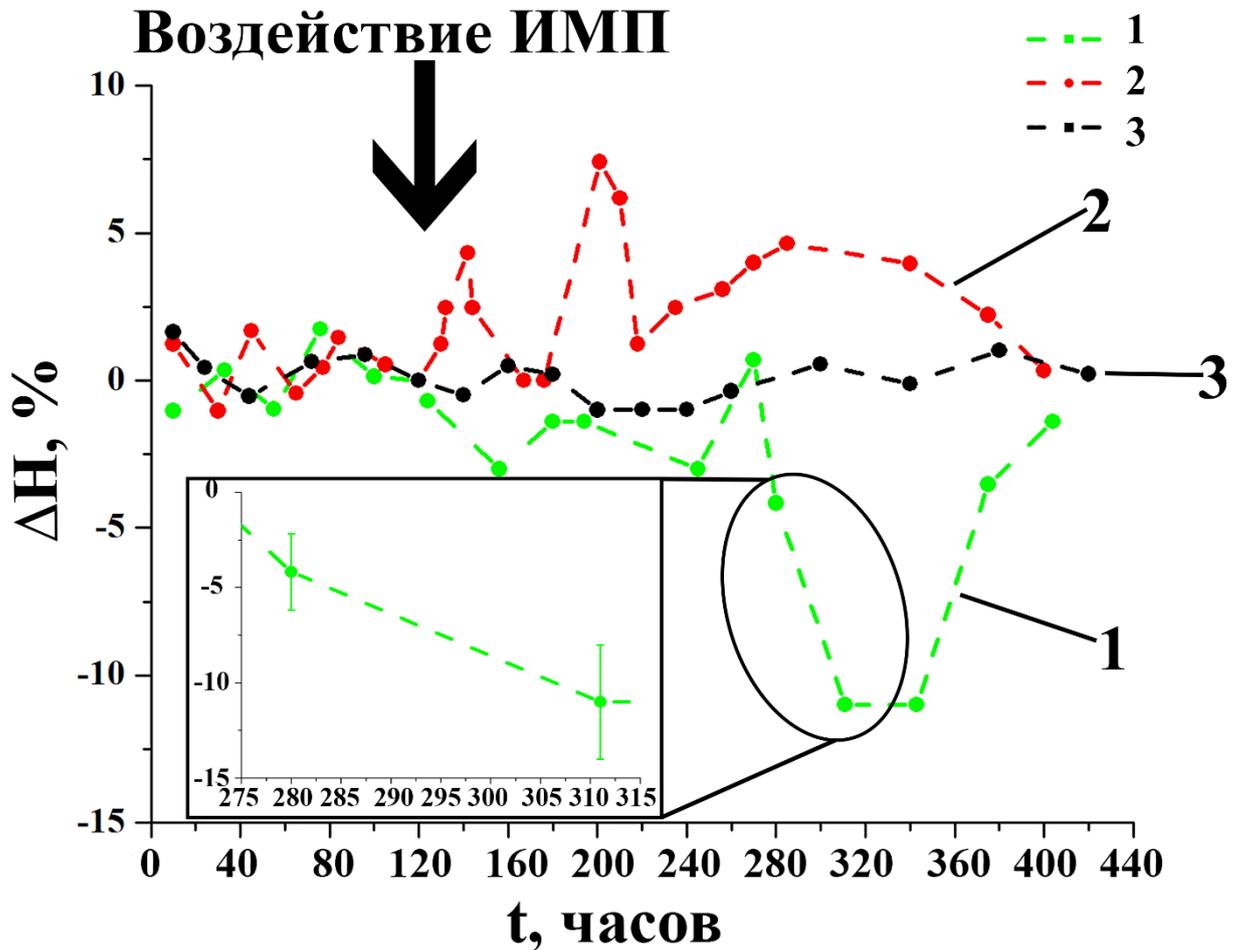


Рис. 33. Зависимости изменения твердости (ΔH) кристаллов CdTe (n- и p- типов проводимости) от времени (t). Шаг измерения ≈ 20 ч. Кривая 1 - $\Delta H(t)$ CdTe(Cl), n-типа, подвергнувшегося воздействию слабого ИМП; Кривая 2 - $\Delta H(t)$ CdTe(Cl), p-типа, подвергнувшегося воздействию слабого ИМП; Кривая 3 - $\Delta H(t)$ контрольных образцов CdTe(Cl). Вектор В перпендикулярен плоскости (110). На врезке увеличенная область 275-315 часов с указанными ошибками измерений. Воздействие ИМП осуществлялось на временной отметке в 120 часов.

Так, кристаллы CdTe, n-типа проводимости, показывают разупрочнение (Рис. 33. Кривая 1), с последующей релаксацией показателей микротвердости до контрольных значений, спустя 300 часов, после воздействия слабого ИМП. На данных кристаллах наблюдается два временных интервала пикового

разупрочнения кристаллов CdTe. Спустя 20 часов, после воздействия ИМП наблюдается первый, незначительный пик уменьшения твердости кристаллов CdTe. Наблюдаемое уменьшение твердости составило $\approx 3,5\%$, что находится в пределах ошибки измерения. Второй пик разупрочнения кристалла более интенсивный - наблюдается пиковое уменьшение показателей твердости на $11,1\%$, по сравнению с контрольными значениями.

Кристаллы CdTe(Cl), p-типа проводимости, исследованные с помощью сканирующего нанотвердомера «НаноСкан-3D», показали упрочнение кристаллов (рис. 33. Кривая 2), с последующей релаксацией до контрольных значений, спустя 300 часов, после воздействия слабого ИМП. Наблюдается три пика увеличения твердости (H). Первичный пик изменения твердости происходит в те же времена, что и для кристаллов CdTe n-типа проводимости. При этом увеличение показателей твердости (H) на $4,3\%$ по сравнению с контрольными значениями также находится в пределах ошибки определения твердости прибором. Второй пик также имеет большую интенсивность, наблюдаемое увеличение твердости составляет $7,4\%$. Стоит отметить, что наблюдаемый второй пик упрочнения кристаллов CdTe, p-типа не имеет сопоставимого по временам пика изменения твердости для кристаллов CdTe n-типа проводимости. Третий пик упрочнения кристаллов p-типа соответствует второму пику разупрочнения кристаллов n-типа, однако величина упрочнения составляет всего $4,5\%$ и находится в пределах ошибки измерения.

Результаты измерения твердости, полученные на металлографическом фотомикроскопе НЕОРНОТ-21 показывают иную динамику зависимости $\Delta H(t)$ для кристаллов CdTe(Cl), p-типа проводимости (рис. 34.). Наблюдается разупрочнение кристаллов CdTe(Cl), p-типа проводимости, что противоречит предыдущим результатам, полученным на нанотвердомере «НаноСкан-3D». При этом стоит отметить, что наблюдаемые пики разупрочнения кристаллов совпадают по своим временам с первыми двумя пиками упрочнения, наблюдаемыми на сканирующем нанотвердомере «НаноСкан-3D». При этом интенсив-

ности разупрочнения значительна: 8% для первого пика разупрочнения и 12% для второго.

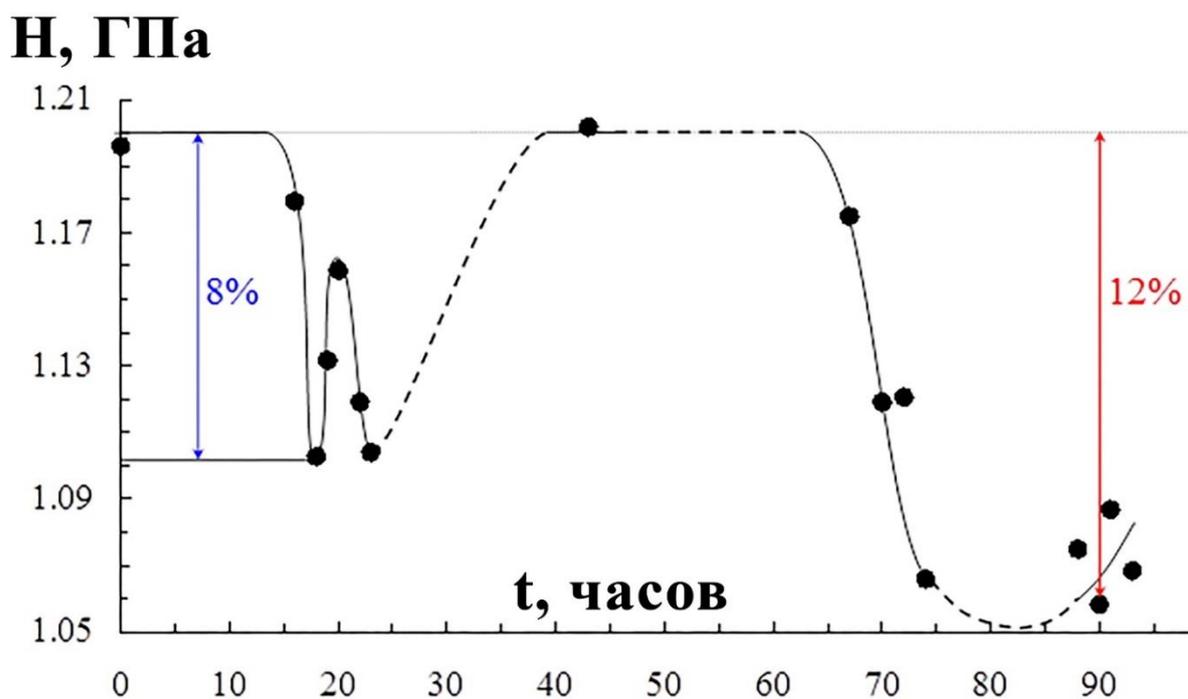


Рис. 34. Зависимость изменения твердости (H) монокристалла $CdTe(Cl)$, p -типа проводимости, от времени (t), подвергнувшегося воздействию слабого ИМП. Вектор \mathbf{V} перпендикулярен плоскости (111). Ошибка измерения $\sim 4\%$.

Полученные противоречия могут объясняться различиями в методике проведения эксперимента, а также различной ориентацией вектора \mathbf{V} относительно кристалла. Второе предположение не соответствует действительности, так как далее, в Главе 3.4. исследуется влияние ориентации кристаллов в слабом ИМП на динамику изменения свойств. В результате чего делается вывод, что смена ориентации не способна приводить к принципиальному изменению динамики изменения свойств кристаллов, а только изменять интенсивность отклика кристалла, после воздействия слабого ИМП. Различия же в методике проведения экспериментов, выполненных с помощью нанотвердомера «НаноСкан-3D» и фотомикроскопа НЕОРНОТ-21 связаны с величинами нагрузок, используемых при индентировании, и как следствие, глубинами погружения индентов (1 мкм и 4 мкм, соответственно).

Учитывая это, возможны две причины наблюдаемых противоречий. Первая напрямую связана с величиной нагрузки индентора при измерении твердости, так как известно [169], что при изменении силы вдавливания индентора в материал растет вклад пластической деформации в формировании отпечатка, что приводит к искажению зависимости величины нагрузки (P) от глубины вдавливания (h). Для кристаллов CdTe(Cl), при измерении твердости на нанотвердомере «НаноСкан-3D» уже при нагрузке в 40 мН наблюдается искажение данной зависимости, в то время как нагрузка при измерении ее фотомикроскопе составляет ~160 мН, с чем и могут быть связаны наблюдаемые противоречия. Вторая возможная причина наблюдаемых противоречий может быть связана с глубиной погружения зонда, без прямой связи с изменением непосредственного взаимодействия зонд-материал. Нам известно, что воздействие слабого ИМП на диамагнитные материалы способно приводить к изменению состояния их поверхности [1], о чем будет более подробно сказано в следующей главе. Что дает нам возможность условно разделить происходящие, после воздействия слабых ИМП, процессы на происходящие в приповерхностных слоях кристаллов и в объеме. В таком случае, наблюдаемое противоречие может объясняться некоторым различием релаксационных процессов, происходящих в разных слоях кристалла. Однако для объяснения данного противоречия необходимы дополнительные эксперименты.

Подводя промежуточный итог, мы можем сказать:

- Воздействие слабого ИМП на диамагнитные кристаллы CdTe(Cl) способно приводить к долговременным изменениям твердости данных кристаллов. Однако, наблюдаемые изменения меньше, чем изменения электрических характеристик
- Измерение твердости кристаллов CdTe(Cl), после воздействия на них слабым ИМП, с помощью нанотвердомера «НаноСкан-3D» показало, что зависимости $\Delta H(t)$ кристаллов n- и p-типов проводимости так же, как и зависимости $\Delta \sigma(t)$ имеют обратную динамику.

- Наблюдается противоречие в результатах изменения твердости кристаллов CdTe(Cl), p-типа, полученных на различном экспериментальном оборудовании: нанотвердомере «НаноСкан-3D» и фотомикроскопе НЕОРНОТ-21. Обсуждаются возможные причины данного противоречия. При этом наблюдаемые пики разупрочнения кристаллов совпадают по своим временам с первыми двумя пиками упрочнения, наблюдаемыми на сканирующем нанотвердомере «НаноСкан-3D».

3.3. Результаты воздействия слабого импульсного магнитного поля на состояние поверхности кристаллов CdTe(Cl)

Использование CdTe в качестве подложечного материала для эпитаксиальных слоев HgCdTe, а также его перспективность в качестве материала для разработки рентгеновских и гамма детекторов, работающих при комнатной температуре, определяют интерес к исследованиям результатов воздействий слабых ИМП на состояние поверхности и приповерхностных слоев кристаллов CdTe. Существующие работы говорят об изменениях состояния поверхности и приповерхностных слоев немагнитных материалов под действием слабых ИМП и ПМП [111]. Это, а также описанные в предыдущей главе обнаруженные изменения механических характеристик (твердости, в том числе микротвердости) кристаллов CdTe(Cl), после воздействия слабых ИМП, стимулируют интерес к изучению результатов воздействий слабых ИМП на состояние поверхности кристаллов CdTe, легированных различными компенсационными примесями.

Исследования состояния поверхности проводились с помощью сканирующего зондового микроскопа Solver PRO M (NT-MDT) и атомно-силового микроскопа NTEGRA PRIMA (NT-MDT). В каждом измерении присутствовал контрольный образец, являющийся зеркальным сколом исследуемого образца,

имеющий идентичные показатели среднеквадратической шероховатости. Ошибка измерения шероховатости составляла $\pm 10\%$.

Образцы кристаллов CdTe(Cl), подготовленные по методике, описанной в главе 2, помещали в сканирующий зондовый микроскоп Solver PRO M (NT-MDT) и атомно-силовой микроскоп NTEGRA PRIMA (NT-MDT) для определения показателей среднеквадратичной шероховатости (S_q). У исследуемого и контрольного кристаллов помечалась область поверхности кристалла, имеющая идентичные показания шероховатости и дальнейшие исследования проводились только с данной области. Вектор В, в процессе воздействия слабого ИМП был перпендикулярен плоскости (111) исследуемых кристаллов CdTe(Cl). После воздействия слабого ИМП образцы помещали в сканирующий зондовый микроскоп Solver PRO M (NT-MDT) и атомно-силовой микроскоп NTEGRA PRIMA (NT-MDT) для сканирования состояния поверхности ранее помеченной области. После чего производились измерения шероховатости поверхности выбранной области с шагом измерения $\approx 10-20$ часов. Полученные значения шероховатости обрабатывались, и производилось построение зависимостей относительного изменения среднеквадратичной шероховатости (ΔS_q) от времени (t), прошедшего с воздействия слабого ИМП (рис. 35.).

Было обнаружено пиковое уменьшение показателей среднеквадратичной шероховатости выбранной области исследуемых образцов CdTe(Cl), спустя 75 и 100 часов, после воздействия слабого ИМП, для образцов CdTe(Cl) n- и p-типа проводимости, соответственно. Так, на рис. 35 представлены АСМ-снимки поверхности образцов CdTe(Cl), имеющих n- и p-тип проводимости, причем стоит заметить, что на рисунке 36 (a) и на рисунке 36 (b) области анализируемой поверхности постоянны для каждого кристалла. Заметно, что отклонения максимумов и минимумов профилей от нормалей значительно отличаются для идентичных поверхностей до и после воздействия слабого ИМП. Так, для кристаллов CdTe(Cl), n-типа проводимости, перепад высот рельефа меняется с 0-1400 нм, до воздействия, на 0-600 нм, через 100 часов, после воздействия ИМП.

Аналогичная ситуация наблюдается для кристаллов CdTe(Cl), p-типа проводимости: перепад высот рельефа меняется с 0-1600 нм, до воздействия, на 0-800, после воздействия ИМП. Шероховатость поверхности образцов CdTe(Cl), n- и p-типов проводимости, после воздействия слабого ИМП, ведет себя схоже. Наблюдается падение показателей шероховатости, причем наблюдаемое пиковое уменьшение показателей Sq происходит в идентичные времена: 100–165 часов для образцов n-типа и 115–180 часов для образцов p-типа. При этом величины изменения показателей среднеквадратичной шероховатости также схожи: уменьшение на 32% от исходных (контрольных) значений, для кристаллов n-типа и уменьшения на 37,8% от исходных (контрольных) значения для кристаллов p-типа проводимости. По прошествии 140 часов, после воздействия слабыми ИМП, кристаллы обоих типов проводимости показывают релаксацию показателей среднеквадратичной шероховатости (Sq) поверхности до значений, близких к исходным (контрольным).

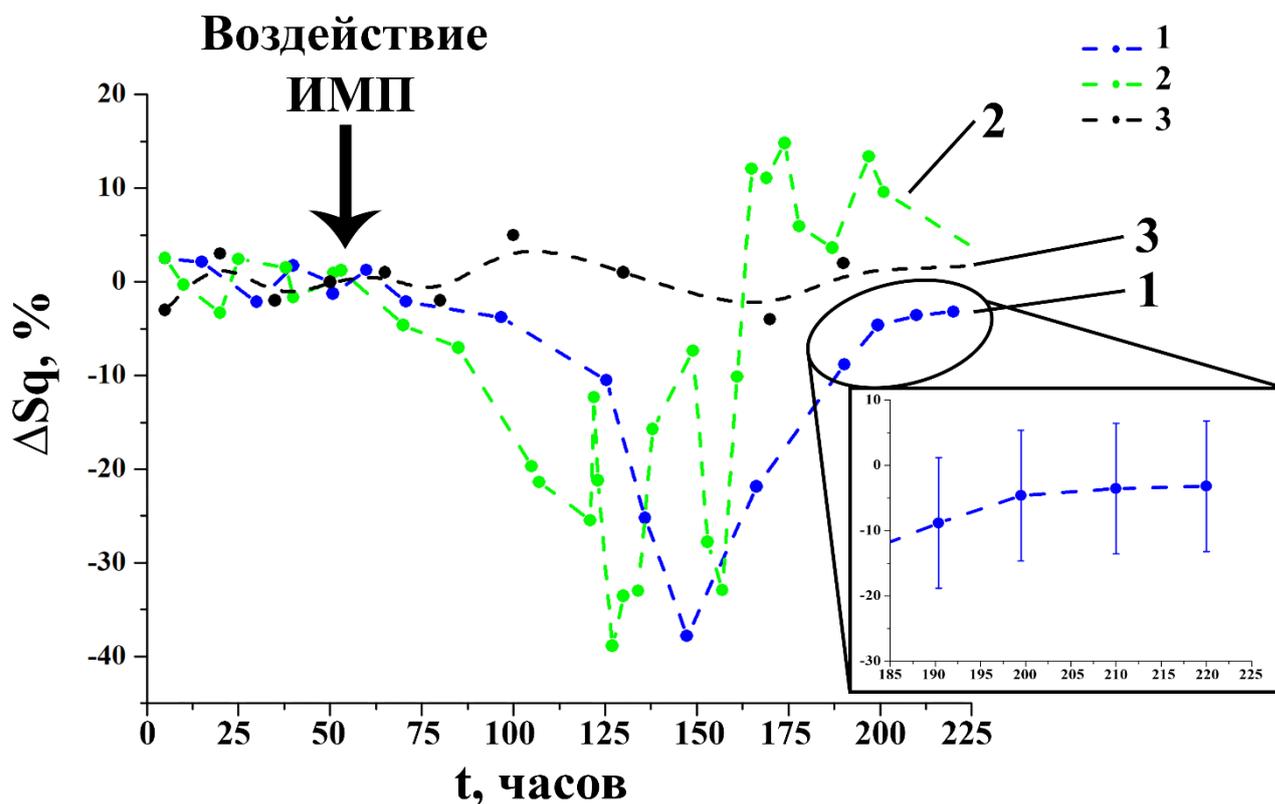


Рис. 35. Зависимости изменения среднеквадратичной шероховатости (ΔSq) поверхности кристаллов CdTe(Cl) от времени (t): Кривая 1 – $\Delta Sq(t)$ кристаллов CdTe(Cl), p–типа проводимости, подвергшихся воздействию слабого ИМП; Кривая 2 – $\Delta Sq(t)$ кристаллов CdTe(Cl), n–типа проводимости, подвергшихся воздействию слабого ИМП. Кривая 3 - $\Delta Sq(t)$ контрольных образцов. Вектор В перпендикулярен плоскости $(\bar{1}11)$. На врезке - увеличенная область 185-225 часов с указанными ошибками измерений. Воздействие ИМП осуществлялось на временной отметке в 50 часов.

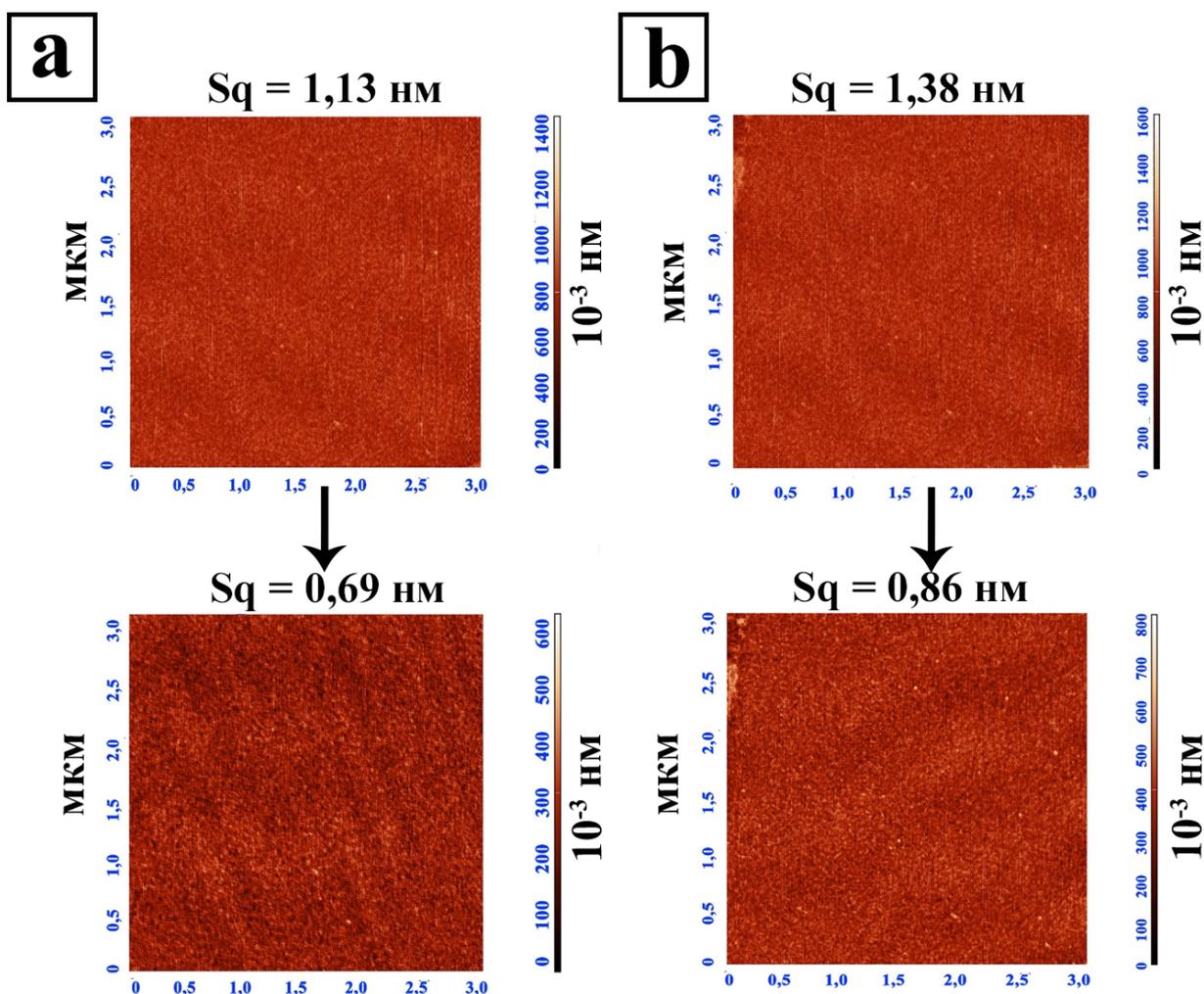


Рис. 36. АСМ – снимки поверхности кристаллов CdTe(Cl) до воздействия слабого ИМП и через 75-100 часов, после воздействия слабого ИМП; а – кристаллы CdTe(Cl), n-типа проводимости; б – кристаллы CdTe(Cl), р-типа проводимости.

Также интересно отметить, что во времена, соответствующие временам наибольшего магнитоиндуцированного изменения шероховатости, а именно через 65-130 часов, после воздействия слабого ИМП на исследуемый образец, наблюдается резкое увеличение шума при измерении твердости (табл. 7). Так, стандартный шум измерения твердости, при нагрузках 5-30 мН составляет 3-5%. Начиная с ~80 часов, после воздействия слабого ИМП, наблюдается увеличение разброса значения твердости (рис. 37.). Через ~100 часов, после воздействия слабого ИМП, т.е. во время наибольшего падения шероховатости (рис.

35.) наблюдается наибольший разброс значение твердости и погрешность измерений составляет 9-10% (рис. 37., рис. 38.).

Таблица 7. Увеличение шума (разброс измеренных значений твердости) при измерении твердости кристаллов CdTe(Cl), p-типа проводимости, после воздействия слабого ИМП. Нагрузка 5-30 мН.

CdTe:Cl, p-тип проводимости				
№ измерения	t, часов - время, прошедшее с воздействия слабого ИМП	H (твердость), ГПа	ΔH (погрешность измерения), ГПа	ΔH (погрешность измерения), %
0	0 (до воздействия ИМП)	0,77	0,036	4,7
1	15	0,8	0,042	5,26
2	40	0,79	0,027	3,5
3	55	0,76	0,03	4
4	70	0,79	0,0355	4,5
5	80	0,83	0,0581	7
6	90	0,85	0,0688	8,1
7	100	0,92	0,0966	10,5
8	115	0,87	0,07221	8,3
9	120	0,81	0,0408	4,7
10	130	0,77	0,024	3,12
11	150	0,79	0,04	4,75

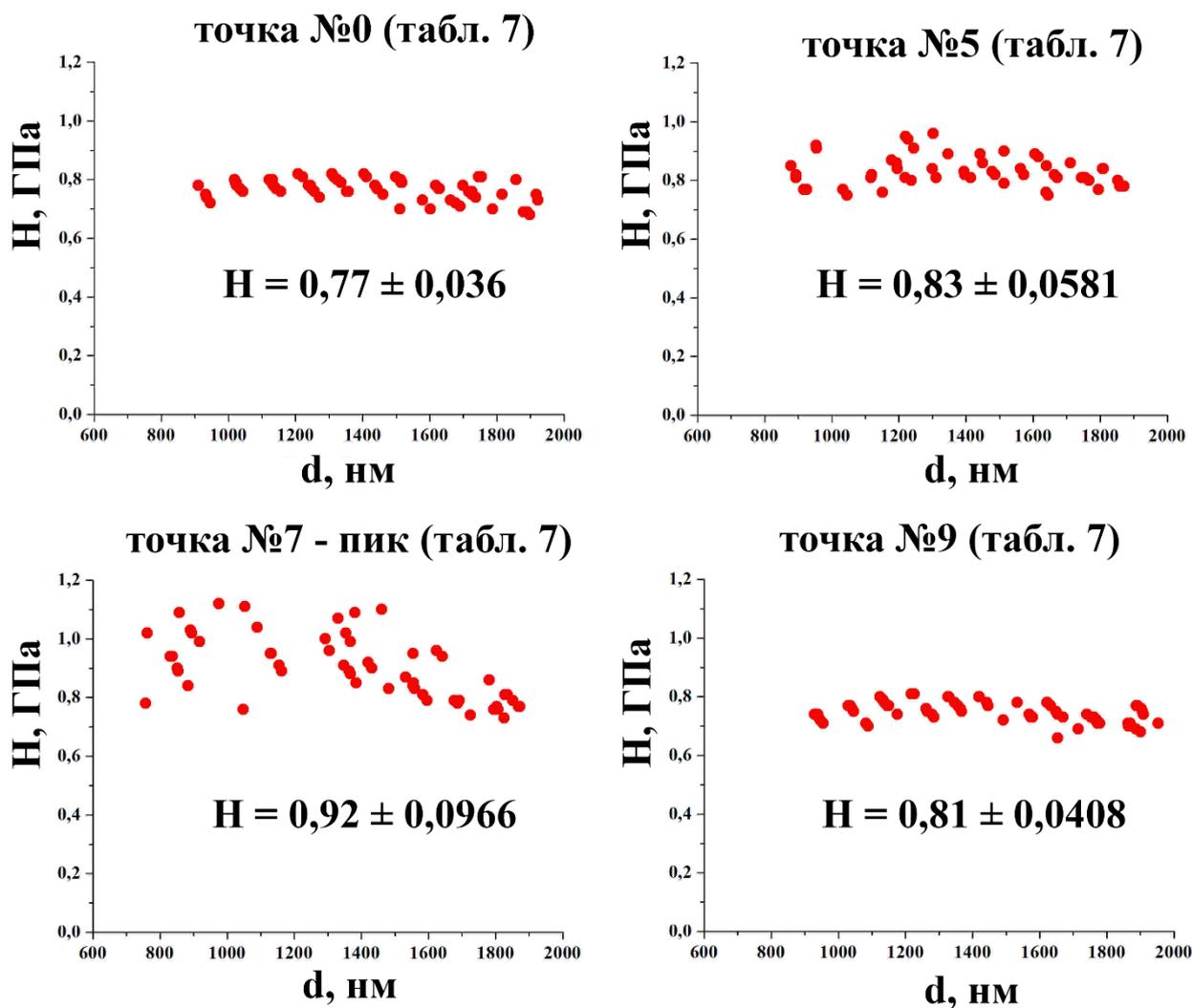


Рис. 37. Массивы результатов измерения твердости (H) от глубины вдавливания (d) индентора в исследуемый образец CdTe(Cl), p – типа проводимости, для 0 точки, а также через 80, 100 и 120 часов, после воздействия слабого ИМП.

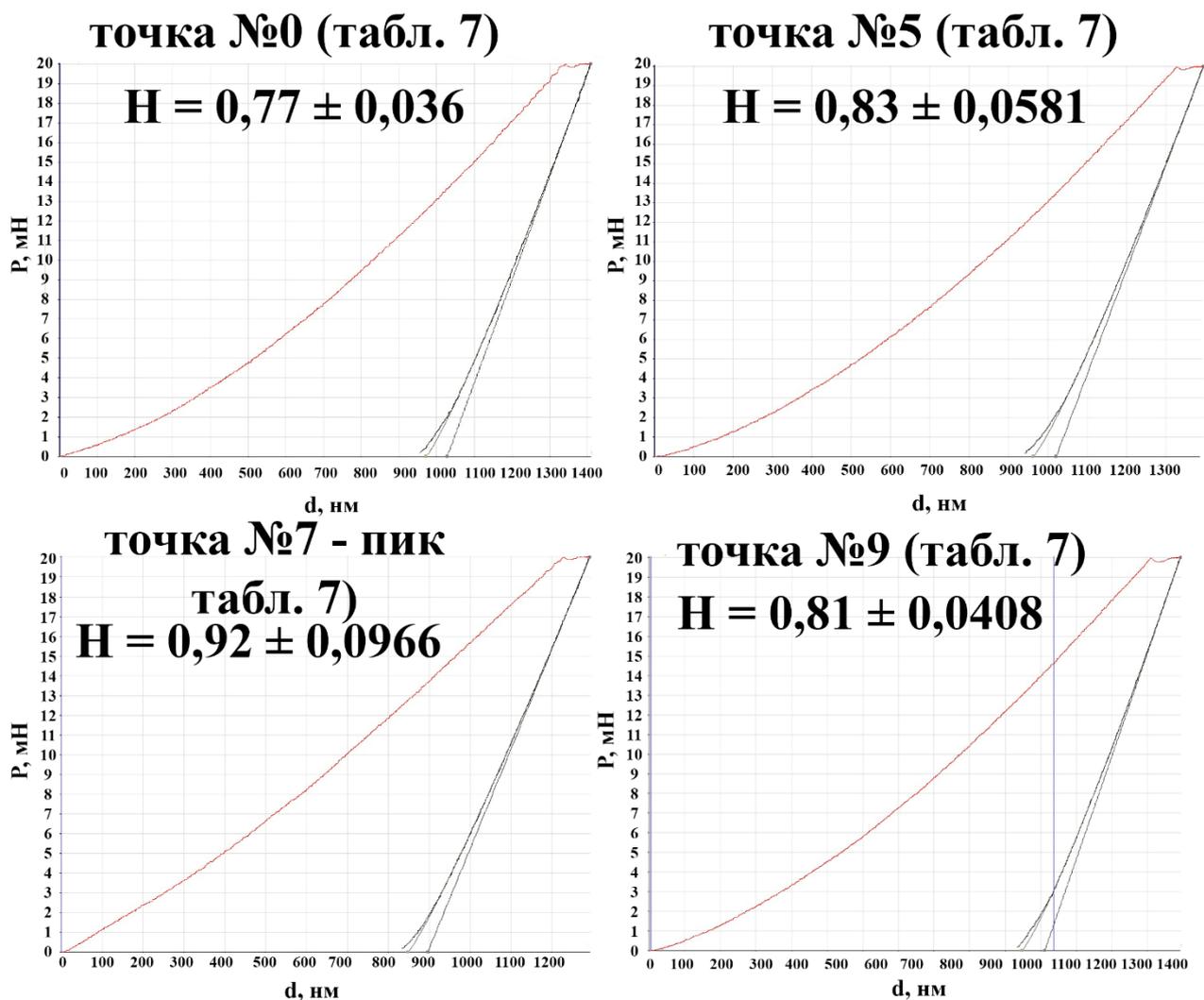


Рис. 38. Кривые нагружения и разгрузки в зависимости от глубины для нагрузки в 20 мН, для исследуемых образцов CdTe(Cl), р-типа проводимости, для 0 точки, а также через 80, 100 и 120 часов, после воздействия слабого ИМП.

Подводя промежуточный итог, мы можем сказать:

- Обнаружено изменения показателей шероховатости кристаллов CdTe(Cl), после воздействия слабых ИМП. У кристаллов n- и р-типов проводимости наблюдается единственный пик падения шероховатости, происходящий в интервале 50-130 часов, после воздействия слабого ИМП. Спустя 140 часов, после воздействия слабого ИМП кристаллы обоих типов проводимости показывают релаксацию шероховатости до исходных значений.

- Отсутствие первичного пика изменения шероховатости, аналогичного первичному пику изменения проводимости (рис. 27. б.), а также длительные временные интервалы, наблюдаемых изменений, с последующей полной релаксацией позволяют предположить, что механизмы изменений состояния поверхности, вызванные воздействием слабых ИМП, аналогичны таковым при изменении механических характеристик кристаллов CdTe(Cl) и являются диффузионными

3.4. Влияние ориентации кристалла в слабом ИМП на интенсивность изменений свойств кристаллов CdTe(Cl), индуцированных данным ИМП

Известно, что при различной ориентации диамагнитных кристаллов в магнитном поле, интенсивность отклика свойств кристалла на магнитное воздействие может, как возрастать, так и уменьшаться, вплоть до полного исчезновения данного отклика. Это может объясняться тем, что положение дефектов или их комплексов в структуре кристаллов может ориентироваться относительно определенного предпочтительного направления в кристалле. В связи с этим, представляют интерес исследования влияния ориентации кристалла в слабом ИМП, в процессе магнитного воздействия, на интенсивность изменения механических и электрических свойств кристаллов CdTe(Cl).

Подготовка образцов CdTe(Cl), проводимая в рамках данных экспериментов, соответствовала описанной в главе 2. Отбор образцов с известными характеристиками осуществлялся аналогично описанному в предыдущих главах. Проводились предварительных исследования электрических и механических характеристик. В процессе воздействия слабого ИМП образцы находились на немагнитной подставке внутри соленоида, в двух конфигурациях (рис.13): 1- Вектор В перпендикулярен плоскости (110); 2- Вектор В перпендикулярен плоскости (111). После воздействия слабого ИМП исследуемые образцы по-

мещались в экспериментальные установки для измерения удельной проводимости (σ) и твердости (Н). Ошибки экспериментов составляли 3% и 4% при измерении электрических характеристик и показателей твердости, соответственно.

Было обнаружено [В] значительное увеличение величины относительных изменений показателей удельной проводимости и твердости кристаллов CdTe(Cl), при смене ориентации образца в процессе воздействия слабого ИМП. Так, при векторе В перпендикулярном плоскости (111) наблюдается более интенсивное упрочнение и разупрочнение кристаллов CdTe(Cl) (Рис. 39.), после воздействия на них слабого ИМП, чем при ориентации вектора В перпендикулярно плоскости (110). Кристаллы n-типа проводимости показывают увеличение интенсивности наблюдаемых пиков разупрочнения: так, первичное уменьшение твердости составляет 3,5%, при векторе В перпендикулярном плоскости (110), против 6,1% для вектора В перпендикулярного плоскости (111). Появляется второй пик уменьшения твердости, составляющий 9,1%, не наблюдаемый при ориентации вектора В перпендикулярно плоскости (110). Третий пик уменьшения твердости также становится более интенсивным: 11,1% при В перпендикулярном плоскости (110), против 18,2% при В перпендикулярном плоскости (111).

Аналогичная картина наблюдается при исследовании кристаллов CdTe(Cl) p-типа проводимости. Интенсивность пиков упрочнения значительно увеличивается. Так, первый пик увеличения твердости составляет 4,3% при векторе В перпендикулярном плоскости (110), против 8,1% при векторе В перпендикулярном плоскости (111); второй пик увеличения микротвердости составляет 7,4% при векторе В перпендикулярном плоскости (110), против 20,3% при векторе В перпендикулярном плоскости (111); третий пик увеличения твердости составляет 4,5% при векторе В перпендикулярном плоскости (110), против 9,5% при векторе В перпендикулярном плоскости (111).

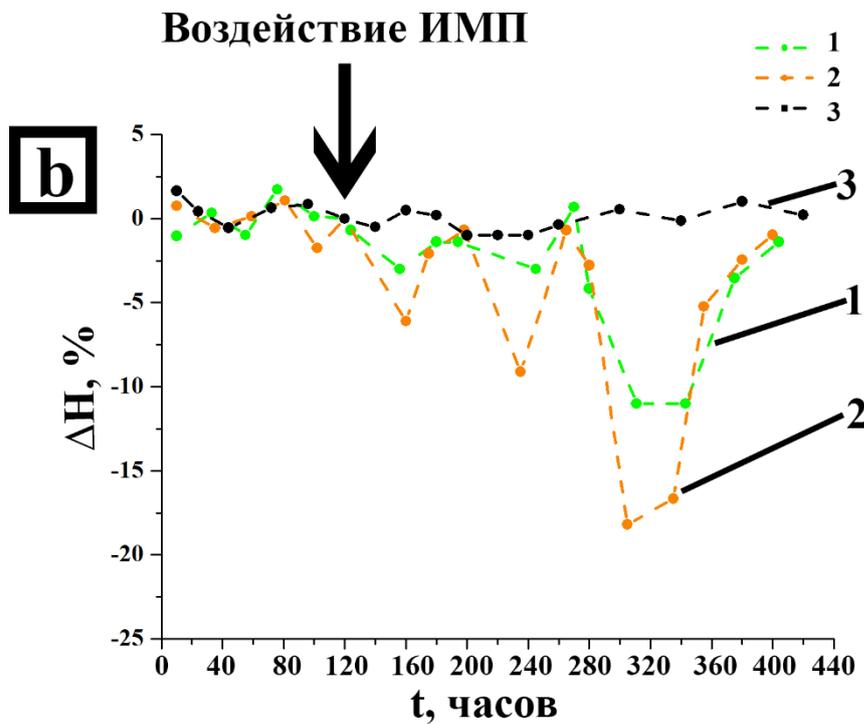
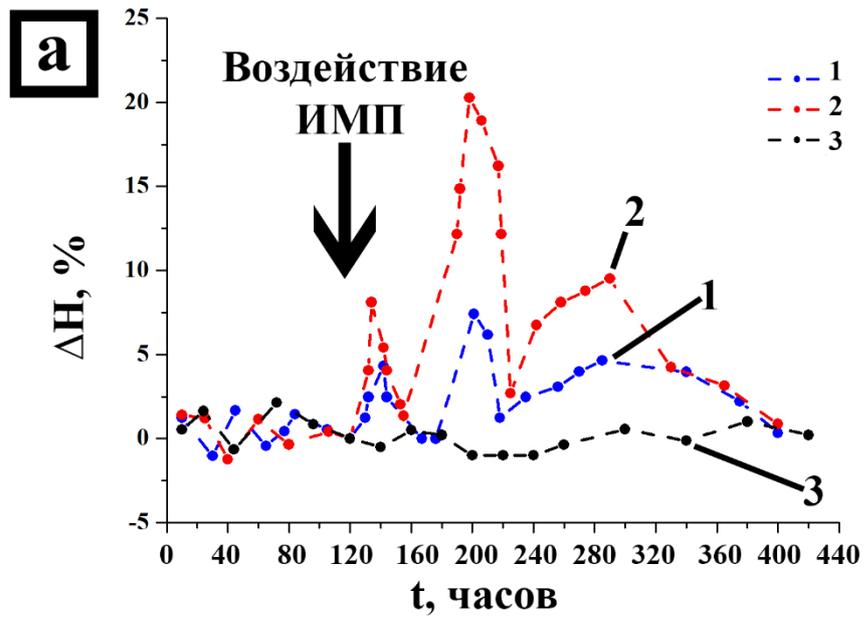


Рис. 39. Зависимости относительного изменения твердости (ΔH) кристаллов CdTe(Cl) от времени (t). Шаг измерения ≈ 20 ч. Кривая 1 - $\Delta H(t)$, при векторе \mathbf{V} перпендикулярном плоскости (110); Кривая 2 - $\Delta H(t)$, при векторе \mathbf{V} перпендикулярном плоскости (111); Кривая 3 - $\Delta H(t)$ контрольного образца. **a** - кристаллы CdTe(Cl) n-типа проводимости; **b** - кристаллы CdTe(Cl) p-типа про-

водимости. Воздействие ИМП осуществлялось на временной отметке в 120 часов.

Наблюдаемые эффекты увеличения интенсивности изменения свойств при изменении ориентации кристалла в процессе воздействия слабого ИМП, наблюдаются и на зависимостях изменения удельной проводимости ($\Delta\sigma$) кристаллов CdTe(Cl) р-типа проводимости (Рис. 40.). Кристаллы имели форму и размеры идентичные кристаллам, используемым в главе 3.1. Подготовка и отбор образцов также был идентичен.

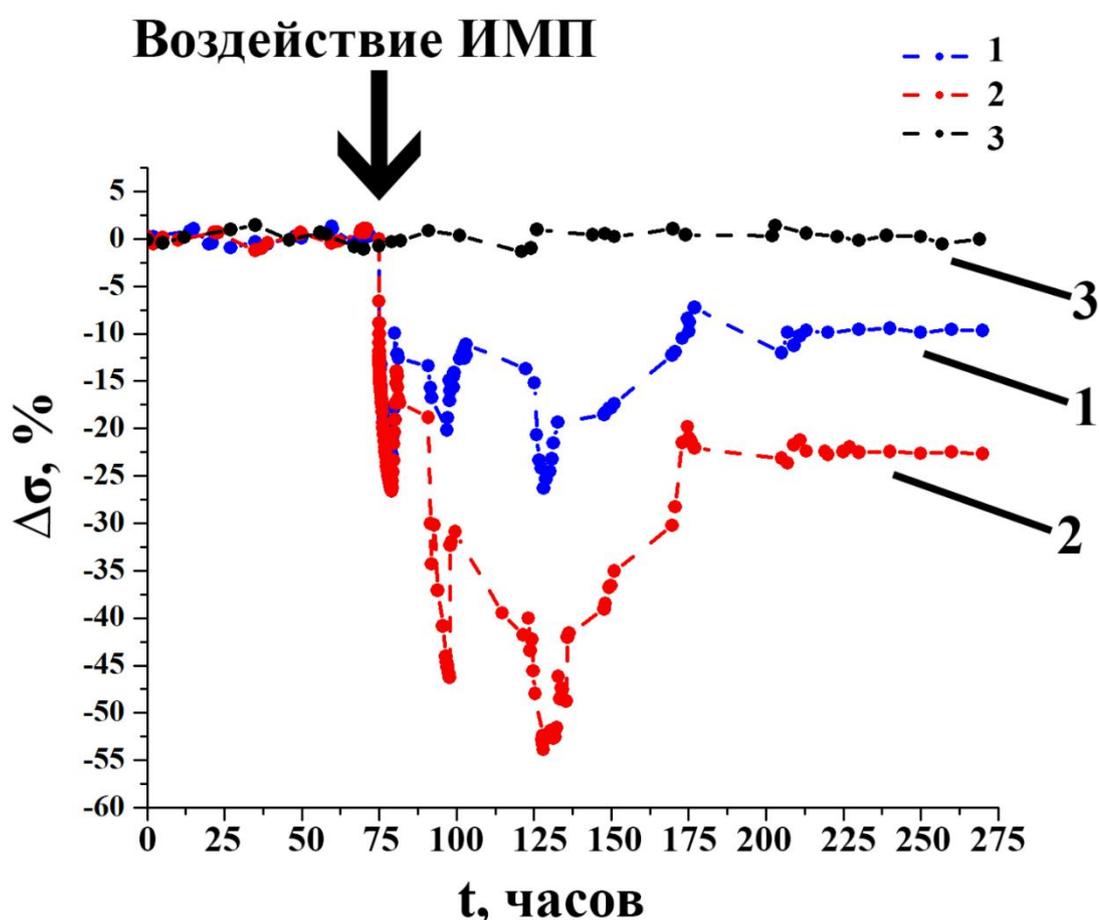


Рис. 40. Зависимости изменения удельной проводимости ($\Delta\sigma$) кристаллов CdTe(Cl) от времени (t). Шаг измерения $\approx 1,5$ ч. Кривая 1 - $\Delta\sigma(t)$, при векторе \mathbf{V} перпендикулярном плоскости (110); Кривая 2 - $\Delta\sigma(t)$, при векторе \mathbf{V} перпендикулярном плоскости ($\bar{1}\bar{1}1$); Кривая 3 - $\Delta\sigma(t)$ контрольного образца. Воздействие ИМП осуществлялось на временной отметке в 75 часов.

Наблюдаются изменения интенсивности пиков σ (t): первый пик изменения σ (Рис. 40.) составляет 22,8% при векторе **V** перпендикулярном плоскости (110) против 26,3% при векторе **V** перпендикулярном плоскости (111); второй пик уменьшения удельной проводимости составляет 20,8% при **V** перпендикулярном (110) против 46,3% при **V** перпендикулярном (111); третий пик составляет уменьшение σ на 26,3% при **V** перпендикулярном (110) против уменьшения на 53,8% при **V** перпендикулярном (111). Кроме того, наблюдается уменьшение показателей σ , при которых значения проводимости стабилизируются и остаются постоянными. При **V** перпендикулярном (110) эти значения были на 8,2% меньше контрольных значений, в то время как при **V** перпендикулярном (111) они уже на 21% меньше контрольных. Последующие, дополнительные измерения проводимости данных кристаллов, через 250, 350 и 500 часов, после воздействия на них ИМП, также показали стабильность новых значений проводимости.

Таким образом, полученные результаты дают возможность предположить наличие определенного предпочтительного направления расположения дефектов в кристаллах CdTe(Cl), при ориентации вдоль которого, интенсивность происходящих перестроений дефектных комплексов, запускаемых магнитным воздействием, увеличивается.

Подводя промежуточный итог, мы можем сказать:

- При ориентации вектора **V** перпендикулярно плоскости (111) интенсивность изменения структурно-чувствительных свойств увеличивается в ≈ 2 раза, по сравнению со случаем ориентации вектора **V** перпендикулярно плоскости (110) кристаллов CdTe(Cl).
- Кристаллы CdTe(Cl), p-типа проводимости, при векторе **V**, перпендикулярном плоскости (111), показывают стабилизацию проводимости через 100 часов на значениях $1,77 \cdot 10^{-9} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, что на 21% ниже исходных (контроль-

ных) значений. Данные кристаллы CdTe(Cl), p-типа, также оказались нечувствительны к повторному воздействию слабых ИМП.

3.5. Сравнение результатов воздействий слабых ИМП и ПМП на электрические свойства кристаллов CdTe(Cl)

Принято считать [5,96,97], что концентрация преобразованных комплексов в магнитном поле, имеющим амплитуду B , и время экспозиции кристалла в поле $t_{\text{эксп}}$, пропорциональна $B^2 \cdot t_{\text{эксп}}$. Это утверждение, обычно, является верным в случае воздействия на кристаллы слабых ПМП. Исходя из этого утверждения можно сделать вывод, что если слабые ИМП являются частным случаем слабых ПМП, то интенсивность изменения электрических свойств кристаллов CdTe, после воздействия слабых ИМП и ПМП, будет неизменна, при выполнении условия $B^2 \cdot t_{\text{эксп}} = \text{const}$. Однако, при сравнении воздействий слабых ИМП и ПМП надо учитывать, как особенности фронтов нарастания магнитного поля, так и количество или же частоту импульсов магнитного поля, т.е. скважность поля. Последнее необходимо в виду того, что, как было определено в [2], результаты воздействия импульсов магнитного поля меняются в зависимости от количества импульсов, а также отличаются от результатов воздействия ПМП на немагнитные кристаллы.

Для проверки предположения о схожести результатов воздействий слабых ИМП и ПМП на немагнитные кристаллы CdTe, были подготовлены образцы CdTe(Cl), имеющие n-тип проводимости. Максимум амплитуды и время воздействия были выбраны идентичные, для удовлетворения условию $B^2 \cdot t_{\text{эксп}} = \text{const}$, где $B=1,04$ Тл и $t_{\text{эксп}}=10$ мин, соответственно. В случае принципиальной разницы в механизмах возникновения индуцированных выдержкой в данных полях изменений, зависимости относительного изменения проводимости ($\Delta\sigma$) от времени (t) должны принципиально отличаться. Однако, этого не

происходит [А] (рис. 41.). Электрические характеристики (в частности, удельная темновая проводимость – σ) идентичных кристаллов CdTe(Cl) n–типа проводимости ведут себя схоже, после воздействия слабыми ИМП и ПМП (рис. 41.), показывают пиковые увеличения проводимости различной величины, с последующей релаксацией до исходных значений. Так, для кристаллов CdTe(Cl), прошедших воздействие слабым ИМП, при ориентации \vec{B} перпендикулярно (110), характерен первый пик роста проводимости на ~21 %, против ~35%, в случае воздействия слабого ПМП на идентичные кристаллы. Второй пик увеличения проводимости в случае воздействия ИМП показывает увеличение проводимости на ~11%, против ~60% для кристаллов, прошедших воздействие слабым ПМП. Несмотря на различия в величинах относительного изменения проводимости, общий ход зависимости $\Delta\sigma(t)$ близок. Пиковые изменения проводимости наблюдаются в схожие времена, релаксация свойств кристаллов также начинается спустя примерно равное время, после магнитного воздействия. Что может говорить о схожести механизмов наблюдаемых эффектов.

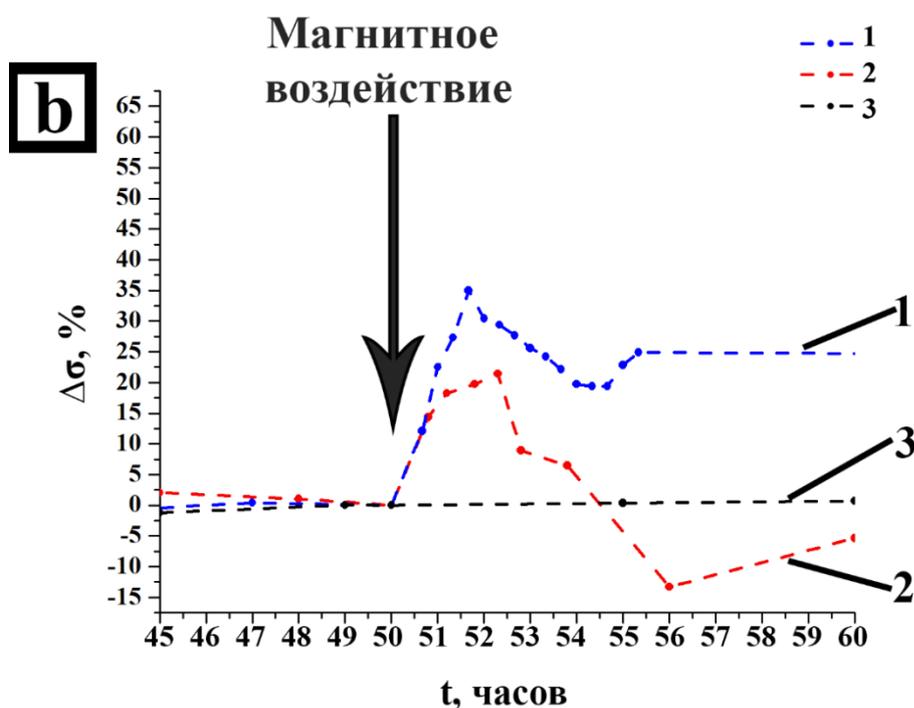
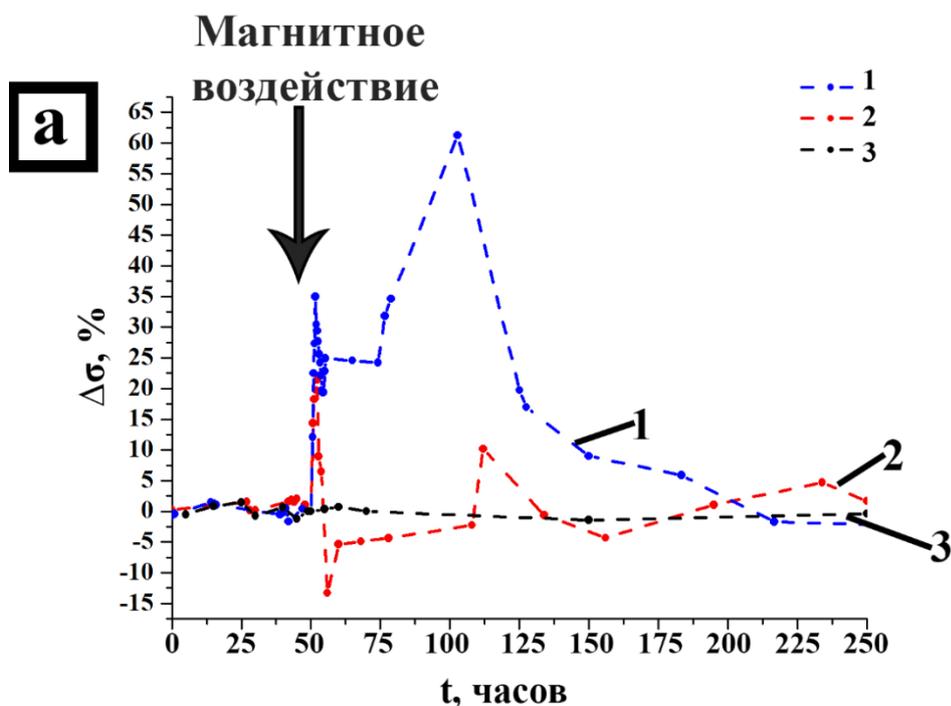


Рис. 41. Зависимость относительного изменения удельной проводимости ($\Delta\sigma$) кристаллов CdTe(Cl) (n-типа проводимости) от времени (t): Кривая 1 – образцы, обработанные ИМП; Кривая 2 – образцы, обработанные ПМП. Кривая 3 – $\Delta\sigma(t)$ контрольного образца. Временные интервалы: а - 0–250 часов; б - 45–60 часов. Магнитное воздействие осуществлялось на временной отметке в 50 часов.

Здесь, однако, стоит подробнее рассмотреть воздействия ИМП и ПМП, так как ПМП представляет из себя непрерывное воздействие магнитного поля на образец, в течении всего времени экспозиции. ИМП представляет собой серию импульсов магнитного поля, воздействующих на исследуемый образец с определенной частотой. То есть, строго говоря, сравнивать воздействия ИМП и ПМП только из расчёта равенства $B^2 \cdot t_{\text{эксп}}$, где $t_{\text{эксп}}$ – время нахождения образца в магнитном поле, некорректно, так как время непосредственного воздействия магнитного поля будет отличаться. Кроме того, как было показано в [2] результаты воздействий одного и трех импульсов магнитного поля, при идентичном B , отличаются. Что может говорить о необходимости учета в условии $B^2 \cdot t_{\text{эксп}} = \text{const}$ еще и частоты следования импульсов, или их количества, в случае рассмотрения воздействия слабого ИМП.

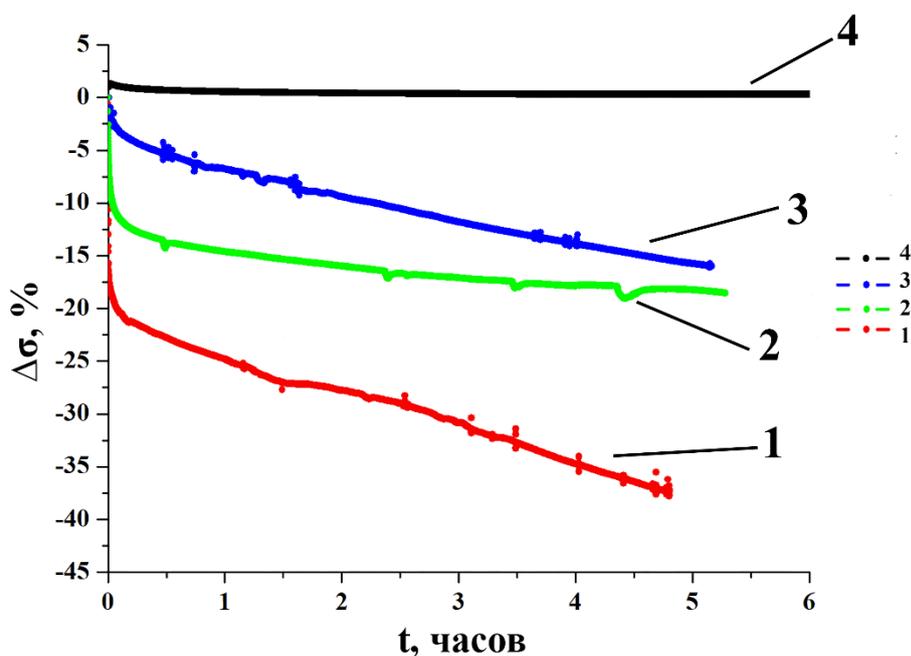


Рис. 42. Зависимости изменения удельной проводимости ($\Delta\sigma$) кристаллов CdTe(Cl) (p-типа проводимости) от времени (t): Кривая 1 – образец, обработанный ИМП, имеющим характеристики: $B=0,76$ Тл, $t_{\text{эксп}}=17$ мин; Кривая 2 – образец, обработанный ИМП, имеющим характеристики: $B=1,04$ Тл, $t_{\text{эксп}}=10$ мин; Кривая 3 - образец, обработанный ИМП, имеющим характеристики: $B=0,48$ Тл, $t_{\text{эксп}}=48,5$ мин; Кривая 4 - $\Delta\sigma(t)$ контрольного образца.

И действительно, результаты воздействия ИМП, имеющего разные характеристики, на кристаллы CdTe(Cl), с соблюдением условия $B^2 \cdot t_{\text{эксп}} = \text{const}$ показывают (рис. 42.), что относительные изменения темновой проводимости, индуцированные воздействием ИМП, значительно отличаются. Так, величина падения проводимости кристаллов CdTe(Cl), подвергшихся воздействию слабого ИМП, имеющего характеристики $B_{\text{max}}=0,76$ Тл, $t_{\text{эксп}}=17$ мин больше, чем у кристаллов, подвергнутых воздействию полями $B_{\text{max}}=1,04$ Тл, $t_{\text{эксп}}=10$ мин и $B_{\text{max}}=0,48$ Тл, $t_{\text{эксп}}=48,5$ мин, в то время как последние показывают близкие значения изменения темновой проводимости, но падение проводимости в случае воздействия ИМП, имеющего характеристики $B_{\text{max}}=1,04$ Тл, $t_{\text{эксп}}=10$ мин происходит быстрее. Количество импульсов, из которых состоят данные воздействия, также отличаются: 7200 импульсов для $B_{\text{max}}=1,04$ Тл, $t_{\text{эксп}}=10$ мин; 12240 импульсов для $B_{\text{max}}=0,76$ Тл, $t_{\text{эксп}}=17$ мин и 33840 импульсов для $B_{\text{max}}=0,48$ Тл, $t_{\text{эксп}}=47$ мин. При этом стоит учитывать то, что используемый импульс магнитного поля не симметричен. Таким образом, наблюдаемая на рисунке 40 разница в скорости роста проводимости кристаллов CdTe(Cl), происходящей в результате воздействия слабых магнитных полей, может быть связана с некорректностью использования связи концентрации преобразованных комплексов в магнитном поле с условием $B^2 \cdot t_{\text{эксп}}$. Данное условие справедливо для случая воздействия ПМП, но в случае воздействия ИМП необходимо учитывать длительность, форму и количество импульсов магнитного поля, воздействующего на образец.

Подводя промежуточный итог, мы можем сказать:

- Связь плотности преобразованных комплексов в магнитном поле с характеристиками используемого поля, имеющая вид $B^2 \cdot t_{\text{эксп}}$ справедлива для случая ПМП, но для случая воздействия ИМП требует учета таких параметров поля как, длительность, форма и количество импульсов магнитного поля, воздействующего на образец.

- Отклик на воздействие слабыми ПМП схож с откликом на воздействие слабыми ИМП.

3.6. Выводы по главе 3

Наблюдаемые индуцированные слабым ИМП изменения структурно-зависимых свойств могут происходить из-за того, что ИМП способствует необратимому изменению метастабильных состояний точечных дефектов, инициируя многостадийный релаксационный процесс, сопровождающийся изменением структурно-зависимых свойств кристалла. За общую динамику индуцированных ИМП изменений структурно-зависимых свойств, предположительно отвечают комплексы определяющие основной тип носителей заряда, в нашем случае состоящие из избыточных атомов Cd и Te. В случае кристаллов CdTe, тип проводимости определяется избытком Cd или Te, вводимыми в начале процесса роста кристаллов. Это объясняет различия в изменениях проводимости и твердости кристаллов CdTe n- и p-типов проводимости. Можно предположить, что дефектные комплексы, имеющие в своем составе избыточные атомы Cd или Te, отвечающие за тип проводимости, определяют общую динамику отклика на воздействие слабыми ИМП, в то время как комплексы, включающие атома примесей (такие как $V_{Cd}Cl^+$; $V_{Cd}2Cl^+$, в случае кристаллов CdTe(Cl)) определяют степень чувствительности кристалла к данному воздействию. В пользу этого вывода говорит то, что кристаллы CdTe, имеющие состав, близкий к стехиометрическому и не имеющие примесей легантов оказались нечувствительны к воздействию слабых ИМП и не показали сколько-нибудь заметного изменения структурно-чувствительных свойств.

Стоит учитывать, что, как мы выяснили, связь плотности преобразованных комплексов, в случае воздействия ИМП отличается от таковой для случая воздействия ПМП, в общем случае имеющей вид $V^2t_{\text{экс}}$. В случае воздействия

слабого ИМП необходимо учитывать такие параметры ИМП как, длительность, форма и количество импульсов магнитного поля, воздействующего на образец. Необходимо также учитывать, что при увеличении времени воздействия слабого ИМП происходит и нагрев образца, что может иметь стимулирующее воздействие на интенсивность скорость магнитоиндуцированных изменений.

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ СЛАБЫХ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ТЕМНОВУЮ ПРОВОДИМОСТЬ И ТВЕРДОСТЬ КРИСТАЛЛОВ CdTe(Cl,Fe)

В полупроводниковых кристаллах присутствие различных легирующих примесей оказывает определяющее влияние на структуру и свойства данных объектов, например, выделение примесной проводимости, как основного типа проводимости, о чем писалось выше. Как говорилось в Главе 1.1.4. примеси немагнитных кристаллов являются важным фактором, влияющим на наличие, а также на величину отклика кристаллов на выдержку в слабых магнитных полях. Так, например, присутствие незначительных примесей Ni в немагнитных кристаллах NaCl оказывало существенное влияние на динамику изменения твердости данных кристаллов, после воздействия на них слабого ПМП (подробнее в Главе 1.1.4.). Кроме того, так как кристаллы CdTe являются диамагнитными, то именно дефектная примесная структура отвечает за наблюдаемые изменения структурно-зависимых свойств после воздействия слабого магнитного поля.

Таким образом, представляют особенный интерес исследования результатов воздействий слабых ИМП на структурно-зависимые свойства полупроводниковых кристаллов CdTe, легированных различными примесями.

Для проведения данных исследований были подготовлены кристаллы CdTe, легированные Cl и Fe. Подготовка образцов CdTe(Cl,Fe), проводимая в рамках данных экспериментов, соответствовала описанной в главе 2. Содержание избыточного Te в исследуемых образцах составляло 0,0021 масс.%, содержание Cl в исследуемых образцах 0,015 масс.%. Примесь Fe присутствует только в образцах CdTe(Cl,Fe) в концентрации 0,0016 масс.%. Воздействие осуществлялось при ориентации вектора **B** перпендикулярно плоскости (111) кристаллов CdTe(Cl,Fe). Ошибка эксперимента составляла 2% при измерении электрических характеристик и 3-5% при измерении твердости.

Исследуемые кристаллы CdTe(Cl,Fe) являлись диамагнетиками, несмотря на присутствие легирующей примеси Fe. Так, даже при температуре 2К полевая зависимость данных кристаллов говорит о его диамагнитной природе (рис. 43), в то время как обычно кристаллы CdTe, легированные различными примесями [146-148] показывают значительный вклад парамагнитной составляющей, обусловленный Ван-Флековским парамагнетизмом, при температурах ниже 50К.

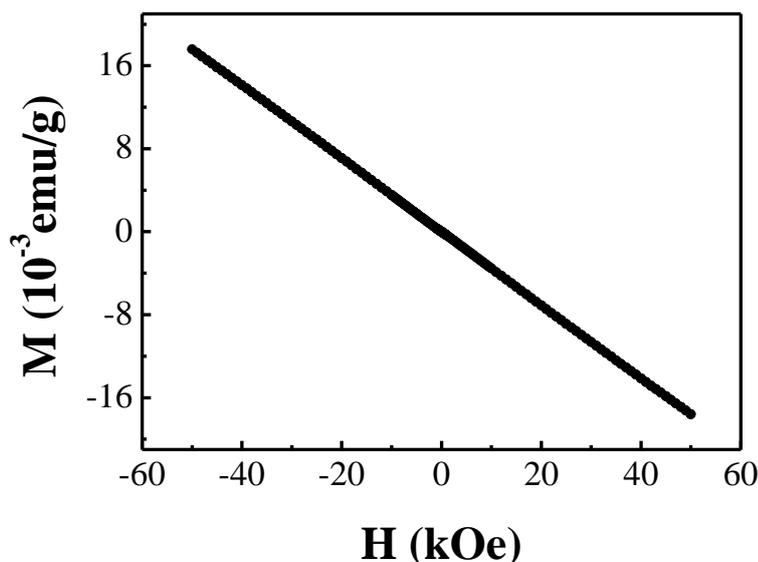


Рис. 43. Полевая зависимость намагниченности образца CdTe(Cl,Fe) массой 382,7 мг при T=2 К.

4.1. Результаты воздействия слабого импульсного магнитного поля на удельную темновую проводимость (σ) кристаллов CdTe(Cl, Fe)

Было обнаружено значительное различие в динамике относительного изменения проводимости кристаллов CdTe(Cl) и CdTe(Cl,Fe) (рис. 43.). При этом сохраняется общая тенденция к падению проводимости для кристаллов, имеющих p-тип проводимости, после воздействия слабыми ИМП. Так, кристаллы CdTe(Cl) имеют три пиковых интервала уменьшения проводимости (рис. 44. а.),

в то время как кристаллы $\text{CdTe}(\text{Cl},\text{Fe})$ показывают лишь один пиковый интервал падения проводимости (рис. 44. б.), с общим падением проводимости на 25-30%. При этом релаксации проводимости до исходных значений не наблюдается в обоих случаях. Стоит также отметить отличия во временных интервалах существования пиков магнитоиндуцированных изменений проводимости кристаллов $\text{CdTe}(\text{Cl})$ и $\text{CdTe}(\text{Cl},\text{Fe})$. Так, у кристаллов, легированных Cl стабилизация показателей проводимости наблюдается через ≈ 120 часов, после воздействия слабыми ИМП, в то время как кристаллы, легированные Cl и Fe, показывают нестабильность показателей темновой проводимости на протяжении 200 часов, после воздействия слабого ИМП, после чего показывают стабилизацию на значениях ниже контрольных на 20-25%. Кроме того, удельная темновая проводимость кристаллов $\text{CdTe}(\text{Cl})$ через ~ 125 часов, после воздействия слабого ИМП (отметка в 150 часов на рисунке 44. а.) показывает стабильные значения, в то время как проводимость кристаллов $\text{CdTe}(\text{Cl},\text{Fe})$ на протяжении всей зависимости относительного изменения проводимости от времени (рис. 43. б.) демонстрирует значительный разброс. Так, даже после стабилизации значений проводимости по прошествии 200 часов, после воздействия магнитного поля, наблюдается периодический разброс значений проводимости в пределах 2-3%, чего не происходит на кристаллах $\text{CdTe}(\text{Cl})$.

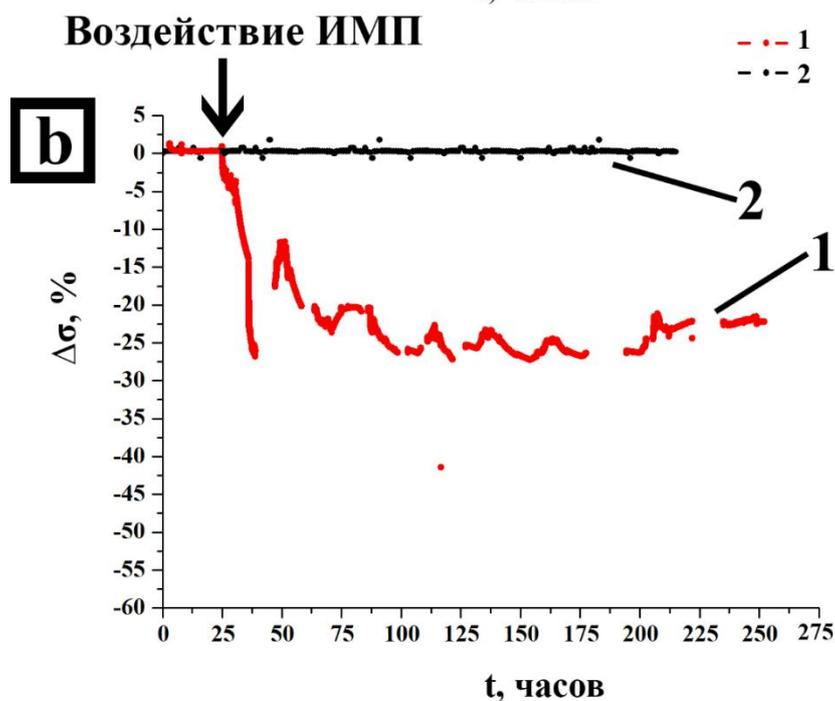
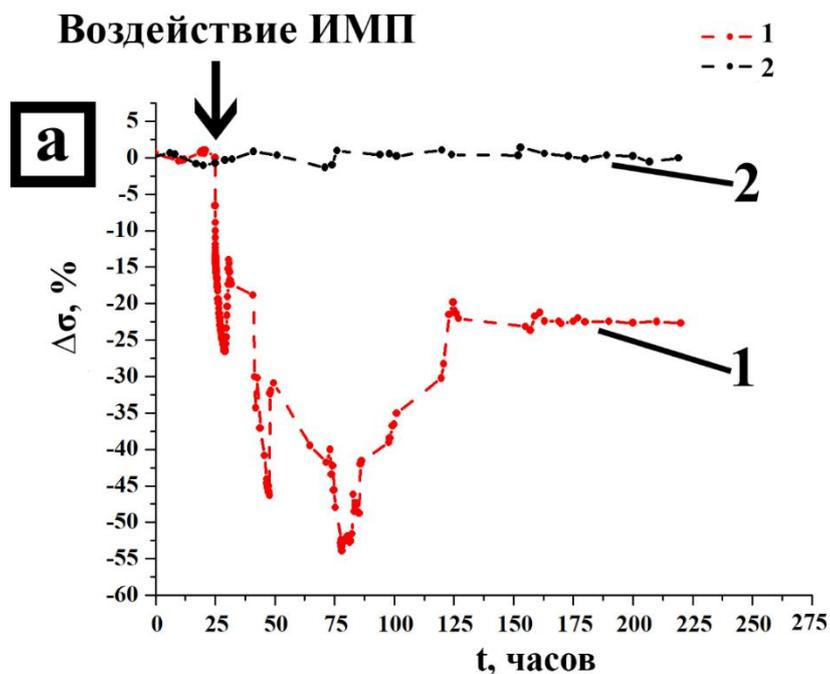


Рис. 44. Зависимости относительного изменения удельной проводимости ($\Delta\sigma$) кристаллов $\text{CdTe}(\text{Cl})$ (а) и $\text{CdTe}(\text{Cl,Fe})$ (б) от времени (t). Шаг измерения $\approx 1,5$ ч для $\text{CdTe}(\text{Cl})$ и ≈ 2 с для $\text{CdTe}(\text{Cl,Fe})$. Вектор \mathbf{B} перпендикулярен плоскости (111). Кривая 1 - $\Delta\sigma(t)$, после воздействия слабого ИМП; Кривая 2 – $\Delta\sigma(t)$ контрольных образцов. Воздействие ИМП осуществлялось на временной отметке в 25 часов.

Таким образом, мы можем сказать, что:

- Динамика относительного изменения темновой проводимости кристаллов CdTe, легированных Cl и Cl,Fe схожа, однако величина относительного изменения проводимости и длительность магнитоиндуцированных изменений различаются.
- Кристаллы CdTe, имеющие p-тип проводимости и легированные Cl и Fe также показывают необратимый характер изменения проводимости и стабилизацию на значениях на 20-25% ниже исходных.

4.2. Результаты воздействия слабого импульсного магнитного поля на твердость кристаллов CdTe(Cl,Fe)

Зависимости изменения механических характеристик (твердости) кристаллов CdTe(Cl) и CdTe(Cl,Fe) от времени, прошедшего после воздействия слабыми ИМП также показывают значительные различия (рис. 45.). Величины относительного изменения твердости кристаллов совпадают, в максимуме показывая упрочнение на 20%. Однако, временные интервалы существования пиков изменения твердости также значительно отличаются. Как и в случае с удельной темновой проводимостью (рис. 44.) наблюдается увеличение продолжительности магнитоиндуцированных изменений механических характеристик (твердости).

Так, кристаллы CdTe(Cl) показывают, после воздействия слабыми ИМП, 3 пика упрочнения кристаллов, с последующей релаксацией до исходных (контрольных) значений через 280 часов, после воздействия слабыми ИМП. Кристаллы CdTe(Cl,Fe) также показывают три пика упрочнения, однако длительность данных интервалов упрочнение выше: 1 пик упрочнения кристаллов CdTe(Cl) происходит в интервале 0-35 часов, после воздействия слабыми ИМП, против 0-135 часов для кристаллов CdTe(Cl,Fe). 2 и 3 пики упрочнения для кри-

сталлов CdTe(Cl) наблюдаются через 35-110 часов и 110-280 часов, после воздействия слабым ИМП, соответственно. У кристаллов CdTe(Cl,Fe) 2 пик наблюдается 135-235 часов, а 3 пик имеет свой максимум через 300 часов, после воздействия слабым ИМП. Таким образом, заметно значительное увеличение времени существования магнитоиндуцированных изменений твердости у кристаллов CdTe, легированных не только Cl, но и Fe. При этом концентрация Cl у данных кристаллов в 2 раза меньше, чем у кристаллов, легированных только Cl.

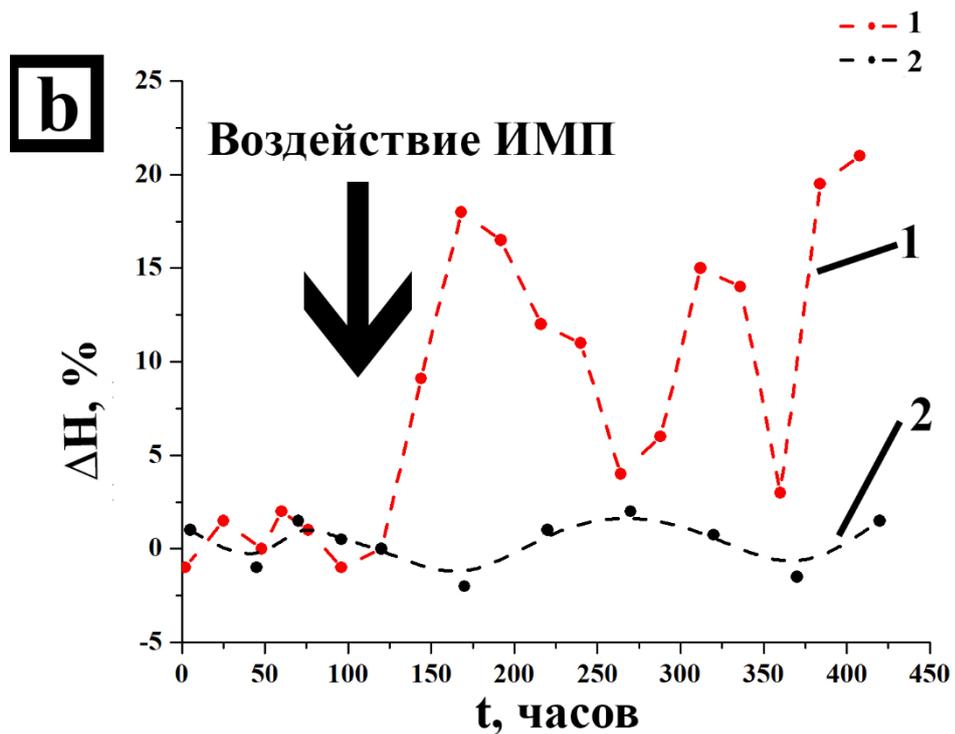
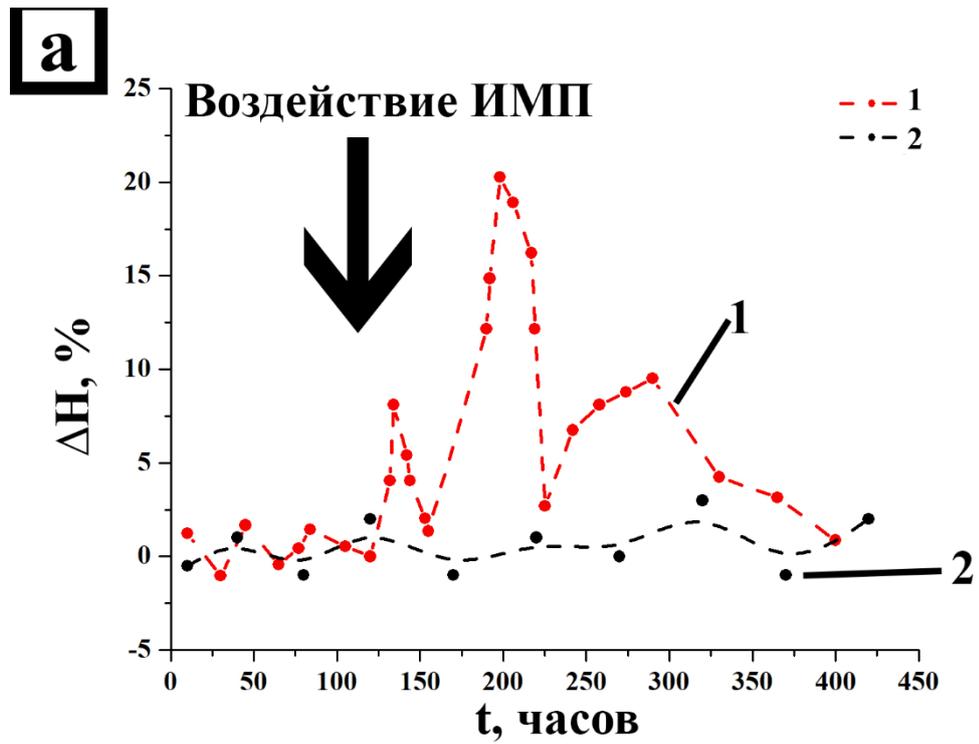


Рис. 45. Зависимости относительного изменения твердости (ΔH) кристаллов $\text{CdTe}(\text{Cl})$ (а) и $\text{CdTe}(\text{Cl,Fe})$ (б) от времени (t). Шаг измерения ≈ 20 ч. Вектор \mathbf{B} перпендикулярен плоскости (111). Кривая 1 - $\Delta H(t)$, после воздействия слабого ИМП; Кривая 2 - $\Delta H(t)$ контрольных образцов. Воздействие ИМП осуществлялось на временной отметке в 120 часов.

Таким образом, подводя промежуточный итог, мы можем сказать:

- Кристаллы $\text{CdTe}(\text{Cl}, \text{Fe})$ имеют более продолжительные интервалы существования магнитоиндуцированных изменений твердости, чем кристаллы $\text{CdTe}(\text{Cl})$.
- Величина относительного изменения твердости, а также характер упрочнения кристаллов $\text{CdTe}(\text{Cl})$ и $\text{CdTe}(\text{Cl}, \text{Fe})$ схож.

4.3. Выводы по главе 4

Наблюдаемые индуцированные слабым ИМП изменения структурно-зависимых свойств могут происходить из-за того, что ИМП способствует необратимому изменению метастабильных состояний точечных дефектов, инициируя многостадийный релаксационный процесс, сопровождающийся изменением структурно-зависимых свойств кристалла. В этом случае разница в зависимостях изменения свойств кристаллов, имеющих различные типы и содержания легирующих примесей обусловлены тем, что при изменении концентрации легирующего элемента изменяется средний размер и плотность примесных комплексов, что приводит к изменению локальной атомной конфигурации вокруг примесных атомов. За общую динамику индуцированных ИМП изменений структурно-зависимых свойств, предположительно отвечают комплексы определяющие основной тип носителей заряда, в нашем случае состоящие из избыточных атомов Cd и Te. Данный вывод можно сделать исходя из того, что вне зависимости от концентрации и типа легирующей примеси динамика изменения свойств всегда схожа для кристаллов, имеющих идентичные типы проводимости. При этом, в случае кристаллов CdTe , тип проводимости определяется избытком Cd или Te, вводимыми в начале процесса роста кристаллов. Это объясняет обратную динамику изменения свойств кристаллов CdTe n- и p-типов проводимости. Комплексы, состоящие из компенсационных легантов, Cl и Fe,

не оказывают существенного влияния на общую динамику изменения свойств, однако влияют на интенсивность и общую продолжительность магнитоиндуцированных изменений, что соотносится с результатами работы [87]. Таким образом, можно предположить, что дефектные комплексы, имеющие в своем составе избыточные атомы Cd или Te, отвечающие за тип проводимости, определяют общую динамику отклика на воздействие слабыми ИМП, в то время как комплексы легантов определяют степень чувствительности кристалла к данному воздействию. Этот же вывод подтверждают эксперименты по исследованиям воздействия слабых ИМП на кристаллы CdTe, имеющие состав, близкий к стехиометрическому и не имеющие примесей легантов. Данные кристаллы оказались нечувствительны к воздействию слабых ИМП и не показали сколько-нибудь заметного изменения структурно-чувствительных свойств.

Стоит учитывать, что, как мы выяснили, связь плотности преобразованных комплексов, в случае воздействия ИМП отличается от таковой для случая воздействия ПМП, имеющий вид $B^2 t_{\text{ксп}}$. В случае воздействия слабого ИМП необходимо учитывать такие параметры ИМП как, длительность, форма и количество импульсов магнитного поля, воздействующего на образец. Кроме того, необходимо учитывать, что при увеличении времени воздействия слабого ИМП происходит и нагрев образца, что может иметь стимулирующее воздействие на интенсивность магнитоиндуцированных изменений. Кроме того, наблюдаемый нагрев образца и различная чувствительность кристаллов CdTe, легированных различными примесями, к магнитному воздействию, могут быть связаны с тем, что данные кристаллы, обладают различными показателями магнитной восприимчивости [133,134]. Что приводит к необходимости учета изменений относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей исследуемых объектов, которые весьма чувствительны к типу и содержанию легирующих примесей.

Исходя из всего вышеперечисленного, можно сделать вывод, что общая динамика изменения структурно-чувствительных свойств кристаллов объясня-

ется реакциями атомных перестроек в системах дефектных комплексов, состоящих из основных дефектов, определяющих основной тип свободных носителей заряда (в нашем случае комплексы, имеющие в своем составе межузельный Cd, Te и вакансии по Cd и Te, в зависимости от типа проводимости), в то время как за интенсивность отклика на ИМП воздействие отвечают примесные комплексы с атомами легирующих примесей ($V_{Cd}^-Cl^+$; $V_{Cd}^-2Cl^+$; $V_{Cd}^{2-}Fe^{2+}$; $Cl_{Cd}^+Te^-$ и т.п.) меняющими диэлектрические и магнитные свойства кристалла. Что, впрочем, не отменяет возможности участия комплексов, имеющих в своем составе атомы легирующих примесей, в процессах атомной перестроек дефектных комплексов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследования позволили:

- Обнаружить эффект изменения удельной темновой проводимости кристаллов CdTe(Cl) и CdTe(Cl,Fe), вызванного воздействием ИМП.
- Обнаружить эффект изменения твердости кристаллов CdTe(Cl) и CdTe(Cl,Fe), вызванного воздействием ИМП.
- Обнаружить эффект изменения шероховатости поверхности кристаллов CdTe(Cl) и CdTe(Cl,Fe), вызванного воздействием ИМП.
- Обнаружить связь динамики изменений удельной темновой проводимости и твердости с типом проводимости кристаллов CdTe(Cl).
- Обнаружить эффект необратимого падения удельной темновой проводимости, вызванного воздействия ИМП, у кристаллов CdTe(Cl) и CdTe(Cl,Fe), имеющих p-тип проводимости.

Основные результаты работы могут быть сформулированы следующим образом:

1. Впервые показано, что воздействие слабого импульсного магнитного поля способно приводить к долговременным изменениям удельной темновой проводимости кристаллов CdTe(Cl) и CdTe(Cl,Fe). Причем кристаллы CdTe, n-типа проводимости, показывают обратимое увеличение проводимости, а кристаллы 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 CdTe(Cl) и CdTe(Cl,Fe), соответственно.

3. Показано, что воздействие импульсного магнитного поля способно приводит к долговременным обратимым изменениям показателей твердости кристаллов CdTe(Cl) и CdTe(Cl,Fe).
4. Впервые показано, что динамика магнитоиндуцированных изменений удельной темновой проводимости и показателей твердости 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).
5. Показано, что воздействие слабого импульсного магнитного поля способно приводит к изменению шероховатости поверхности кристаллов CdTe(Cl). У кристаллов CdTe(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).
6. 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.
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) показы-

вают стабилизацию проводимости и релаксацию твердости через 175 и 350 часов, соответственно.

БЛАГОДАРНОСТИ

В заключение выражаю благодарность моему научному руководителю – доктору физико-математических наук, Владимиру Михайловичу Каневскому, за плодотворное научное сотрудничество и оказанную всестороннюю поддержку; А.М. Ополченцеву и к.ф.-м.н. Е.А. Петржик за помощь в исследовании механических характеристик кристаллов; В.Б. Кварталову за исследования примесного состава исследуемых кристаллов; М.Д. Павлюк за помощь в освоении материала, связанного с CdTe; д.ф.-м.н., проф. В.И. Альшицу, д.ф.-м.н. С.П. Палто, д.ф.-м.н. Е.В. Даринской, к.ф.-м.н. Е.А. Петржик, к.ф.-м.н. М.В. Колдаевой, к.ф.-м.н. А.В. Буташину, М.Д. Павлюк и к.ф.-м.н. Ю.В. Шалдину за интерес к работе, полезные обсуждения и ценные советы; Е.Б. Баскакову и д.ф.-м.н. В.И. Стрелову за предоставленные образцы мишеней моносulfида самария (SmS); всем сотрудникам лаборатории роста тонких пленок и неорганических наноструктур и Института кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» за оказанные помощь и содействие.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- А. И.С. Волчков, В.М. Каневский, М.Д. Павлюк // Письма в ЖЭТФ. 2018. Т. 107. Вып. 4. С. 276.
- В. И. С. Волчков, А. М. Ополченцев, М. Д. Павлюк, В. М. Каневский // КРИСТАЛЛОГРАФИЯ, 2018, том 63, №5, с. 746-749.
- С. И.С. Волчков, М.П. Зыкова, М.Д. Павлюк, В.М. Каневский // Сборник Тезисов Совещания и Молодежной конференции РНСИ-КС-2014, 2014.
- Д. И.С. Волчков, М.Д. Павлюк, В.М. Каневский, Б.С. Рощин, М.П. Зыкова // Сборник тезисов ФКС-2014, 2014
- Е. И.С. Волчков, М.П. Зыкова, В.И. Михайлов, А.Э. Муслимов, А.В. Буташин, В.М. Каневский // Сборник тезисов XIX Российского симпозиума по растворяющей электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твёрдых тел, 2015.
- Ф. А.И. Анчаров, В.Е. Асадчиков, А.В. Буташин, И.С. Волчков, М.П. Зыкова, В.М. Каневский, С.Н. Сульянов, Б.П. Толочко // Сборник тезисов докладов Шестой Международной конференции «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов» (2015)
- Г. И.С. Волчков, А.М. Ополченцев А.Б. Колымагин М.Д. Павлюк В.М. Каневский // Сборник тезисов Первого российского кристаллографического конгресса, 2016, С.64.
- Н. И.С. Волчков, А.М. Ополченцев, М.Д. Павлюк, В.М. Каневский // Сборник тезисов докладов Седьмой Международной конференция «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов», 2017.
- И. И. С. Волчков, А. М. Ополченцев, В. М. Каневский // Сборник тезисов докладов РКЭМ-2018, 2018
- Ж. А. М. Ополченцев, И. С. Волчков, А.Б. Колымагин, Л.А. Задорожная, В. М. Каневский // Сборник тезисов докладов РКЭМ-2018, 2018.

- К. И.С. Волчков, А.М. Ополченцев, А.Б. Колымагин, Л.А. Задорожная, В.М. Каневский. // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*, 2018, Т. 18, № 1, с.1-6.
- Л. И.С. Волчков, А.М. Ополченцев, М.Д. Павлюк, В.М. Каневский. // *Сборник тезисов ФКС – 2018*.
- М. И.С. Волчков, В.М. Каневский, М.Д. Павлюк. // *Сборник тезисов ФКС – 2018*
- Н. И.С. Волчков, В.Б. Кварталов, М.Д. Павлюк, В.М. Каневский. // *Сборник тезисов ФКС – 2019*, С.90
- О. Е.Б. Баскаков, И.С. Волчков, В.И. Стрелов, В.М. Каневский // *Сборник тезисов Международного семинара МНТ-XV «Структурные основы модифицирования материалов»*, г. Обнинск. 2019. С. 86-90.
- Р. И.С. Волчков, П.Л. Подкур, М.Д. Павлюк, В.М. Каневский // *Труды XII ежегодного заседания Научного Совета РАН по физике конденсированных сред*, с. 43.
- Q. И.С. Волчков, П.Л. Подкур, М.Д. Павлюк, В.М. Каневский // *Сборник тезисов Восьмой Международной конференции «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов»*, 2019, с. 75.
- R. И.С. Волчков, П.Л. Подкур, М.Д. Павлюк, В.М. Каневский // *Сборник тезисов Восьмой Международной конференции «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов»*, 2019, с. 76.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.М. Каневский, В.П. Власов, А.А. Пурцхванидзе // ФТТ. 1991. Т. 33. С. 2194.
2. В. И. Альшиц, Е. В. Даринская, Е. А. Петржик // Кристаллография, 2009, т. 54, No 6, с. 1017–1022
3. V.I. Alshits, E.V. Darinskaya, M.V. Koldaeva, E.A. Petrzhiik // Dislocations in Solids. 2008. V. 14. Ch. 86. 333
4. С. В. Вонсовский, «Магнетизм» // Наука, М. (1971). 1032 с.
5. Ю.И. Головин // ФТТ, 2004, т. 46, №5, 769–803.
6. А.А. Скворцов, Л.И. Гончар, А.М. Орлов // ФТТ, 2003, т. 45, в. 9, с.1603-1607
7. В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, М.В. Колдаева, Е.А. Петржик // ЖЭТФ, 2016, том 149, вып. 1, с. 136.
8. Е.В. Даринская, М.В. Колдаева, В.И. Альшиц, И.М. Притула, А.Э. Волошин // Письма в ЖЭТФ, 2018, т.108, в.4, с. 236-242.
9. А.А. Скворцов, А.В. Каризин, Л.В. Волкова, М.В. Корячко // ФТТ, 2015, т.57, в. 5, с.898-902
- 10.Р.Б. Моргунов, В.П. Пискорский, Р.А. Валеев, Д.В. Королев // Труды ВИАМ, 2018, 12 (72), с. 79-87
- 11.В.В. Шляров, Д.В. Загуляева, В.Е. Громов // Вектор науки ТГУ, 2018, №1(43), с. 98-104
- 12.А.А. Скворцов, Д.Е. Пшонкин, М.Н. Лукьянов, М.Р. Рыбакова // Вестник ТГУ. Серия Естествен. и техн. Науки, 2016, т.21, в.3, с.1314-1315
- 13.Е.С. Иванова, И.Д. Румянцев, Е.А. Петржик // ФТТ, 2016, т.58, в. 1, с.125-130
- 14.Р.В. Гайнутдинов, Е.С. Иванова, Е.А. Петржик, А.К. Лашкова, Т.Р. Волк // Письма в ЖЭТФ, 2017, т.106, в.2, с.84-89

15. М.Г. Барышев, Г.И. Касьянов // Известия ВУЗов, Пищевая технология, 2002, 1, 21-23.
16. В.В. Савченко, А.Ю. Синявский // Вестник ВИЭСХ, 2013, 2 (11), 33-37.
17. S. Rivoirard, F. Gaucherand, O. Bouaziz, E. Pinto da Costa, E. Beaunon // ISIJ International, 2006, V.46, №9, pp. 1274 – 1276
18. P. Korcansky, N. Tomasovicova, M. Koneracka, V. Zavisova, M. Timko, M. Hnatic, N. Eber, T. Toth-Katona, J. Jadzyn, J. Honkonen, E. Beaunon, X. Chaud // IEEE Transactions on Magnetics, 2011, V.47, №10, pp. 4409-4421
19. М.И. Каганова, В.С. Эдельман, «Электроны проводимости» // Физ.мат.лит.– Наука, М. (1984). С.416.
20. Yu.A. Osipyan, Yu.I. Golovin, D.V. Lopatin, R.B. Morgunov, R.K. Nikolaev, S.Z. Smurak // Phys. Stat. Sol., B 223, 2001, R14.
21. Y.A. Ossipyan, R.B. Morgunov, A.A. Baskakov, A.M. Orlov, A.A. Skvortsov, E.N. Inkina, Y. Tanimoto // JETP Letters, 2003, V.79, №3, pp. 126 – 130
22. В.А. Павлов, И.А. Перетурина, И.Л. Печеркина // Физика Металлов и Металловедения, 1979, т.47, №1, с.171-179.
23. А.Е. Смирнов, А.А. Урусовская // ФТТ, 1987, т. 29, с. 825.
24. Н.В. Загоруйко // Кристаллография, 1965, т. 10, в. 1, с. 63.
25. Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов // Письма в ЖЭТФ, 1995, т. 61, с. 583.
26. Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов // Доклады РАН, 1997, т. 354, с. 632.
27. Б.И. Смирнов, Н.Н. Песчанская, В.И. Николаев // ФТТ, 2001, т. 43, с. 2154.
28. А.А. Урусовская, В.И. Альшиц, А.Е. Смирнов, Н.Н. Беккауер // Письма в ЖЭТФ, 1997, т. 65, с. 632.
29. В.И. Альшиц, Н.Н. Беккауер, А.Е. Смирнов, А.А. Урусовская // ЖЭТФ, 1999, т. 115, с. 951.

30. Yu.I. Golovin, R.V. Morgunov, D.V. Lopatin, A.A. Baskakov // *Phys. Status Solidi A*. 1997, V.160, R3.
31. Н.А. Тяпунина, В.Л. Красников, Э.П. Белозерова // *ФТТ*, 1999, т.41, с.1035.
32. Н.А. Тяпунина, Э.П. Белозерова, В.Л. Красников // *Материаловедение*, 1999, т.12, с.21.
33. Э.П. Белозерова, А.А. Светашов, В.Л. Красников // *Изв. РАН Сер. Физ.*, 1997, т.61, с.291.
34. Н.А. Тяпунина, В.Л. Красников, Э.П. Белозерова, В.Н. Виноградов // *ФТТ*, 2003, т.45, с.95.
35. А.А. Скворцов, Р.Б. Моргунов, Д.Е. Пшонкин, В.П. Пискорский, Р.А. Валеев, Н.С. Ованесян, В.В. Кучеряев, Д.В. Королев // *ФТТ*, 2019, т.61, №6, с.1100-1106.
36. А.А. Скворцов, Д.Е. Пшонкин, М.Н. Лукьянов, М.Р. Рыбакова // *Вестник Тамб. Гос. Ун., Серия Естеств. и техн. науки*, 2016, т.21, в. 3, с. 1314-1316.
37. В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Т.М. Перекалина, А.А. Урусовская // *ФТТ*, 1987, т.29, с.467
38. В.А. Гражулис, Ю.А. Осипьян // *ЖЭТФ*, 1970, т.58, с.1259.
39. V.A. Pavlov, I.A. Pereturina, N.L. Pecherkina // *Phys. Stat. Sol.*, 1980, V.57, p.449.
40. А.И. Дерягин, В.А. Павлов, К.Б. Власов, С.П. Грубова // *ФММ*, 1971, т.32, с.1231.
41. А.И. Дерягин, Р.Ш. Насыров // *ФММ*, 1980, т.49, с.1199.
42. E.J. Sharp, D.A. Avery // *Phys. Rev.*, 1967, V.158, p.511.
43. В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Е.А. Пержик // *ФТТ*, 1991, т.33, с.3001.

44. V.I. Alshits, E.V. Darinskaya, O.L. Kazakova, E.Yu. Mikhina, E.A. Petrzhik. // Journal of Alloys and Compounds, 1994, V.211/212, pp.548-553.
45. В.И. Альшиц, Р. Воска, Е.В. Даринская, Е.А. Пержик // ФТТ 1993, т.35, с.70.
46. В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Е.А. Пержик // ФТТ, 1993, т.35, с.320.
47. В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, И.В. Гектина, Ф.Ф. Лаврентьев // Кристаллография, 1990, т.35, с.1014.
48. В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Е.А. Пержик // ФТТ, 1992, т.34, с.155.
49. Е.В. Даринская, Е.А. Пержик, С.А. Ерофеева, В.П. Кисель // Письма в ЖЭТФ, 1999, т.70, с.298.
50. Р.Б. Моргунов, С.З. Шмурак, А.А. Баскаков // ЖЭТФ, 2003, т.124, в.4(10), с.840-850.
51. O. Korlak, R. Morgunov // J. Mater. Science, 2014, V.49, pp.1666-1673.
52. Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов // ФТТ, 1995, т.37, с.1352.
53. Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов // Письма в ЖЭТФ, 1993, т.58, с.189.
54. Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов, С.Е. Жуликов // Известие РАН. Сер. Физ., 1997, т.61, с.965.
55. Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов, С.Е. Жуликов, В.А. Киперман, Д.А. Лопатин // ФТТ, 1997, т.39, с.634.
56. Ю.И. Головин, А.В. Тютюнник // Кристаллография, 1996, т.41, с.1077.
57. Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов // Вестник Тамб. Гос. Ун., 1997, т.2, с.243.
58. Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов, В.Е. Иванов, С.Е. Жуликов, А.В. Тютюнник // Вестник Тамб. Гос. Ун., 1997, т.2, с.262.
59. Э.П. Белозерова, А.А. Светашов, В.Л. Красников // Кристаллография, 1997, т.42, с.493.
60. Н.А. Тяпунина, В.Л. Красников, Э.П. Белозерова // Вестник Тамб. Гос. Ун. 2002, т.3, с.216.

61. Н.А. Тяпунина, В.Л. Красников, Э.П. Белозерова // Известия РАН Сер. Физ., 2000, т.64, с.1776.
62. О.И. Дацко // ФТТ, 2002, т.44, с.289.
63. А.А. Урусовская, А.Е. Смирнов, Н.Н. Беккауер // Известия РАН. Сер. физ., 1997, т.61, с.937.
64. А.А. Урусовская, В.И. Альшиц, А.Е. Смирнов, Н.Н. Беккауер // ФТТ, 2000, т.42, с.270.
65. V.I. Alshits, N.N. Bekkauer, A.E.Smirnov, A.A. Urusovskay // Journal of Experimental and Theoretical Physics, 1999, V.88, p.523.
66. А.А. Урусовская, В.И. Альшиц, А.Е. Смирнов, Н.Н. Беккауер // Известия РАН Сер. Физ., 2000, т.64, с.1781.
67. А.А. Урусовская, В.И. Альшиц, А.Е. Смирнов, Н.Н. Беккауер // ФТТ, 2000, т.42, с.267.
68. Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов, В.Е. Иванов // ФТТ, 1997, т.39, с.2016.
69. Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов // ФТТ, 2001, т.43, с.827.
70. Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов // Известия РАН. Сер. Хим., N, 1997, 739.
71. Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов // ЖЭТФ, 1999, т.11, с.605.
72. Б.И. Смирнов, Н.Н. Песчанская, В.И. Николаев // ФТТ, 2001, т.43, с.31.
73. Yu.I. Golovin, R.V. Morgunov, D.V. Lopatin, A.A. Baskakov // Physic State Sol-
idi, A, 1997, R3.
74. Д.В. Загуляев, С.В. Коновалов, В.Е. Громов // Вестник ЮУрГУ, 2010, т.9,
с.51.
75. Е.А. Петржик, Е.В. Даринская, Л.Н. Демьянец // ФТТ, 2008, т.50, с.614.
76. E.V. Darinskaya, M.V. Koldaeva, V.I. Alshits, I.M. Pritula, A.E. Voloshin // Crys-
tallography Reports, 2018, V.63, N.6, pp.961.

77. Е.А. Петржик, Е.С. Иванова, В.И. Альшиц // Известия РАН, Сер. Физ., 2014, т.78, с.1305.
78. Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов, В.Е. Иванов, С.Е. Жуликов, А.А. Дмитриевский // Письма в ЖЭТФ, 1998, т.68, с.400.
79. Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов, В.Е. Иванов, А.А. Дмитриевский // ЖЭТФ, 2000, т.117, с.1080.
80. Ю.А. Осипьян, Р.Б. Моргунов, А.А. Баскаков, А.М. Орлов, А.А. Скворцов, Е.Н. Инкина, Й. Танимото // Письма в ЖЭТФ, 2004, т.79, с.158.
81. В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, М.В. Колдаева, Е.А. Петржик // ФТТ, 2012, т.54, с.305.
82. Ю.А. Осипьян, Ю.И. Головин, Д.В. Лопатин, Р.Б. Моргунов, Р.К. Николаев, С.З. Шмурак // ФТТ, 1999, т.41, с.2097.
83. Yu.A. Osipyan, Yu.I. Golovin, D.V. Lopatin, R.B. Morgunov, R.K. Nikolaev, S.Z. Smurak // Phys. Stat. Sol., B 2001, V.223, R14.
84. Ю.И. Головин, Д.В. Лопатин, Р.К. Николаев, А.В. Умрихин, С.З. Шмурак // Доклады АН, 2002, т.387, с.1.
85. Я.Б. Зельдович, А.Л. Бучаченко, Е.А. Франкевич // УФН, 1988, т.155, с.3.
86. Е.Л. Франкевич, И.А. Соколик, Д.И. Кадырев, В.М. Кобрянский // Письма в ЖЭТФ, 1982, т.36, с.401.
87. В.В. Кведер, Ю.А. Осипьян, А.И. Шалынин // ЖЭТФ, 1982, т.83, с.699.
88. Л.В. Власенко, В.А. Храпцов // Письма в ЖЭТФ, 1985, т.42, с.32.
89. В.В. Кведер, Ю.А. Осипьян // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1987, т.51, с.626.
90. K. Okamoto, N. Oda, A. Itaga, S. Kusabayashi // Chem. Phys. Lett., 1975, V.35, p.483.
91. M. Pope, N.E. Gescintov, F. Fogel // Mol. Cryst. Liq. Cryst., 1969, V.6, p.83.

92. Б.М. Румянцев, В.И. Лесин, Е.Л. Франкевич // Оптика и спектроскопия, 1975, т.38, с.89.
93. E.L. Frankevich, M.M. Tribel, A.A. Sokolik, L.I. Kolesnikova, Yu.I. Stolovitskii. Phys. Stat. Sol. B, 1981, V.2, p.423.
94. В.П. Лебедев, В.С. Крыловский // ФТТ, 1985, т.27, с.1285.
95. В.П. Лебедев, В.С. Крыловский // ФТТ, 1990, т.32, с.544.
96. В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, М.В. Колдаева, Е.А. Петржик // Кристаллография, 2003, т.48, с.826.
97. V.I. Alshits, E.V. Darinskaya, M.V. Koldaeva, E.A. Petrzhik // in Dislocations in Solids, ed. by J. P. Hirth, Elsevier, Amsterdam, 2008, Ch.14, p.333.
98. А.Л. Бучаченко // ЖЭТФ, 2007, т.132, с.673.
99. В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, О.Л. Казакова, Е.Ю. Михина, Е.А. Петржик // Изв. РАН, сер. Физ., 1993, т.57, с.2.
100. А.А. Скворцов, А.В. Каризин // ЖЭТФ, 2012, т.141, №1, с.96-100.
101. В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, М.В. Колдаева, Е.А. Петржик // ЖЭТФ, 2016, т.149, в.1, с.136.
102. В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, О.Л. Казакова // ФТТ, 1998, т.40, с.81.
103. Р.Б. Моргунов, А.Л. Бучаченко // ЖЭТФ, 2009, т.136, в.3(9), с.505-515.
104. Г.И. Дистлер, В.М. Каневский, В.В. Москвин, С.Н. Постников, Л.А. Рябинин, В.П. Сидоров, Г.Д. Шнырев // Доклады АН СССР, 1983, т.268, с.594.
105. С.Т. Кишкин, А.А. Клыпин // Доклады АН СССР, 1973, т.211, с.325.
106. В.М. Каневский, Г.И. Дистлер, А.Е. Смирнов, Ю.М. Герасимов, Е.И. Кортукова, А.А. Урусовская, Е.С. Горюнов // Известия АН СССР. Сер. физ., 1984, т.48, с.2408.

107. С.А. Дембовский, С.П. Вихров, В.Н. Ампилогов, Е.А. Чечеткина // ЖТФ, 1985, т.11, с.1267.
108. В.М. Каневский, А.А. Пурцхванидзе // Вопросы оборонной техники, научн.-техн. Сб. Сер. II, 1993, т.1–2, с.8.
109. В.П. Власов, Ф.А. Зайтов, В.М. Каневский, А.А. Пурцхванидзе, Г.М. Шалыпина // ФТТ, 1992, т.43, в.10, с.3264.
110. В.Н. Давыдов, И.И. Фефелова, Е.А. Лоскутова // Известия АН СССР. Неорган. Материалы, 1987, т.23, с.1438.
111. А.К. Сойка, И.О. Сологуб, В.Г. Шепелевич, П.А. Сивцова // ФТТ, 2015, т.57, в.10, с.1947-1949.
112. Ю.А. Осипьян, Ю.И. Головин, Д.В. Лопатин, Р.Б. Моргунов, Р.К. Николаев, С.З. Шмурак // Письма в ЖЭТФ, 1999, т.69, в.2, с.110-113.
113. В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, В.А. Морозов, В.М. Кац, А.А. Лукин // ФТТ, 2013, т.55, в.11, с.2176-2182.
114. М.Н. Левин, Г.В. Семенова, Т.П. Сушкова, Э.А. Долгополова, В.В. Постников // Письма в ЖТФ, 2002, т.28, в.19, с.50-55.
115. В.А. Макара, М.А. Васильев, Л.П. Стебленко, О.В. Коплак, А.Н. Курилюк, Ю.Л. Кобзарь, С.Н. Науменко // ФТП, 2008, Тт.42, в. 9, в.1061-1064.
116. Л.Б. Зуев // «Физика электропластичности щелочно-галоидных кристаллов» Новосибирск: Наука, 1990.
117. Р.Б. Моргунов // УФН, 2004, т.174, с.131.
118. Е.В. Даринская, М.В. Колдаева // Письма в ЖЭТФ, 1999, т.70, с.226.
119. В.И. Альшиц, Е.В. Даринская // Письма в ЖЭТФ, 1999, т.70, с.749.
120. E.V. Darinskaja, E.A. Petrzhik, S.A. Erofeeva // J. Phys.Condens. Matter, 2002, V.14, p.883.
121. Е.А. Петржик, Е.В. Даринская, С.А. Ерофеева, М.Р. Рухман // ФТТ, 2003, т.45, с.254.
122. Р.Б. Моргунов, А.А. Баскаков // ФТТ, 2001, т.43, с.1632.
123. А.Л. Бучаченко // ЖЭТФ, 2006, т.129, с.909.

124. А.Л. Бучаченко, «Спиновая химия» // Изд-во МГУ: Москва, 2002.
125. А.Л. Бучаченко // ЖЭТФ, 2007, т.132, с.827.
126. M. Molotskii, V. Fleurov // J. Phys. Chem. B, 2000, V.104, p.3812.
127. А.Л. Бучаченко // ЖЭТФ, 2009, т.136, с.505.
128. M.I. Molotskii, V. Fleurov // Phys. Rev. Lett., 1997, V.78, p.2779.
129. С.А. Флерова, Н.Н. Крайник, Н.П. Боцьва, С.А. Попов // Письма в ЖТФ, 2003, т.29, с.45.
130. J.C. Lashley, M.F. Hundley, B. Mihaila et al. //Appl. Phys. Lett., 2007, V.90, p.052910.
131. Е.Д. Якушкин // Письма в ЖЭТФ, 2014, т.99, с.483.
132. G. Fonthala, L. Tirado-Mejía, J.I. Mariñ-Hurtado, H. Ariza-Caldero'n, J.G. Mendoza-Alvarez // Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2000, V.61, p.579.
133. С.С. Горелик, М.Я. Дашевский // Материаловедение полупроводников и диэлектриков, М.: Металлургия, 1988.
134. E.J.M. Kendall // Phys. Letters, 1961, V.8, p.237.
135. Л.С. Палатник, В.К. Сорокин, В.Н. Мариничева // Известия АН СССР. Сер. неорган. матер., 1974, т.10, с.413.
136. O. Osamu // World Scientific Publishing Company, 2007, p.538.
137. Yu. M. Ivanov // Russian Journal of Inorganic Chemistry, 2014, V.59, p.1705.
138. Ю.М. Иванов, Н.В. Дмитриева, А.В. Ванюков // Известия АН СССР, Неорганические материалы, 1972, т.8, с.1396.
139. А.В. Гребенник, О.Л. Ещенко, О.М. Межуев, А.В. Вишняков, Ю.М. Иванов // Тез. докл. III Всесоюз. н.-т. конф. «Материаловедение халькогенидных полупроводников», Черновцы, 2, 1991, 164.
140. В.А. Лейбов, Ю.М. Иванов, А.В. Ванюков. // Электрон. техника, Сер. Материалы, 1984, т.195, с.28.

141. J. H. Greenberg // *J. Crystal Growth*, 1996. V.161, p.1.
142. А.С. Абызов, В.М. Ажажа, Л.Н. Давыдов, Г.П. Ковтун, В.Е. Кутний, А.В. Рыбка // *Техн. и констр. в электронной аппаратуре*, 2004, т.3, с.3.
143. О.А. Федяева // *ФТП*, 2012, т.46, с.1121.
144. И.М. Прохорец // *Радиоэлектроника и информатика*, 2007, т.4, с.24-30.
145. Ю.В. Клевков, С.А. Колосов, С.А. Медведев, А.Ф. Плотников // *ФТП*, 2001, т.35, с.1192-1196.
146. Ю.В. Шалдин, Ю.М. Иванов, И. Вархульска // *Физика и техника полупроводников*, 2004, т.38, №2, с.172 -178.
147. Yu. V. Shaldin // *Inorganic Materials*, 2001, V.37, №6, p.560–563.
148. Ю.В. Шалдин, И. Вархульска, М.Х. Рабаданов, В.К. Комарь // *Физика и техника полупроводников*, 2004, т.38, в.3, с.300.
149. Д.В. Корбутяк, С.В. Мельничук, Е.В. Корбут, М.М. Борисюк. Теллурид кадмия: примесно-дефектные состояния и детекторные свойства // Киев, Иван Федоров, 2000.
150. S. Wei, S.B. Zhang // *Phys. Rev. B*, 2002, V.66, p.155211
151. О.А. Матвеев, Е.Н. Аркадьева, Л.А. Гончаров // *ДАН СССР*, 1975, т.221, с.325.
152. .W. Iseler, J.A. Kafalas, A.J. Strauss, H.F. Macmillan, R.H. Rube // *Sol. St. Commun.*, 1972, V.10, p.619.
153. K. Zanio // «*In semiconductors and semimetals 13*», Academic Press, 1978, p.4.
154. P. Hoschl, R. Grill, J. Franc, P. Moravec, E. Belas // *Mater. Sci. Eng. B*, 1993, V.16, p.215.
155. Н.В. Агринская, Е.Н. Аркадьева, О.А. Матвеев // *ФТП*, 1970, т.4, с.412.
156. N.V. Agrinskaya, E.N. Arkadeva // *Nucl.Instr. and Meth. A*, 1989, V.283, p.260.

157. В.В. УШАКОВ, Ю.В. КЛЕВКОВ // ФТП, 2003, т.37, в.11, с.1298.
158. D.Z. Losee, R.P. Khosla, D.K. Ranadive, F.T.J. Smith // Sol. St. Commun., 1973, V.13, p.819.
159. D.V. Korbutyak, A.P. Lotsko, N.D. Vakhnyak, L.A. Demchyna, R.V. Konakova, V.V. Milenin, R.A. Red'ko // Semiconductors, 2011, V.45, №9, pp. 1133-1139.
160. R.A. Red'ko, S.I. Budzulyak, D.V. Korbutyak, A.P. Lotsko, N.D. Vakhnyak, L.A. Demchyna, S.M. Kalytchuk, R.V. Konakova, V.V. Milenin, Yu.V. Bykov, S.V. Egorov, A.G. Ereemeev // Semiconductors, 2015, V.49, №7, pp. 895-898.
161. R. Legros, Y. Marfaing, R. Triboulet // J. Phys. Chem. Sol., 1978, V.39, p.179.
162. R. Zielinska, A. Krol, W. Nazarewicz // J. Phys. C, 1984, V.17, p.5209.
163. K. Lischka, G. Brunthaler, W. Jantsch // Journal of Crystal Growth, 1985, V.72, p.355.
164. M. K. Udo, M. Villeret, I. Miotkowski, A. J. Mayur, A. K. Ramdas, S. Rodriguez // Physical Review B, 1992, V.46, №12, p.7459.
165. A. J. Szadkowski // J. Phys.: Condens. Matter, 1990, V.2, p.9853.
166. B. Segall, D.T.F. Marple // in Physics and Chemistry of II-VI Compounds, M. Aven and J. S. Prener, eds. (North-Holland, Amsterdam, 1967), Chap. 7, pp. 317-381.
167. W.C. Oliver, G.M. Pharr // J. Mater. Res. 1992. V. 7. P. 1564.
168. E.V. Darinskaya, E.A. Petrzhik, Yu.M. Ivanov, S.A. Erofeeva, M.R. Raikhman // Phys. stat. sol. (c), 2005, V.6, p.1873-1877.
169. Ю.И. ГОЛОВИН // ФТТ, 2008, т.50, в.12, с.2113.