

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Казаков Алексей Сергеевич

**Неравновесный транспорт в структурах на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ при
фотовозбуждении в терагерцовом спектральном диапазоне**

Специальность 1.3.11 (01.04.10) – «Физика полупроводников»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре общей физики и физики конденсированного состояния
физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

- Научный руководитель** – **Галеева Александра Викторовна**, кандидат физико-математических наук
- Официальные оппоненты** – **Манцевич Владимир Николаевич**, доктор физико-математических наук, доцент кафедры физики полупроводников и криоэлектроники Физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова
- Васильевский Иван Сергеевич**, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры физики конденсированных сред Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»
- Федоров Георгий Евгеньевич**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики МФТИ

Защита диссертации состоится 16 декабря 2021 г. в 18.00 на заседании диссертационного совета МГУ.01.18 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 8, криогенный корпус, конференц-зал.

E-mail: perov@magn.ru

Диссертация находится на хранении в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27). С информацией о регистрации участия в защите и с диссертацией в электронном виде можно ознакомиться на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/403054009/>

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

Т.Б. Шапаева

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Повышенный интерес к материалам на основе HgTe в последнее время связан главным образом с интенсивным развитием физики топологических изоляторов. Квантовые ямы HgTe толщиной более 6.3 нм принято относить к классу 2D топологических изоляторов, а напряженные 3D слои $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с составами $x < 0.16$ – к 3D топологическим изоляторам. Формирование топологически нетривиальных фаз обусловлено сильным спин-орбитальным взаимодействием. Возникающие при этом на краю (в 2D системах) или на поверхности (в 3D-системах) проводящие состояния обладают рядом уникальных свойств. Энергетический спектр топологических состояний представляет собой дираковский конус, а носители заряда в таких состояниях обладают нулевой эффективной массой. Рассеяние назад таких носителей, ввиду сильного спин-орбитального взаимодействия и, как следствие, жесткой связи между направлениями их спина и квазиимпульса, запрещено. Это обуславливает возможность формирования спин-поляризованных токов, протекающих без диссипации. Возможности управления спиновой подсистемой в топологических фазах привлекательны для прикладных разработок в области спинтроники [1-3].

Актуальность исследования твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ в области составов $x > 0.16$, отвечающих тривиальной фазе, продиктована в первую очередь их практическим применением в инфракрасной (ИК) оптоэлектронике [4-6]. В последние годы активно ведется работа по расширению спектрального диапазона оптоэлектронных устройств в длинноволновую область спектра. Это обуславливает важность изучения фотоэлектрических свойств материалов на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ в терагерцовом (ТГц) диапазоне.

Следует отметить, что изучение фотоэлектрических явлений, индуцированных терагерцовым излучением, способствует развитию новых оптоэлектронных методов детектирования поверхностных состояний в топологических материалах. Одним из основных подходов к изучению топологических состояний является фотоэлектронная спектроскопия с угловым разрешением (ARPES). Однако, предоставляя информацию о законе дисперсии поверхностных носителей, эта методика не позволяет выделить особенности транспортных свойств, связанных с формированием топологической фазы. В этой связи необходимо привлечение других экспериментальных подходов, позволяющих выявить вклад топологических состояний в транспортные процессы [7].

Цели и задачи работы

Исследования, проведенные в данной работе, нацелены на выявление особенностей электронного транспорта, связанных с формированием топологической фазы, в структурах на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с инверсным энергетическим спектром в условиях терагерцового фотовозбуждения.

Объектами исследования являются структуры на основе твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии в ИФП РАН (Новосибирск). Метод молекулярно-лучевой эпитаксии позволяет получать образцы с низкими концентрациями свободных носителей в объеме, что выгодно отличает топологическую фазу $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ от

большинства других 3D топологических изоляторов. Низкие фоновые концентрации обуславливают высокую фоточувствительность соединений на основе HgTe в ИК и ТГц спектральном диапазоне.

Задачи включали в себя:

- Определение транспортных характеристик структур на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, как с прямым, так и инверсным энергетическим спектром в температурном диапазоне от 4.2 К до 300 К в магнитных полях до 4 Тл;
- Изучение терагерцовой фотопроводимости в указанных структурах в магнитных полях до 4 Тл при температуре 4.2 К;
- Определение вкладов элементов структур в регистрируемый фотоотклик;
- Исследование нелокального терагерцового фотоотклика в указанных структурах;

Научная новизна и практическая значимость работы

В структурах с активным 3D слоем $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с инверсным спектром обнаружена асимметрия положительной терагерцовой фотопроводимости во внешнем магнитном поле. Эффект асимметрии обуславливают процессы с участием неравновесных носителей на границе топологической и тривиальной фаз структуры.

Впервые в рамках исследования 3D топологических фаз был применен оптоэлектронный метод терагерцового зондирования в сочетании с нелокальной геометрией измерений. В эпитаксиальных слоях $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ обнаружен нелокальный фотоотклик и продемонстрирована киральность фотоиндуцированных токов.

Практическая значимость работы заключается в получении дополнительной информации о фотоэлектрических свойствах структур на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, которая может быть полезна при решении прикладных задач ИК и ТГц оптоэлектроники.

Апробация результатов

Результаты, полученные в ходе данной работы, были доложены на следующих российских и международных конференциях: XXII Международный симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника» (12-15 марта 2018, Нижний Новгород, Россия); 34th International Conference on the Physics of Semiconductors (28 июля - 3 августа 2018, Монпелье, Франция); 43rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW THz-2018) (9-14 сентября 2018, Нагойя, Япония); 7th Russia-Japan-USA-Europe Symposium on Fundamental and Applied Problems of Terahertz Devices and Technologies (17-21 сентября 2018, Варшава, Польша); “Frontiers of 21st Century Physics and Ioffe Institute” (29 октября - 1 ноября 2018, Санкт-Петербург, Россия); XXIII Международный симпозиум «Нанофизика и Наноэлектроника» (11-14 марта 2019, Нижний Новгород, Россия); Российская конференция по актуальным вопросам полупроводниковой фотоэлектроники (Фотоника-2019) (27-31 мая 2019, Новосибирск, Россия); 8th Russia-Japan-USA-Europe Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies (8-11 июля 2019, Нижний Новгород, Россия); 44th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW THz-

2019) (1-6 сентября 2019, Париж, Франция); XIV Российская конференция по физике полупроводников (9-13 сентября 2019 г., Новосибирск, Россия); XXIV международный симпозиум "Нанопизика и нанозлектроника" (10-13 марта 2020, Нижний Новгород, Россия); 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (8-13 ноября 2020, Буффало, США); XXIII Уральская международная зимняя школа по физике полупроводников (UIWSPS-2020), (17-22 февраля 2020, Екатеринбург-Алапаевск, Россия); Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications – TERA 2020 (24-26 августа 2020, Томск, Россия); II Международная конференция «Физика конденсированных состояний» (31 мая – 4 июня 2021, Черноголовка, Россия); 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, (29 августа - 3 сентября 2021, Ченгду (Сычуань), Китай).

Положения, выносимые на защиту

1. Терагерцовая фотопроводимость в структурах на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с прямым спектром ($x > 0.16$) отрицательна и связана с разогревом носителей заряда. В топологической фазе исследуемых структур ($x < 0.16$) фотопроводимость положительна и обусловлена сочетанием вкладов объемных носителей заряда и неравновесных процессов в области гетерограниц.
2. Зависимость терагерцовой фотопроводимости от магнитного поля B в структурах на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с инверсным спектром асимметрична при $B < \sim 0.5$ Тл. Асимметрия фотоотклика в магнитном поле обусловлена процессами с участием неравновесных носителей заряда в области топологического гетероперехода.
3. Оптоэлектронный метод исследования неравновесного транспорта, сочетающий терагерцовое зондирование и нелокальную геометрию измерения, является эффективным подходом для изучения электронного транспорта в топологических фазах на основе HgTe .
4. В структурах на основе топологической фазы $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ в магнитном поле в условиях терагерцового фотовозбуждения регистрируется нелокальный фотоотклик. Определяющую роль в формировании нелокального отклика играют неравновесные процессы с участием электронных состояний на границе топологической и тривиальной фаз структуры.

Обоснованность и достоверность результатов

Экспериментальные исследования, описанные в работе, проводились с использованием современного, предварительно откалиброванного оборудования. Хорошая воспроизводимость полученных данных для различных серий образцов обеспечивает достоверность результатов работы. Многократное представление и обсуждение работы как на международных, так и на российских конференциях обуславливают обоснованность сформулированных выводов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Работа содержит 60 рисунков, 3 таблицы и 13 уравнений. Объем работы составляет 124 страницы. Список цитируемой литературы содержит 94 наименования.

Личный вклад автора в диссертационную работу

Исследования, включенные в настоящую работу, проводились автором в период 2017-2021 гг. на кафедре Общей физики и физики конденсированного состояния Физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Представленные в работе экспериментальные данные по исследованию электронного транспорта в структурах на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ как в равновесных условиях, так и в условиях терагерцового фотозвуждения, были получены автором лично. Подготовка исследуемых образцов к измерениям методом оптической безмасковой фотолитографии также проводилась лично автором. Автор проводил расчеты, анализ и систематизацию экспериментальных результатов, участвовал в подготовке материалов к публикациям.

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации были опубликованы 6 статей в рецензируемых печатных изданиях, которые индексируются в базах данных Web of Science и Scopus [A1-A6].

Краткое содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность выбранной темы, определены цели и задачи работы, сформулирована научная новизна и практическая значимость проведенных исследований. Приведены сведения об апробации результатов и личном вкладе автора в диссертационную работу.

В **Главе 1** приведен обзор актуального состояния исследований по тематике работы. Рассмотрены основные свойства зонного спектра бинарного соединения HgTe и твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, охарактеризована модификация энергетического спектра в условиях внешних воздействий (температуры, магнитного поля). Перечислены основные классы топологических материалов, обсуждаются особенности энергетического спектра топологических изоляторов, представлены сведения об электронном транспорте в таких материалах.

HgTe является бесщелевым полупроводником, зоне проводимости и валентной зоне в котором отвечают касающиеся в точке Γ электронная подзона и подзона тяжелых дырок. Инверсное расположение энергетических термов, приводящее к отсутствию щели в спектре, в теллуриде ртути достигается ввиду определяющего вклада релятивистских поправок, в том числе спин-орбитального взаимодействия, в гамильтониан системы.

Замещение Hg более легким элементом – Cd – приводит к уменьшению вклада релятивистских поправок. Зонная структура твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ изучена достаточно полно [8, 9]. Так, в области составов $x < 0.16$ сохраняются бесщелевое состояние и инверсия энергетического спектра. В составах $x > 0.16$ реализуется прямой порядок

энергетических термов, положительная запрещенная зона E_g увеличивается с ростом x , достигая величины $E_g = \sim 1.6$ эВ при $x = 1$.

Описанный переход от инверсного энергетического спектра к прямому порядку зон принято рассматривать как топологический фазовый переход. Так, увеличение содержания Cd x сопровождается переходом из топологической фазы (при $x < 0.16$) в тривиальное состояние (при $x > 0.16$). Топологический изолятор характеризуется наличием щели в спектре объемных состояний и с необходимостью возникающими на его краю или поверхности проводящими состояниями, носители заряда в которых описываются линейным дираковским законом дисперсии. Такие состояния являются «топологически защищенными», то есть устойчивыми по отношению к поверхностным дефектам.

Развитию представлений о топологических изоляторах в значительной мере способствовало открытие квантового спинового эффекта Холла, впервые наблюдаемого в пленках HgTe толщиной более $\sim 6,5$ нм [10]. Состояние квантового спинового эффекта Холла сопровождается возникновением поверхностных (в 3D случае) или краевых (в 2D) каналов бездиссипативного электронного транспорта спин-поляризованных носителей. Электронный транспорт посредством таких состояний оказывается нелокальным [11]. Наличие таких состояний на поверхности 3D монокристаллов и напряженных пленок HgTe подтверждено с помощью ARPES [12, 13]. Транспортными методами удалось зарегистрировать признаки формирования двумерной электронной подсистемы на поверхности 3D пленок HgTe и $Hg_{1-x}Cd_xTe$ с инверсным энергетическим спектром [13-15].

Регистрация описанных электронных явлений стала возможной благодаря развитию методов молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) [16]. Эта методика позволяет синтезировать пленки $Hg_{1-x}Cd_xTe$ с низкой концентрацией собственных дефектов. Низкие концентрации объемных носителей способствуют применению методов оптоэлектронного зондирования, предполагающих измерение отклика, обусловленного неравновесными носителями.

Следует отметить большой интерес к изучению транспортных и фотоэлектрических явлений в эпитаксиальных структурах на основе $Hg_{1-x}Cd_xTe$, в том числе в условиях терагерцового фотовозбуждения [17-19]. Вместе с тем, вопрос о том, в какой мере формирование топологических состояний влияет на неравновесный электронный транспорт в $Hg_{1-x}Cd_xTe$ с инверсным энергетическим спектром ($x < 0.16$), остается открытым.

В **Главе 2** представлено описание использованных в работе экспериментальных подходов и установок, приведен перечень исследованных структур.

Исследуемые в работе образцы были синтезированы в ИФП СО РАН методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Образцы синтезировались на подложке полуизолирующего GaAs в кристаллографической ориентации [013] с широкозонными буферными слоями CdTe и ZnTe (рис. 1). Рабочий слой структуры представлял из себя твердый раствор $Hg_{1-x}Cd_xTe$, $0.12 < x < 0.18$. Толщина рабочего слоя составляла от 0.2 мкм до 6 мкм.

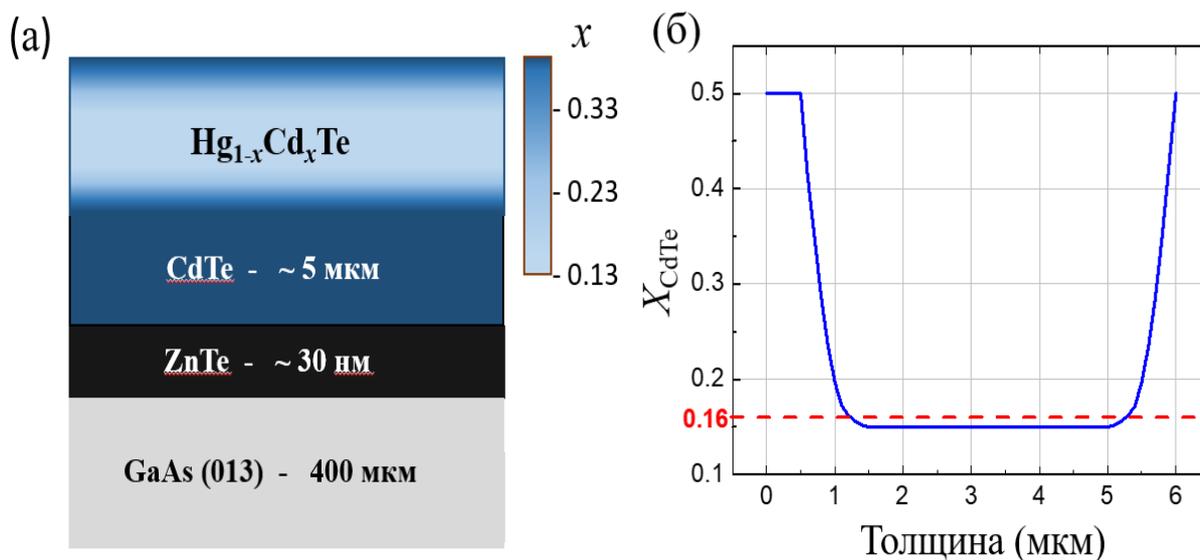


Рис. 1. (а) – Схематичное изображение последовательности слоев гетероструктуры с указанием толщины буферных слоев и подложки; (б) – типичный профиль распределения состава $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ по толщине рабочего слоя.

Подготовка образцов к фотоэлектрическим измерениям осуществлялась на базе ЦКП ФИАН методом безмасочной фотолитографии с последующим химическим травлением. Характерные линейные размеры изготовленных образцов – мостиков Холла и Н-профилей – составляли ~3 мм. Последние предназначались для проведения измерений в нелокальной конфигурации.

Транспортные характеристики образцов изучались в широком температурном диапазоне от 4.2 К до 300 К в магнитных полях до 4 Тл с помощью автоматизированных измерительных комплексов. Измерения проводились с использованием токовых и потенциальных контактов.

Исследование фотопроводимости было произведено на базе оборудования Терагерцового центра Университета Регенсбурга (Германия). Фотовозбуждение осуществлялось посредством высокоинтенсивного газового лазера. Используемые в данной работе частоты $f = 3.3, 2.02, 1.07$ и 0.6 ТГц соответствуют длинам волн 90, 148, 280 и 496 μm . Длительность лазерного импульса составляла порядка 100 нс. Максимальная мощность падающего излучения на образец достигала ~10 кВт.

Измерения фотопроводимости осуществлялись при температуре $T = 4.2$ К в условиях приложения магнитного поля величиной до 4 Тл в геометрии Фарадея. Измерения осуществлялись по четырех-контактной схеме. Учет фотовольтаических эффектов проводился с помощью усреднения результатов, полученных для противоположных полярностей напряжения смещения.

В **Главе 3** представлены результаты изучения транспортных свойств и терагерцовой фотопроводимости в исследованных структурах.

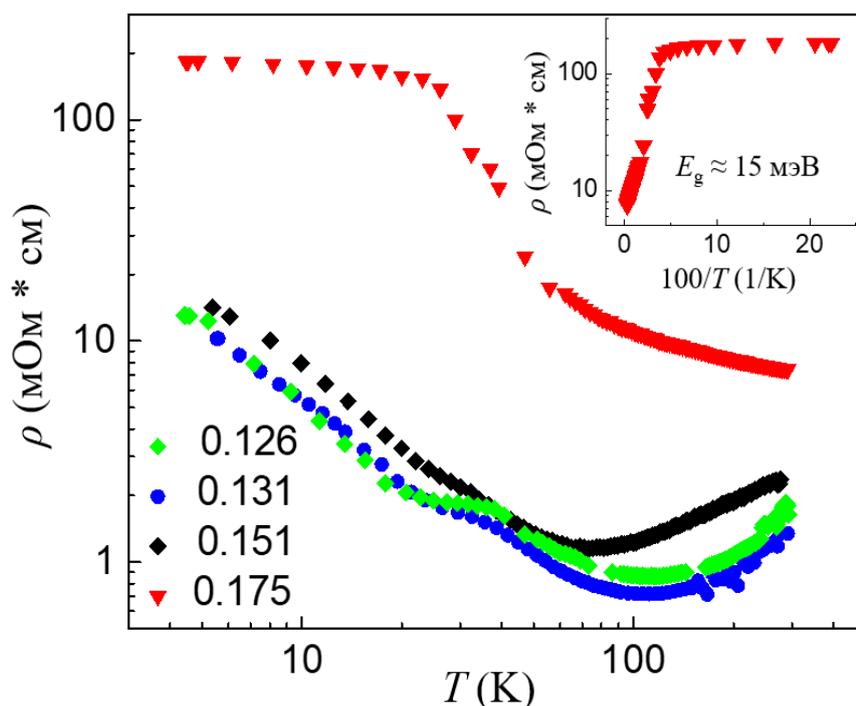


Рис. 2. Температурная зависимость удельного сопротивления ρ в образцах $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с различными составами x . На вставке представлена зависимость ρ от обратной температуры $100/T$ для образца с составом $x = 0.175$.

Температурные зависимости удельного сопротивления в образцах с инверсным энергетическим спектром содержат участки монотонного спада (в области низких температур) и монотонного роста (в области высоких температур). Минимум при $T \sim 80$ К соответствует точке инверсии энергетических зон (рис. 2). Температурные зависимости сопротивления образцов с прямым спектром характеризуются наличием продолжительного активационного участка при $T > \sim 20$ К. Рассчитанные значения энергии активации отвечают величине запрещенной зоны ~ 15 мэВ.

Все исследуемые образцы обладали n -типом проводимости. Концентрации носителей заряда при $T = 4.2$ К составляли $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Типичные значения подвижностей при $T \sim 4.2$ К, оцененные в рамках простейшей модели с одним типом носителей заряда, достигали $\sim 10^6 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Терагерцовая фотопроводимость зарегистрирована во всех исследованных структурах. При этом не наблюдается красной границы эффекта при уменьшении энергии кванта падающего излучения вплоть до 2,5 мэВ. Кинетика фотопроводимости может быть описана как суперпозиция быстрого отклика, следующего непосредственно за профилем лазерного импульса, и задержанного вклада, которому отвечают времена релаксации, существенно превышающие длительность лазерного импульса (рис.3).

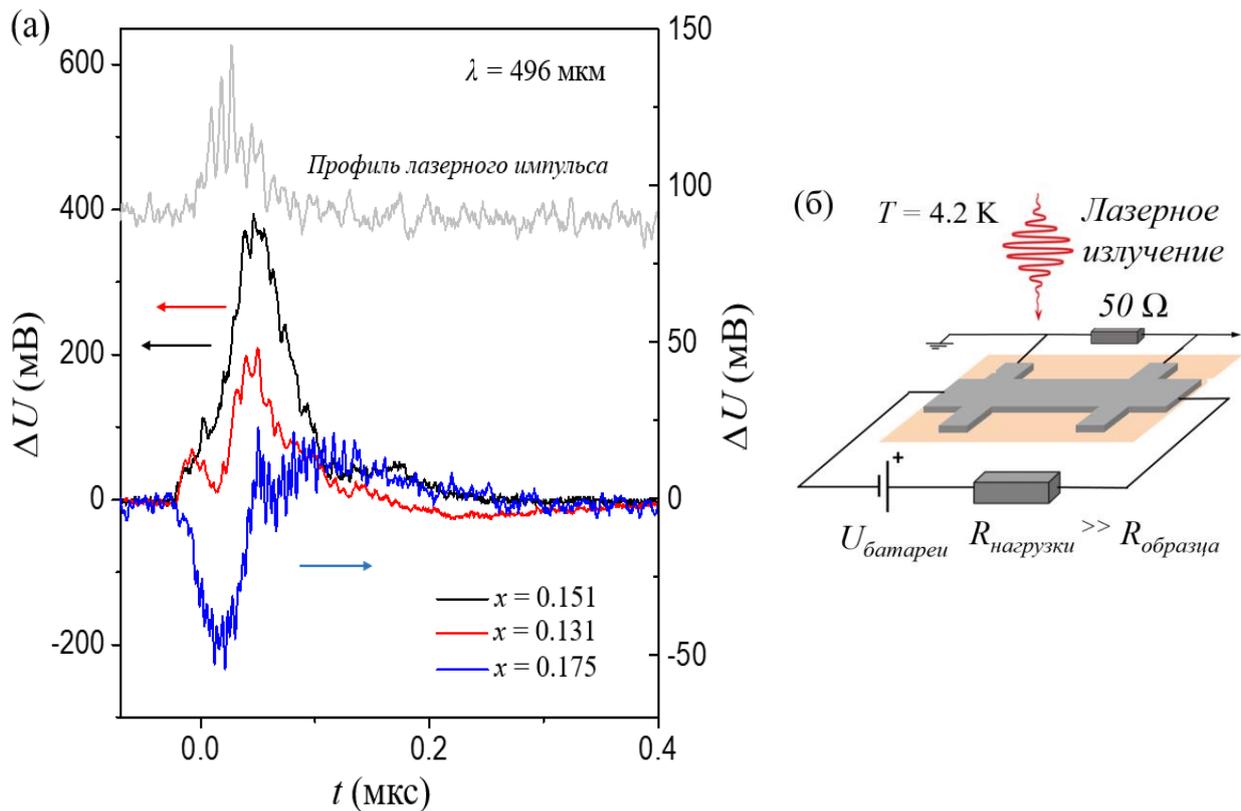


Рис. 3. (а) – Кинетики фотоотклика в образцах $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с составами $x = 0.131, 0.151$ и 0.175 , измеренные в условиях фотовозбуждения на длине волны 496 мкм . (б) – Схема подключения образца к измерительной цепи комплекса по исследованию терагерцовой фотопроводимости.

Важно, что «быстрая» компонента терагерцовой фотопроводимости меняет знак при переходе через точку инверсии энергетического спектра. В образцах на основе твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с прямым спектром ($x > 0.16$) фотопроводимость отрицательна, а в образцах с инверсным порядком энергетических термов ($x < 0.16$) – положительна. Положительная фотопроводимость регистрируется даже в условиях, когда энергия Ферми, определенная в рамках двухзонного приближения Кейна, превышает энергию возбуждающего кванта. При этом, как показал анализ мощностных зависимостей фотоотклика, амплитуда положительной фотопроводимости в образцах с инверсным энергетическим спектром определяется плотностью потока квантов падающего излучения. Зависимости аналогичного типа, как правило, наблюдаются в условиях фотогенерации неравновесных носителей. Принимая во внимание особенности зонной диаграммы, связанные с наличием варизонных слоев в области гетерограниц $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{буфер}$ и $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{покровный слой}$, можно ожидать практически беспороговую реализацию процесса фотогенерации. При удалении от области гетеропереходов вглубь активного слоя расстояние между уровнем Ферми и дном зоны проводимости уменьшается, так что в некотором объеме активного слоя уровень Ферми может оказаться расположенным непосредственно вблизи дна зоны проводимости, обеспечивая отсутствие красной границы эффекта.

Отрицательная фотопроводимость, наблюдаемая в образцах с прямым расположением энергетических термов, по всей видимости, обусловлена поглощением излучения на

свободных носителях заряда. Процессы генерации и разогрева носителей могут сосуществовать.

Необходимо иметь в виду, что на формирование положительного фотоотклика в образцах с инверсным спектром могут влиять неравновесные процессы на гетерограницах между рабочим слоем и широкозонными буферным и покровным слоями структуры. В частности, вклад в формирование положительной фотопроводимости могут вносить топологические состояния, с необходимостью возникающие на границе раздела топологической и тривиальной фаз. Такие состояния весьма чувствительны к магнитному полю. В этой связи существенный интерес представляет влияние магнитного поля на терагерцовую фотопроводимость. Соответствующие результаты исследований представлены в главе 4.

В условиях приложения внешнего магнитного поля кинетика терагерцового фотоотклика в структурах на основе топологической фазы $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ усложняется, отклик становится знакопеременным. При этом положительная компонента наблюдается только в области относительно слабых магнитных полей ($B < \sim 1$ Тл) (см. рис. 4).

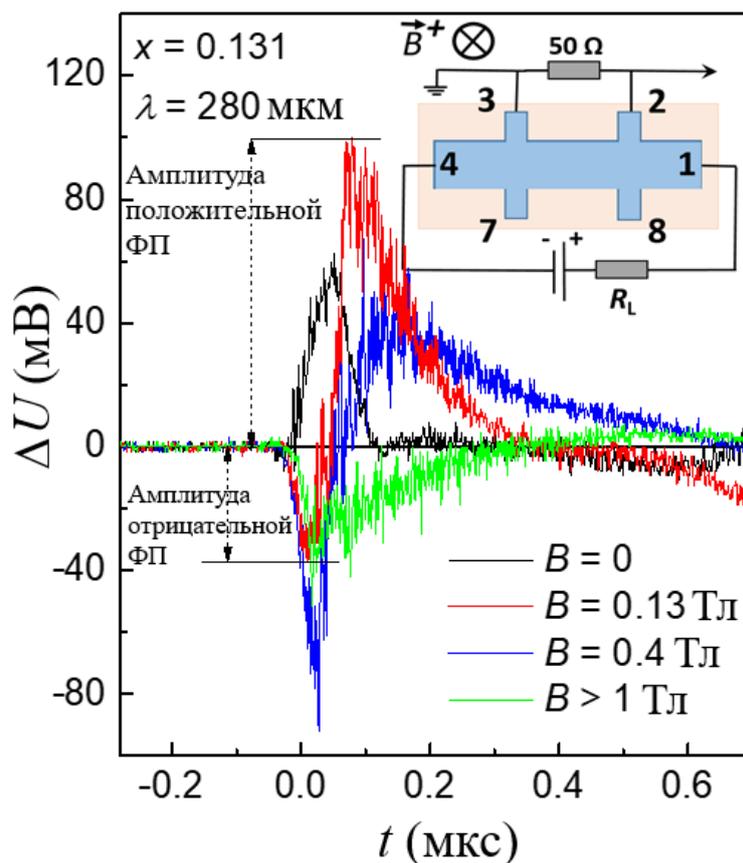


Рис. 4. Кинетики фотоотклика в образце $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с составом $x = 0.131$, измеренные в условиях приложения внешнего магнитного поля различной величины. На вставке приведена геометрия измерений.

Наиболее важным экспериментальным результатом является то, что во всех исследованных образцах с инверсным энергетическим спектром ($x < 0.16$) положительная

компонента терагерцовой фотопроводимости асимметрична в магнитном поле. В частности, при фиксированном направлении магнитного поля положительная компонента фотоотклика наблюдается только на одной из сторон образца, в то время как при измерении с пары контактов, расположенной на противоположной стороне, регистрируется отрицательный сигнал. При инверсии направления вектора индукции магнитного поля меняется и сторона образца, на которой регистрируется положительная компонента фотопроводимости (рис. 4).

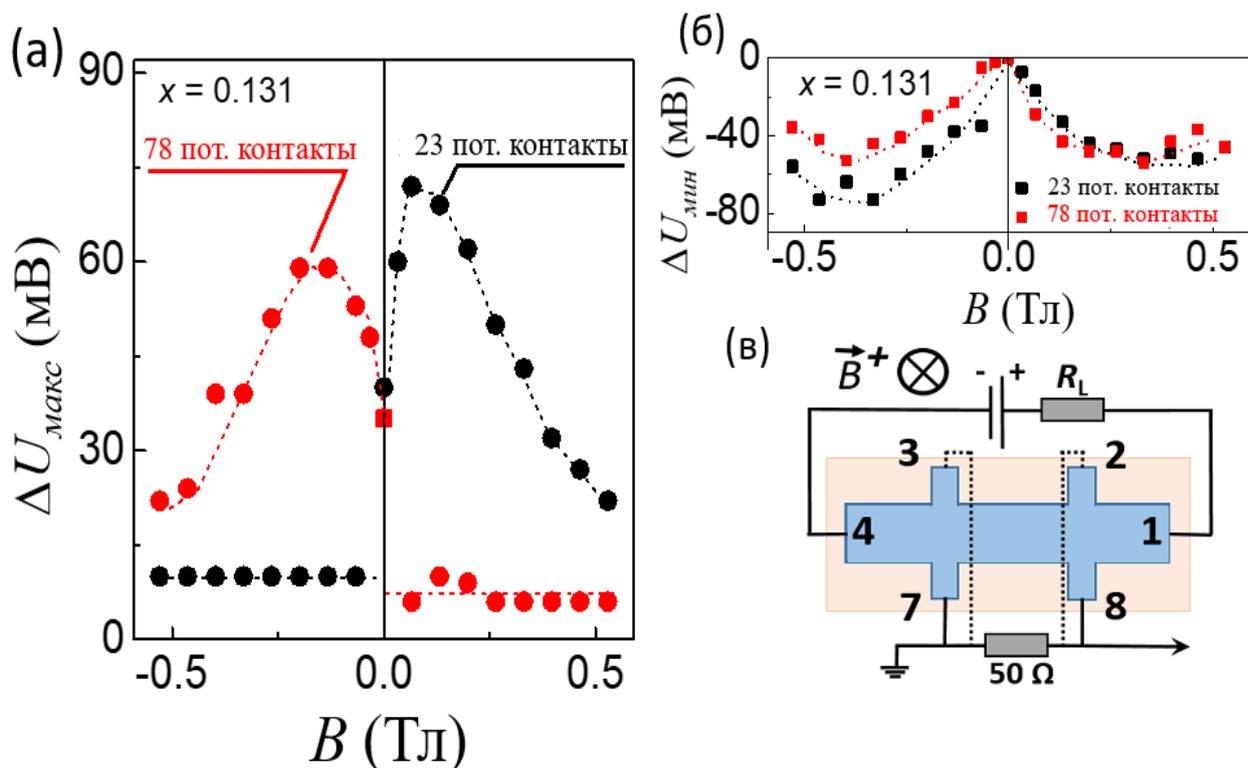


Рис. 4. Магнитополевые зависимости амплитуд положительной (а) и отрицательной (б) компонент терагерцового фотоотклика в образце на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с составом $x = 0.151$. Измерения проводились с различных пар потенциальных контактов – 2-3 (черный), 7-8 (красный) в условиях фотовозбуждения с длиной волны $\lambda = 280$ мкм; (в) - Геометрия измерений.

Магнитополевая зависимость амплитуды асимметричной компоненты терагерцового фотоотклика в структурах с инверсным спектром является немонотонной (рис. 4 (а)). В малых полях наблюдается рост амплитуды вплоть до $B \sim 0.1$ Тл, сменяющийся после достижения максимума последовательным снижением амплитуды вплоть до полного подавления в магнитных полях $B > 1$ Тл. Отрицательная компонента фотопроводимости в топологической фазе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ симметрична в магнитном поле (рис. 4 (б)).

Необходимо отметить, что наблюдаемая асимметрия фотопроводимости в магнитном поле не обусловлена ни возможной неоднородностью электрооптических свойств образцов, ни отклонением конфигурации эксперимента от идеальной геометрии Фарадея. Об этом свидетельствуют результаты серии измерений, выполненных в условиях варьирования пространственной ориентации образца.

В структурах на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с прямым порядком энергетических зон фотопроводимость отрицательна и является четной функцией магнитного поля. Регистрируемый фотоотклик также не зависит от выбора стороны образца, на которой производятся измерения.

Таким образом, терагерцовая фотопроводимость в магнитном поле в структурах на основе топологической и тривиальной фаз $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ имеет существенные различия. Определенное сходство ограничивается наличием отрицательного фотоотклика, по всей видимости, обусловленного процессами разогрева электронного газа в объеме активного слоя структуры. Положительный терагерцовый фотоотклик в образцах с инверсным спектром может быть представлен как суперпозиция четной и нечетной по магнитному полю компонент. В соответствии с экспериментом индуцированные токи, отвечающие четной и нечетной компонентам фотопроводимости, складываются на одной стороне образца и компенсируют друг друга на другой. Четная в магнитном поле фотопроводимость в таком случае отвечает транспорту носителей по объему активного элемента структуры. Нечетное слагаемое ассоциировано с возбуждением фототоков, направления которых на противоположных сторонах холловского мостика оказываются противоположными. Можно предположить, что индуцирование таких токов обусловлено присутствием специфических делокализованных состояний на границе активного слоя структуры. Предложенная качественная модель, таким образом, поднимает вопрос о вкладах элементов структуры в терагерцовый фотоотклик. В этой связи были проведены исследования терагерцовой фотопроводимости в образцах с варьируемой толщиной активного слоя.

Уменьшение толщины рабочего слоя структур на основе топологической фазы $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ приводит к снижению амплитуды положительной компоненты фотоотклика. В образцах с толщиной рабочего слоя меньше 1 мкм асимметричная в магнитном поле компонента фотопроводимости вовсе не наблюдается. При этом стравливание покровного слоя толщиной ~50 нм приводит к резкому росту амплитуды положительной компоненты фотоотклика.

Подавление положительного фотоотклика с уменьшением толщины активного слоя указывает на то, что наблюдаемая фотопроводимость вызвана неравновесными процессами с участием носителей в объеме активного слоя структуры. Вместе с тем, значительный рост амплитуды асимметричного фотоотклика, зарегистрированный после удаления тонкого покровного слоя свидетельствует о существенном вкладе интерфейса топологическая пленка – тривиальный буфер (покровный слой). Таким образом, на основании имеющихся экспериментальных данных можно предполагать сосуществование вкладов объема активного слоя и гетеропереходов в терагерцовую фотопроводимость в структурах на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с инверсным спектром.

Дополнительным аргументом в пользу наличия вклада от границы топологической фазы с тривиальным буфером служит обнаружение в структурах с инверсным порядком зон нелокального отклика, исследованию которого посвящена **глава 5**.

Нелокальная конфигурация измерений терагерцовой фотопроводимости подразумевает пространственное разнесение токовых и потенциальных контактов на образце,

что позволяет варьировать вклад объемных носителей заряда в наблюдаемые явления (рис. 5 (б)) [11].

В образцах на основе топологической фазы $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ наблюдается нелокальный фотоотклик при всех использованных в работе частотах возбуждающего излучения. При этом выраженной зависимости особенностей зарегистрированного отклика от частоты излучения не наблюдается. В отсутствие магнитного поля фотоотклик пренебрежимо мал. Включение магнитного поля приводит к существенному увеличению регистрируемого сигнала. Величина наблюдаемого отклика слабо зависит от расстояния между токовыми и потенциальными контактами на образце (см. рис.5 (б)) и регистрируется в том числе при измерениях с использованием потенциальных контактов, в значительной степени удаленных от области локализации тока в объеме (рис. 5). В то же время, разность потенциалов, измеренная в отсутствие фотовозбуждения, снижается экспоненциально при удалении от области протекания объемного тока (вставка на рис. 5 (а)).

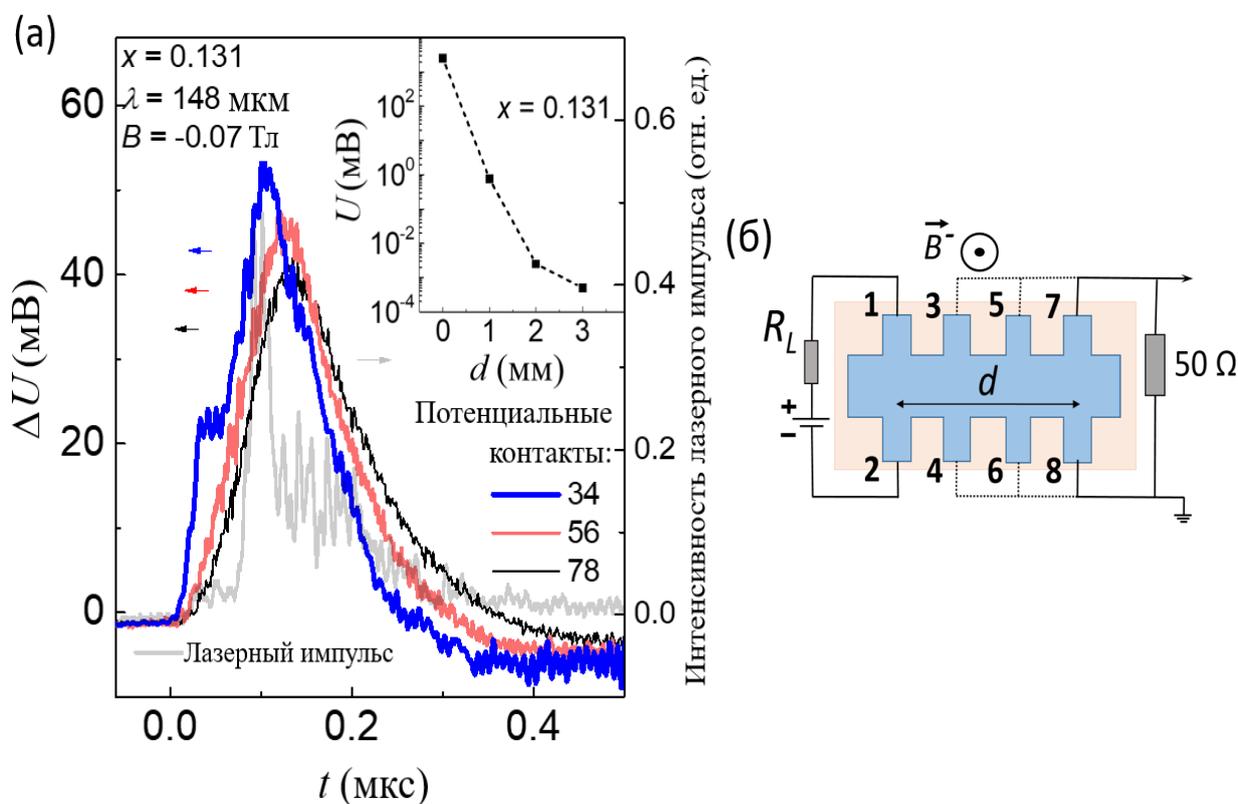


Рис. 5. (а) – Кинетики терагерцового фотоотклика в структуре на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с составом $x = 0.131$, измеренные в нелокальной геометрии эксперимента с ряда пар потенциальных контактов мостика Холла, в различной степени удаленных от линии протекания тока смещения. На вставке приведена зависимость падения напряжения, измеренного в отсутствие фотовозбуждающего излучения, от расстояния между токовыми и потенциальными контактами; (б) – Схема подключения образца к измерительной цепи.

Знак нелокального фотоотклика изменяется на противоположный как при изменении направления магнитного поля на противоположное, так и при смене знака напряжения смещения. Кроме того, знак нелокального фотоотклика оказывается различным в зависимости от того, с какой стороны относительно области протекания объемного тока расположены потенциальные контакты (рис. 6).

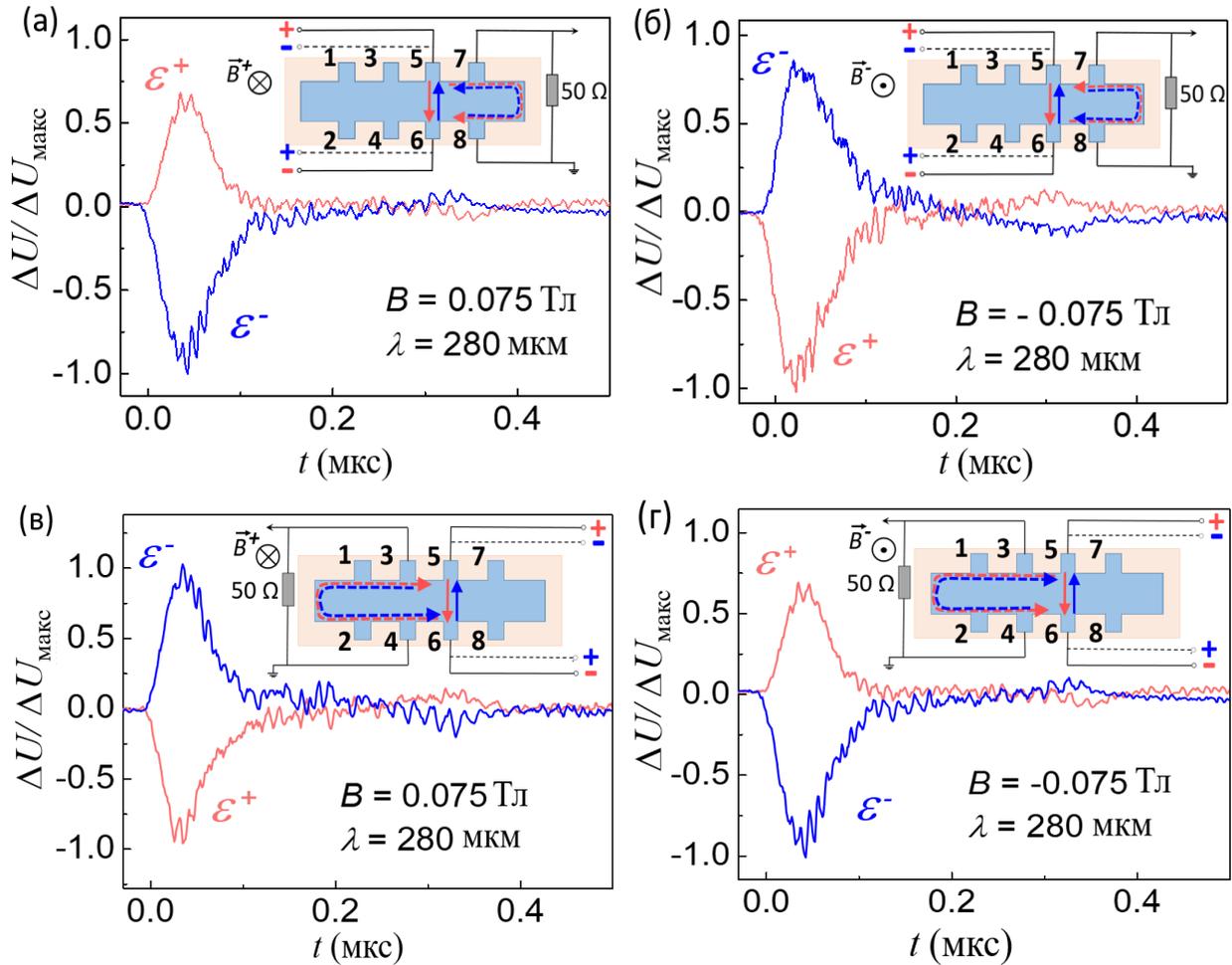


Рис. 6. Нормированные на максимальное значение кинетики терагерцового фотоотклика в твердом растворе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, $x = 0.131$ на длине волны $\lambda = 280$ мкм в нелокальной конфигурации эксперимента. Измерения были проведены в условиях приложения как положительного (а, в), так и отрицательного (б, г) магнитного поля, с двух различных пар потенциальных контактов – 7-8 (а, б) и 3-4 (в, г). Красные кривые соответствуют положительной полярности батареи, синие – отрицательной. Схематические изображения подключения образца к измерительной системе с указанием направлений токов смещения (сплошные стрелки) и фототоков (пунктирные стрелки) представлены на вставках.

Изменение поляризации лазерного излучения не влияет на регистрируемый отклик. В отсутствие напряжения смещения фотоотклик отсутствует, что позволяет исключить вклад фотовольтаических эффектов в наблюдаемые явления.

Важным экспериментальным фактом является то, что в структурах на основе тривиальной фазы $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ фотоотклик в нелокальной геометрии не наблюдается.

Представленные в настоящей главе экспериментальные данные свидетельствуют о том, что в условиях терагерцового фотовозбуждения в исследованных образцах с инверсным спектром формируются каналы электронного транспорта, не связанные с переносом заряда в объеме активного слоя структуры и обусловленные наличием делокализованных состояний. Особенности нелокального отклика, обнаруженные при измерениях с использованием различных пар потенциальных контактов, указывают на то, что возникающие фототоки

являются киральными, формируя замкнутый контур в плоскости пленки (рис. 6). Направление протекания фотоиндуцированных токов зависит от направлений магнитного и электрического полей.

Анализ результатов, представленных в главах 4 и 5 диссертации, дает основания полагать, что наблюдаемые нелокальный отклик и асимметричный фотоотклик в магнитном поле в структурах на основе топологической фазы $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ взаимосвязаны. Тенденции, выявленные при изучении терагерцовой фотопроводимости в образцах с различной толщиной активного слоя, позволяют полагать, что за проявление краевых каналов неравновесного транспорта отвечает граничная область между топологической пленкой и тривиальными фазами структуры. Необходимо отметить, что на взаимосвязь наблюдаемых явлений с топологическими проводящими состояниями указывает еще и то, что асимметрия фотопроводимости и нелокальный отклик отсутствуют в структурах на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с прямым энергетическим спектром.

Как правило, нелокальный баллистический транспорт по краевым состояниям реализуется в двумерных топологических изоляторах микронных размеров, в частности, в квантовых ямах HgTe [11]. Об обнаружении нелокального вклада в терагерцовую фотопроводимость в макроскопических структурах с квантовыми ямами HgTe при нарушении баллистического режима сообщалось в работе [20]. Формирование нелокального фотоотклика связывалось с присутствием краевых проводящих каналов и модулированного случайным полем примеси потенциального рельефа вблизи краев образца. Нельзя исключить, что модуляция потенциального рельефа в области гетерограниц может влиять на терагерцовую фотопроводимость в структурах на основе 3D слоев $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, изученных в настоящей работе.

Заключение

В работе изучен электронный транспорт в эпитаксиальных гетероструктурах на основе твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ в условиях терагерцового фотовозбуждения и проведено сравнение наблюдаемых явлений в образцах с прямым ($x > 0.16$) и инверсным ($x < 0.16$) спектром. Наиболее важным результатом представляется обнаружение нелокального вклада в терагерцовую фотопроводимость в образцах с инвертированным порядком энергетических зон. Анализ полученных экспериментальных данных позволил установить, что обнаруженные особенности фотоэлектрических явлений обусловлены наличием контакта областей с взаимно инвертированными энергетическими зонами.

Основные результаты и выводы работы:

1. Изучена фотопроводимость в структурах на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ как с инверсным энергетическим спектром ($x < 0.16$, топологическая фаза), так и с прямым порядком зон ($x > 0.16$, тривиальная фаза) в диапазоне частот 0.7 – 3.3 ТГц. Обнаружено, что при переходе через точку инверсии энергетических зон знак отклика изменяется с положительного при $x < 0.16$ на отрицательный при $x > 0.16$. Отрицательная фотопроводимость связана с разогревом носителей. Положительный фотоотклик может быть обусловлен сочетанием нескольких факторов, включающих межзонную генерацию в объеме и неравновесные процессы на гетерогранице.

2. Установлено, что для исследованных структур на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ не наблюдается красной границы фотопроводимости при снижении энергии кванта возбуждающего излучения вплоть до $E_{hv} = 2.5$ мэВ. Отсутствие красной границы эффекта положительной фотопроводимости в образцах с инверсным энергетическим спектром ($x < 0.16$) может быть связано как с межзонной генерацией в условиях искривления энергетических зон в окрестности гетеропереходов, так и с процессами, обусловленными наличием топологических состояний.

3. Обнаружена асимметрия терагерцового фотоотклика в магнитном поле в топологической фазе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x < 0.16$). Подавление положительной фотопроводимости и ее асимметрии в магнитном поле при уменьшении толщины активного слоя в образцах с инверсным спектром указывают на сосуществование вкладов в результирующий фотоотклик от объема активного слоя и областей гетероперехода. За симметричную компоненту отклика ответственно возбуждение носителей в объеме активного слоя. Наличие асимметричной компоненты фотопроводимости может быть обусловлено поведением носителей заряда в области топологического гетероперехода.

4. Предложен метод исследования неравновесного транспорта в 3D топологических изоляторах, сочетающий возможности терагерцового зондирования и нелокальной геометрии измерений. Эффективность подхода продемонстрирована на примере изучения фотопроводимости эпитаксиальных структур на основе топологической фазы $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$.

5. Обнаружено, что в структурах на основе топологической фазы $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ в магнитном поле наблюдается нелокальная фотопроводимость, обусловленная возникновением киральных фототоков. Направление протекания фотоиндуцированных токов зависит от направлений внешних магнитного и электрического полей. Принимая во внимание, что нелокальный отклик отсутствует в образцах с прямым энергетическим спектром, можно заключить, что существенный вклад в наблюдаемые явления вносят неравновесные процессы на границе топологической и тривиальной фаз.

Список публикаций автора

Статьи, цитируемые в WoS и Scopus

A1. Galeeva A.V., Artamkin A.I., Kazakov A.S., Danilov S.N., Dvoretzkiy S.A., Mikhailov N.N., Ryabova L.I., Khokhlov D.R. *et al.* Non-equilibrium electron transport induced by terahertz radiation in the topological and trivial phases of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. *Beilstein journal of nanotechnology*, **9**, 1035 (2018). DOI: [10.3762/bjnano.9.96](https://doi.org/10.3762/bjnano.9.96).

IF - 2.612

A2. Галеева А.В., Казаков А.С., Артамкин А.И., Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н., Банников М.И., Данилов С.Н., Рябова Л.И., Хохлов Д.Р. Особенности транспорта в топологической фазе $\text{Hg}_{0.87}\text{Cd}_{0.13}\text{Te}$ в условиях терагерцового фотовозбуждения. *Физика и техника полупроводников*, **54** (9), 873 (2020). DOI: [10.21883/FTP.2020.09.49824.16](https://doi.org/10.21883/FTP.2020.09.49824.16).

(Перевод) Galeeva A.V., Kazakov A.S., Artamkin A.I., Dvoretzkiy S.A., Mikhailov N.N., Bannikov M.I., Danilov S.N., Ryabova L.I., Khokhlov D.R. Transport Features in the

Topological Phase $\text{Hg}_{0.87}\text{Cd}_{0.13}\text{Te}$ under Terahertz Photoexcitation. *Semiconductors*, **54**, 1064 (2020). DOI: 10.1134/S1063782620090109.

IF - 0.674

A3. Galeeva A.V., Kazakov A.S., Artamkin A.I., Ryabova L.I., Dvoretzky S.A., Mikhailov N.N., Bannikov M.I., Danilov S.N., Khokhlov D.R. Apparent *PT*-symmetric terahertz photoconductivity in the topological phase of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ -based structures. *Scientific reports*, **10**, 2377 (2020). DOI: [10.1038/s41598-020-59280-0](https://doi.org/10.1038/s41598-020-59280-0). IF - 4.379

A4. Казаров А.С., Галеева А.В., Иконников А.В., Долженко Д.Е., Рябова Л.И., Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А., Банников М.И., Данилов С.Н., Хохлов Д.Р. Роли элементов гетероструктуры на основе топологической фазы $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ в эффекте *PT*-симметричной терагерцовой фотопроводимости. Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики, **113** (8), 548 (2021). DOI: [10.31857/S1234567821080103](https://doi.org/10.31857/S1234567821080103).

(Перевод) Kazakov, A. S., Galeeva, A. V., Ikonnikov, A. V., Dolzhenko, D. E., Ryabova, L. I., Mikhailov, N. N., Dvoretzky S.A., Bannikov M.I., Danilov S.N., Khokhlov D.R. Roles of Elements of a Heterostructure Based on the Topological Phase of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ in the Effect of *PT*-Symmetric Terahertz Photoconductivity. *JETP Letters*, **113** (8), 542 (2021). DOI: 10.1134/S002136402108004X

IF - 1.532

A5. Kazakov A.S., Galeeva A.V., Artamkin A.I., Ikonnikov A.V., Ryabova L.I., Dvoretzky S.A., Mikhailov N.N., Bannikov M.I., Danilov S.N., Khokhlov D.R. Non-local terahertz photoconductivity in the topological phase of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. *Scientific reports*, **11** (1), 1587 (2021). DOI: [10.1038/s41598-021-81099-6](https://doi.org/10.1038/s41598-021-81099-6).

IF - 4.379

A6. Kazakov A.S., Galeeva A.V., Artamkin A.I., Ikonnikov A.V., Ryabova L.I., Dvoretzky S.A., Mikhailov N.N., Bannikov M.I., Danilov S.N., Khokhlov D.R. Distinction between electron states formed at topological insulator interfaces with the trivial phase and vacuum. *Scientific reports*, **11** (11), 11638 (2021). DOI: [10.1038/s41598-021-91141-2](https://doi.org/10.1038/s41598-021-91141-2)

IF - 4.379

Прочие публикации

Результаты диссертационной работы опубликованы в сборниках тезисов как российских, так и зарубежных конференций. Ниже перечислены основные тезисы конференций (импакт фактор отсутствует).

A7. Kazakov A.S., Galeeva A.V., Artamkin A.I., Khokhlov D.R., Mikhailov N.N., Danilov S.N., Ryabova L.I., Dvoretzky S.A. Non-Threshold Photoconductivity in Trivial and

- Topological Phases of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ -Based Heterostructures. В сборнике тезисов *34th International Conference on the Physics of Semiconductors, Montpellier, France* (2018).
- A8. Галеева А.В., Артамкин А.И., Казаков А.С., Хохлов Д.Р., Дворецкий С.А., Данилов С.Н., Рябова Л.И., Михайлов Н.Н. Влияние магнитного поля на кинетику терагерцовой фотопроводимости в твердых растворах $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с прямым и инверсным спектром. В сборнике тезисов *XXII Международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника»*, Нижний Новгород, Россия, т. 2, 569 (2018).
- A9. Galeeva A.V., Kazakov A.S., Artamkin A.I., Khokhlov D.R., Mikhailov N.N., Danilov S.N., Ryabova L.I., Dvoretzkiy S.A. Nonsymmetric terahertz photoconductivity controlled by magnetic field direction in the topological phase of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ solid solutions. В сборнике тезисов *34th International Conference on the Physics of Semiconductors, Montpellier, France* (2018).
- A10. Galeeva A.V., Artamkin A.I., Kazakov A.S., Dvoretzkiy S.A., Mikhailov N.N., Danilov S.N., Ryabova L.I., Khokhlov D.R. *PT*-symmetric terahertz photoconductivity in the topological phase of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ semiconductors. В сборнике тезисов *9th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics, Chisinau, Moldova*, 328 (2018).
- A11. Galeeva A.V., Artamkin A.I., Kazakov A.S., Dvoretzkiy S.A., Mikhailov N.N., Danilov S.N., Ryabova L.I., Khokhlov D.R. Effect of Magnetic Field on Terahertz Photoconductivity in $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ -Based Structures. В сборнике тезисов *43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), Nagoya, Japan* 125 (2018).
DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2018.8509992
- A12. Kazakov A.S., Galeeva A.V., Artamkin A.I., Ryabova L.I., Dvoretzkiy S.A., Mikhailov N.N., Bannikov M.I., Danilov S.N., Ganichev S.D., Khokhlov D.R. *PT*-Symmetric Terahertz Photoconductivity in $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. В сборнике тезисов *44th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, Paris, France*, 527 (2019).
- A13. Галеева А.В., Казаков А.С., Артамкин А.И., Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н., Банников М.И., Данилов С.Н., Рябова Л.И., Хохлов Д.Р. Фотопроводимость и эффекты нарушения симметрии, индуцированные терагерцовым излучением и магнитным полем, в структурах на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. В сборнике тезисов *XIV Российской конференции по физике полупроводников, Новосибирск, Россия*, т. 2, 474 (2019).
- A14. Галеева А.В., Казаков А.С., Артамкин А.И., Рябова Л.И., Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н., Банников М.И., Данилов С.Н., Ганичев С.Д., Хохлов Д.Р. *PT*-симметрия терагерцовой фотопроводимости в структурах на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с инверсным

спектром. В сборнике тезисов *Российской конференции по актуальным вопросам полупроводниковой фотозлектроники (Фотоника-2019)*, Новосибирск, Россия, 79 (2019).

DOI: 10.34077/RCSP2019-79

A15. Казаков А.С., Галеева А.В., Артамкин А.И., Иконников А.В., Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н., Банников М.И., Данилов С.Н., Рябова Л.И., Хохлов Д.Р. Фотопроводимость в эпитаксиальных структурах на основе $Hg_{1-x}Cd_xTe$ с варьируемой толщиной активного слоя. В сборнике тезисов *XXIII Международного симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника»*, Нижний Новгород, Россия, 706 (2019).

A16. Galeeva A.V., Artamkin A.I., Kazakov A.S., Bannikov M.I., Ikonnikov A.V., Dvoretzkiy S.A., Mikhailov N.N., Danilov S.N., Ryabova L.I., Khokhlov D.R. Competition between Positive and Negative Terahertz Photoconductivity in Variable Thickness $Hg_{1-x}Cd_xTe$ Epitaxial Layers. В сборнике тезисов *44th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, Paris, France*, 1202 (2019).

DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2019.8873735

A17. Казаков А.С., Галеева А.В., Артамкин А.И., Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н., Банников М.И., Данилов С.Н., Рябова Л.И., Хохлов Д.Р. Фотоиндуцированный нелокальный отклик в эпитаксиальных пленках $Hg_{1-x}Cd_xTe$ с инверсным энергетическим спектром. В сборнике тезисов *XIV Российской конференции по физике полупроводников*, Новосибирск, Россия, т. 2, 495 (2019).

DOI: 10.34077/Semicond2019-495

A18. Kazakov A.S., Galeeva A.V., Artamkin A.I., Dvoretzkiy S.A., Mikhailov N.N., Bannikov M.I., Danilov S.N., Ryabova L.I., Khokhlov D.R. Nonlocal photoresponse in epitaxial $Hg_{1-x}Cd_xTe$ films with the inverted band structure. В сборнике тезисов *44th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, Paris, France*, 1228 (2019).

DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2019.8874381

A19. Казаков А.С., Галеева А.В., Артамкин А.И., Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н., Банников М.И., Данилов С.Н., Рябова Л.И., Хохлов Д.Р. Нелокальный фотоотклик в $Hg_{1-x}Cd_xTe$ с инверсным энергетическим спектром в терагерцовом спектральном диапазоне. В сборнике тезисов *XXIV Международного симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника»*, Нижний Новгород, Россия, т. 2, 601 (2020).

A20. Казаков А.С., Галеева А.В., Артамкин А.И., Иконников А.В., Рябова Л.И., Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А., Банников М.И., Данилов С.Н., Хохлов Д.Р. Киральная нелокальная терагерцовая фотопроводимость в гетероструктурах на основе

топологической фазы $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. В сборнике тезисов *Физика конденсированных состояний: сб. тезисов II Международной конференции, Черногловка, Россия*, 30 (2021).

DOI: 10.26201/ISSP.2020/FKS-2.265

Список цитируемой литературы

1. Hasan M. Z., Kane C. L. Colloquium: topological insulators. *Reviews of modern physics*, **82** (4), 3045 (2010).
2. Ando Y. Topological insulator materials. *Journal of the Physical Society of Japan*, **82** (10), 102001 (2013).
3. Gilbert M. J. Topological electronics. *Communications Physics*, **4** (1), 1-12 (2021).
4. Rogalski A. HgCdTe infrared detector material: history, status and outlook. *Reports on Progress in Physics*, **68** (10), 2267 (2005).
5. Kopytko M., Rogalski A. HgCdTe barrier infrared detectors. *Progress in Quantum Electronics*, **47**, 1 (2016).
6. Lee D. *et al.* High-operating temperature HgCdTe: A vision for the near future. *Journal of Electronic Materials*, **45** (9), 4587 (2016).
7. Culcer D. *et al.* Transport in two-dimensional topological materials: recent developments in experiment and theory. *2D Materials*, **7** (2), 022007 (2020).
8. Берченко Н. Н., Пашковский М. В. Теллурид ртути—полупроводник с нулевой запрещенной зоной. *Успехи физических наук*, **119** (6), 223 (1976).
9. Hansen G. L., Schmit J. L., Casselman T. N. Energy gap versus alloy composition and temperature in $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. *Journal of Applied Physics*, **53** (10), 7099 (1982).
10. König M. *et al.* Quantum spin Hall insulator state in HgTe quantum wells. *Science*, **318** (5851), 766 (2007).
11. Roth A. *et al.* Nonlocal transport in the quantum spin Hall state. *Science*, **325** (5938), 294 (2009).
12. Liu C. *et al.* Tunable spin helical Dirac quasiparticles on the surface of three-dimensional HgTe. *Physical Review B*, **92** (11), 115436 (2015).
13. Brüne C. *et al.* Quantum Hall effect from the topological surface states of strained bulk HgTe. *Physical Review Letters*, **106** (12), 126803 (2011).
14. Козлов Д. А. *et al.* Трехмерный топологический изолятор на основе напряженной пленки HgTe. *Физика низких температур*, **41** (2), 109 (2015).

15. Tomaka G. *et al.* Topological insulators based on the semi-metallic HgCdTe. *Opto-Electronics Review*, **25** (3), 188 (2017).
16. Varavin V. S. *et al.* Molecular beam epitaxy of high quality $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ films with control of the composition distribution. *Journal of crystal growth*, **159** (1), 1161 (1996).
17. Dantscher K. M. *et al.* Photogalvanic probing of helical edge channels in two-dimensional HgTe topological insulators. *Physical Review B*, **95** (20), 201103 (2017).
18. Hubmann S. *et al.* Symmetry breaking and circular photogalvanic effect in epitaxial $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ films. *Physical Review Materials*, **4** (4), 043607 (2020).
19. Otteneder M. *et al.* Terahertz magnetospectroscopy of cyclotron resonances from topological surface states in thick films of $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$. *Physica status solidi (b)*, **258** (1), 2000023 (2021).
20. Квон З. Д. и др. Терагерцовый электронный транспорт двумерного топологического изолятора в HgTe квантовой яме. *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*, **99** (5), 333 (2014).