

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭКОНОМИКИ»

Факультет физики
Базовая кафедра физики низких температур
Института физических проблем им. П.Л. Капицы РАН

Лукьянов Алексей Владимирович

«Экспериментальное исследование транспортных свойств
и терагерцового отклика в квантовых ямах HgTe.»

«ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
ПО ПРОГРАММЕ ПОДГОТОВКИ МАГИСТРАТУРЫ»

Выполнил:

студент 2 курса очной формы обучения
группы МФ3181,

направление подготовки 03.04.02 – Физика

Допущена к защите ГЭК
и проверена на объем заимствования:

Заведующий кафедрой

чл.-корр.РАН, г.н.с.
(ученая степень,ученое звание)

/А.И. Смирнов/
(подпись) (И.О. Фамилия)

Научный руководитель

к.ф.-м.н., с.н.с.
(ученая степень,ученое звание)

/В.В. Завьялов/
(подпись) (И.О. Фамилия)

«___» июня 2020 г.

Москва – 2020

Содержание

Аннотация.	3
Введение	4
1 Теория	6
2 Изготовление образца	10
2.1 Создание мезаструктуры	11
2.2 Нанесение диэлектрика	13
2.3 Нанесение затвора	15
2.4 Монтаж контактов	17
3 Транспортные свойства	17
3.1 Методика транспортных измерений	18
3.2 Температурная зависимость сопротивления	18
3.3 Эффект поля	19
3.4 Нелокальный транспорт	20
3.5 Эффект Холла	21
4 Терагерцовый отклик	23
4.1 Постановка задачи и ожидаемые результаты	23
4.2 Методика измерений	26
4.3 Экспериментальная установка	28
4.3.1 Газоразрядный лазер на парах H_2O	28
4.3.2 Фотоприёмник	32
4.3.3 Оптический криостат	32
4.3.4 Вставка для оптического криостата	34
5 Заключение	36
Список используемых источников	37
Приложение А Листинг программы	39

Аннотация

Целью работы было экспериментально проверить возможность управления спектром носителей в квантовых ямах на основе HgTe при помощи давления и температуры, и, в частности, переключения «топологического состояния», существенного для создания квантового «топологического транзистора». Экспериментально, такое переключение *in situ* можно наблюдать как по особенностям транспортных свойств образца, так и с помощью терагерцевой поляризационно-зависимой фото-ЭДС, и обе эти методики являлись предметом данного исследования.

На основе двумерного топологического изолятора (CdHgTe/HgTe/CdHgTe) нами была изготовлена мезоструктура, выполнено измерение её транспортных свойств, подтверждающих наличие, присущих 2D топологическому изолятору, краевых токов, вычислены некоторые характеристики носителей заряда. Была собрана и отлажена экспериментальная установка и подготовлен образец для наблюдения терагерцевого отклика.

The aim of the work was to verify experimentally the possibility of managing of the charge carriers spectrum in quantum wells based on HgTe with pressure and temperature, and particularly switching the “topological state” required for creating a quantum “topological transistor”. Experimentally, such *in situ* switching can be detected either studying features of transport properties of the sample or terahertz polarization-dependent photo-EMF. The both of these methods are the subject of this study.

We made a mesastructure based on a two-dimensional topological insulator (CdHgTe / HgTe / CdHgTe), did measuring of its transport properties confirming the presence of edge current inherent to the two-dimensional topological insulator, calculated some characteristics of charge carriers. Experimental equipment was assembled and debugged, and the sample was prepared for observing the terahertz response.

Введение

Относительно недавно было предсказано теоретически и доказано экспериментально существование нового класса веществ, названных топологическими изоляторами, потенциально имеющих применение в таких перспективных направлениях как спинтроника и квантовые компьютеры. Благодаря т.н. топологической защите носителей заряда от рассеяния, транзисторы, изготовленные на основе данного класса материалов, будут рассеивать меньше энергии в виде тепла, что позволит создавать вычислительные устройства большей мощности.

В данной работе проводилось экспериментальное изучение двумерной электронной системы $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{HgTe}/\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, -признанным и наиболее активно изучаемым представителем класса топологических изоляторов. Работа состоит из пяти разделов, в которых:

1. Перечислены основные теоретические положения, существенные для описания изучаемого объекта. Это, в частности, особенности зонной структуры кристалла $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, изменяющего в зависимости от параметра x свои свойства от полуметалла HgTe до прямозонного полупроводника CdTe с проходом через состояние топологического изолятора, зависимость проводимости несущего двумерную электронную систему слоя HgTe от его ширины и степени механического сжатия.
2. Изложены этапы технологического процесса, освоенные при изготовлении экспериментального образца $\text{Cd}_{0.7}\text{Hg}_{0.3}\text{Te}/\text{HgTe}/\text{Cd}_{0.7}\text{Hg}_{0.3}\text{Te}$, представляющего МДП-структуру, - литографии, нанесения диэлектрика и металлического электрода, монтажа контактов.
3. Приведены результаты проведенных измерений транспортных свойств образца. Определен температурный ход сопротивления в диапазоне 2.4-200К. Измерена зависимость проводимости HgTe -канала при гелиевых температурах в зависимости от потенциала затвора и зафиксирован проход через точку зарядовой нейтральности. Проведены измерения по наблюдению нелокального транспорта краевых 1D токов. Для определе-

ния концентрации и подвижности носителей заряда в слое были выполнены низкотемпературные Холловские измерения.

4. Обсуждена физическая модель специфического для двумерного топологического изолятора возбуждения краевых токов циркулярно поляризованным терагерцовым лазерным излучением. Описана подготовка соответствующего эксперимента, в рамках которой была освоена техника спектроскопии: съюстирован и запущен в работу лабораторный лазер на парах воды и охлаждаемый терагерцовый детектор; скомпонована вставка к оптическому дьюару, позволяющая подвергать образец одноосному сжатию (для возможности вывода образца из фазы топологического изолятора); проведена калибровка динамометра; собрана и отлажена измерительная схема; написана программа на языке программирования Python для управления приборами и регистрации измеренных данных.
5. Подведен краткий итог работы и отмечена необходимость ее продолжения, связанная с глобальными форс-мажорными обстоятельствами трех последних месяцев, не позволившими провести практически подготовленный эксперимент по наблюдению динамических и статических свойств «терагерцового отклика».

1 Теория

Особенностью исследуемой структуры является проявление квантового спинового эффекта Холла, обусловленное нетривиальной топологией квантовых состояний, которое является причиной существования необычных краевых эффектов. Эти краевые состояния проявляются в виде двух противоположно направленных токовых каналов с противоположно направленными спинами, расположенными на краях образца, как показано на рисунке 1, благодаря которым возможно наблюдение нелокального транспорта и терагерцового отклика.)

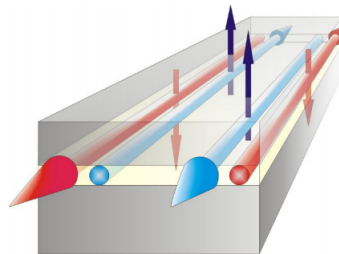


Рис. 1: Иллюстрация протекания спин-поляризованного тока в квантовой яме

Свойства теллурида ртути, в частности его энергетический спектр, определяются валентными электронами, то есть электронами 6s-оболочки у Hg и 5p-оболочки у Te. Поскольку атомы теллура и ртути являются довольно тяжёлыми, то значительный вклад вносят релятивистские поправки к гамильтониану изолированного атома.

Поправками к гамильтониану \hat{H}_0 будут дарвиновский член

$$\hat{H}_D = \frac{1}{8} \frac{\hbar^2}{m^2 c^2} \Delta U, \quad (1)$$

кинетическая поправка

$$\hat{H}_R = -\frac{1}{8} \frac{\hat{\mathbf{p}}^4}{m^3 c^2}, \quad (2)$$

и поправка, учитывающая спин-орбитальное взаимодействие

$$\hat{H}_{SO} = \frac{\hbar}{4m^2c^2} [\nabla, \hat{\mathbf{p}}]_{\alpha} \sigma_{\alpha}. \quad (3)$$

На рисунке 2 представлен последовательный учёт релятивистских поправок для HgTe и CdTe, откуда видно, что благодаря им достигается инверсия зон. [1]

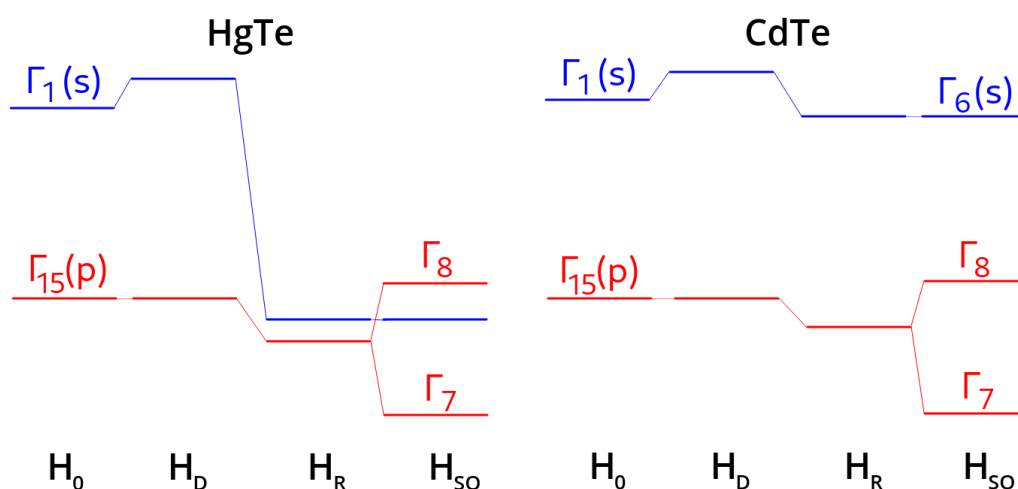


Рис. 2: Последовательный учёт релятивистских поправок

Таким образом с помощью модели, изложенной в [2, 3], в основе которой лежит численное самосогласованное решение уравнения Шрёдингера в приближении Хартри, можно найти энергетический спектр электронов в HgTe. Из результатов видно, что он зависит от ширины квантовой ямы, причём не только количественно, но и качественно.

Также энергетический спектр электронов в яме зависит от состава соседних слоёв $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$. На рисунке 3 представлен график зависимости ширины запрещённой зоны объёмного $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ от параметра x . При значениях $x > 0.1$ наблюдается инверсия зон, и только при значительной молярной доле ртути в соединении ($x < 0.1$) спектр становится неинвертированным. Наблюдается также слабая зависимость от температуры. В нашей работе

был использован образец с $x = 0.7$, таким образом, оказывающий влияние на спектр электронов в квантовой яме.

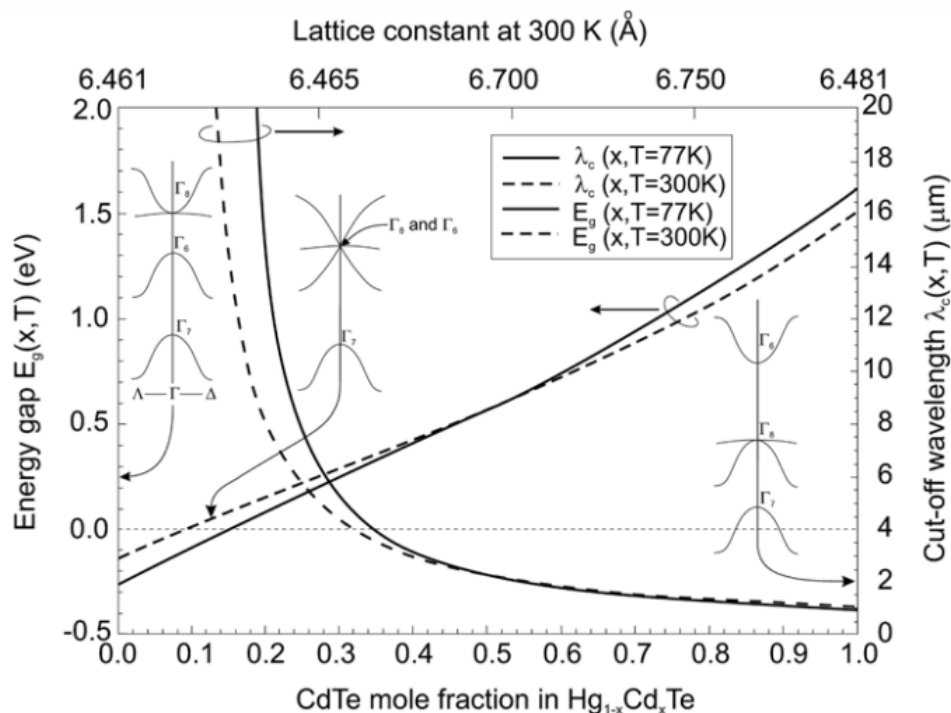


Рис. 3: Зависимость ширины запрещённой зоны объёмного $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ от параметра x (из работы [4]).

В двумерном случае, можно наблюдать зависимость уровней подзон HgTe , образованных в результате размерного квантования, от ширины квантовой ямы [4]. Из рисунка 4 видно, что при ширине ямы больше критической $d_k \approx 6.3$ нм спектр становится инвертированным. При меньшей ширине ямы соседние слои $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ будут оказывать большее влияние, и спектр станет неинвертированным, как у обычного полупроводника, а при большей $d_{sm} \approx 12$ нм станет проявляться полуметаллическая природа теллурида ртути. Таким образом при некоем промежуточном значении ширины спектр вблизи краёв образца становится Дираковским (рисунок 18). Этим и объясняется наличие краевых токов, о которых говорилось ранее.

Так как теллурид ртути в такой конфигурации всё ещё относительно хорошо проводит электрический ток, то для их детектирования необходимо подавить проводимость теллурида ртути. Для этого изготавливается МДП-

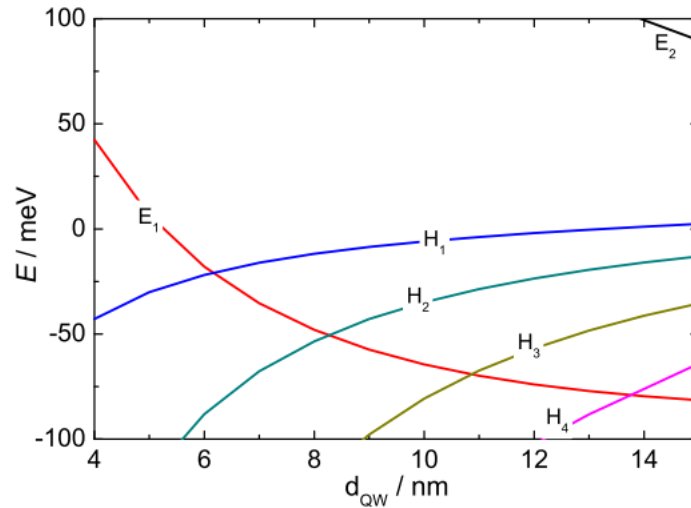


Рис. 4: Уровни подзон HgTe как функции ширины квантовой ямы

структура на основе этой квантовой ямы, которая позволяет управлять уровнем Ферми, а значит и концентрацией носителей заряда, изменяя напряжение на затворе.

Поскольку изначально структура имеет дырочный тип проводимости, то, при приложении положительного потенциала к затвору, происходит инжекция электронов в яму, их рекомбинация с дырками и как следствие, – увеличение сопротивления. При некотором напряжении на затворе концентрации электронов и дырок сравниваются, это напряжение называется точкой зарядовой нейтральности. Дальнейшее увеличение потенциала на затворе приведёт к уменьшению сопротивления канала за счёт роста концентрации электронов. Тогда уже структура будет иметь электронный тип проводимости.

При протекании тока между двумя контактами электрическое поле затухает и уже на относительно небольшом удалении поле исчезающе мало, но вблизи точки зарядовой нейтральности основной вклад в проводимость структуры дают краевые состояния, следовательно распределение тока изменяется таким образом, что на другой паре достаточно отстоящих контактов будет наблюдаться существенное падение напряжения. Это явление носит название нелокальный транспорт.

Ток в краевых каналах может образовываться не только непосредствен-

ным приложением электрического потенциала к контактам образца, но и с помощью облучения циркулярно поляризованным лазерным излучением. Энергия фотона в таком случае не должна превышать ширину запрещённой зоны, чтобы не возбуждать электроны по всему объёму, а только по краям образца (рисунок 18, см. обсуждение далее в разделе 4.1).

Ещё один вопрос, поднятый в работе – изучение влияния степени механического сжатия образца на существование краевых состояний. Согласно результатам статьи [5], существование топологической фазы возможно лишь в некотором диапазоне давлений и температур (рисунок 5). Таким образом, сжимая образец, можно "выключать" краевые состояния.

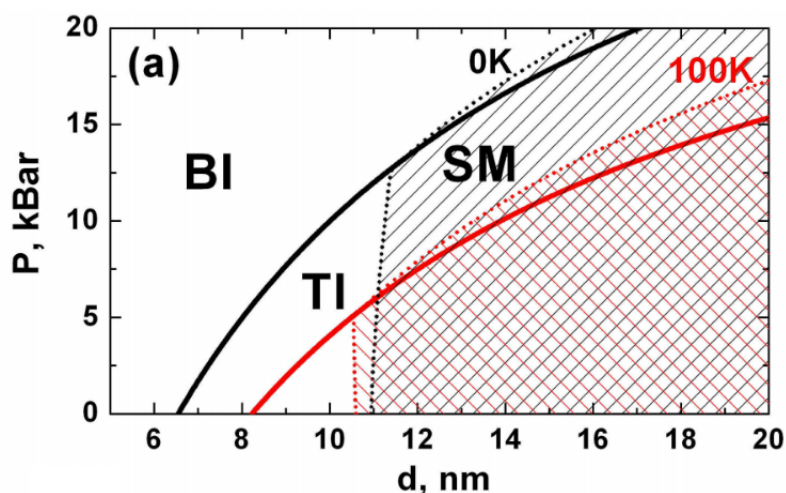


Рис. 5: Фазовая диаграмма в координатах давления и ширины ямы

2 Изготовление образца

Исходная заготовка для образца представляет собой гетероструктуру HgTe, поперечное сечение которой представлено на рисунке 6. Все слои структуры были нанесены на слабопроводящую подложку из арсенида галлия методом молекулярно лучевой эпитаксии в Институте физики полупроводников СО РАН.

Квантовая яма образована слоями HgTe и $Cd_xHg_{1-x}Te$, где $x = 0.7$. Слои ZnTe и CdTe предназначены для минимизации механических напряжений

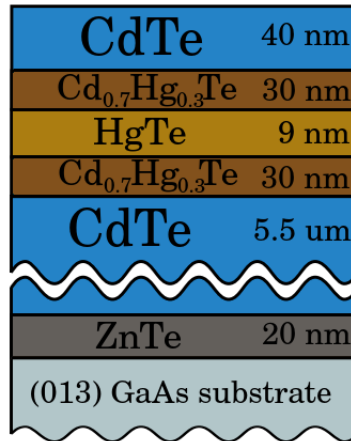


Рис. 6: Поперечное сечение гетероструктуры

основного слоя HgTe, который специально не легировался и имел *p*-тип проводимости.

Для создания требуемой нам мезоструктуры (холловского мостика) необходимо стравливание верхних слоёв вплоть до квантовой ямы включительно. Исходя из рисунка 1 глубина травления должна быть > 109 нанометров. Таким образом можно получить любую форму слоя HgTe.

2.1 Создание мезоструктуры

Для стравливания HgTe в нужных местах необходимо закрыть фоторезистом те области, которые не должны быть стравлены. Таким образом, процесс создания мезоструктуры включает в себя нанесение фоторезиста ФП-2506, экспонирования, проявления и травления. Для более равномерного покрытия фоторезистом образец проходит процедуру спининга в течение 1 минуты при скорости вращения 3000 об/мин. Затем он дубится 12 минут при температуре 60°C. Столь низкая температура обусловлена довольно низкой критической температурой образца, превышение которой приводит к диффузии соседних слоёв CdHgTe в HgTe и деградации квантовой ямы.

Для получения необходимой мезоструктуры в программе Layout Editor был спроектирован её дизайн (рисунок 7), впоследствии загруженный с помощью программы μ PG101 Exposure Wizard в лазерный литограф μ PG101

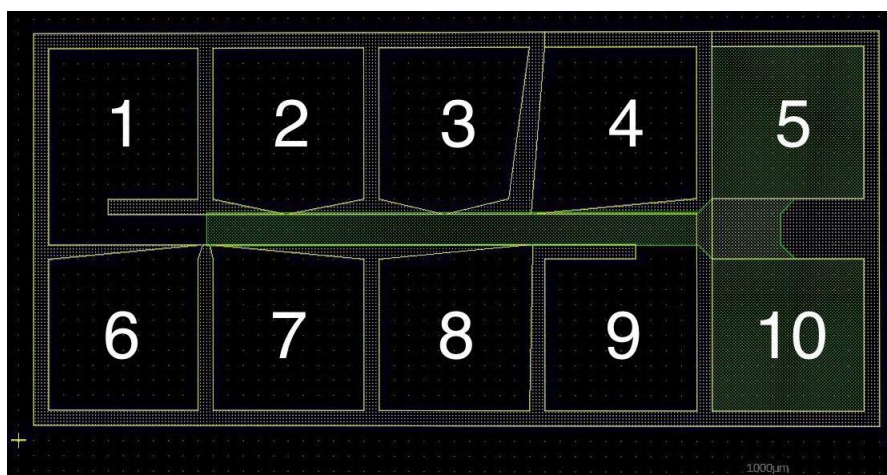


Рис. 7: Дизайн мезаструктуры. 1, 9 – токовые контакты, 5, 10 – затвор, остальные – потенциальные

для последующего экспонирования образца и проявления проявителем П-238-МФ.

Пропорции составляющих травителя были подобраны из соображений удобства травления. Время травления должно составлять 10-20 секунд для обеспечения более контролируемого процесса. Таким образом, на основе результатов статьи [1] был изготовлен травитель: $KI_{1g} : I_{0.025g} : HBr(40\%)_{14.15g} : H_2O_{9.6g}$. Следует отметить, что со временем концентрация HBr в растворе может уменьшаться ввиду его испарения, о чём свидетельствует изменение скорости травления и цвета раствора. Для контроля глубины травления использовался атомно-силовой микроскоп. На рисунках 8a и 8b изображён скан и профиль ступеньки, вытравленной на тестовом образце похожей структуры для определения скорости травления. Из рисунка 8b легко видеть, что глубина стравленного окна составляет ~ 900 нм. Таким образом была проведена оценка скорости травления, давшая возможность оценивать глубину травления мезы с необходимой точностью.

Глубина травления выбрана таким образом, чтобы с одной стороны исключить всякий нежелательный электрический контакт между различными областями структуры, а с другой – обеспечить качественное покрытие диэлектриком всего образца. Так как глубина залегания слоя теллурида ртути

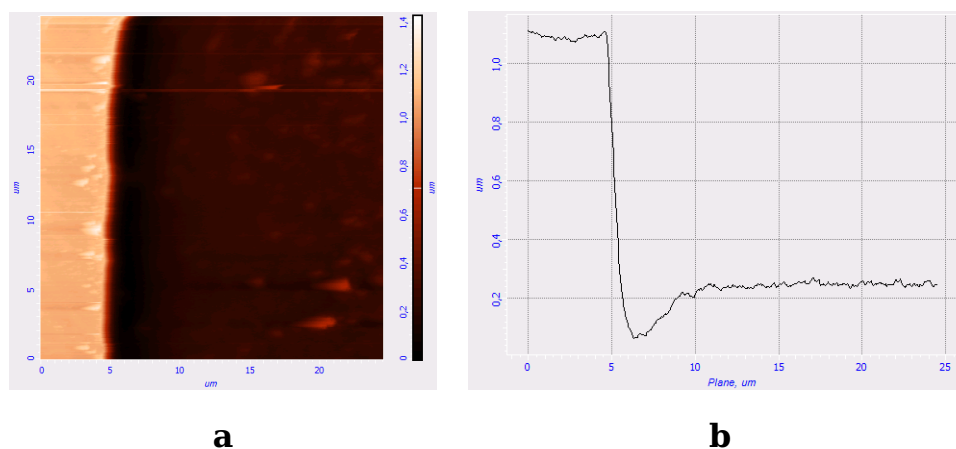


Рис. 8: Скан (а) и профиль (b) поверхности образца (время травления 30 с) равна 109 нм, глубина стравливания в 150-200 нм является оптимальной.

После травления было проведено последовательное промывание образца в ацетоне, изопропанолe и воде для полного удаления фоторезиста и остатков травителя.

2.2 Нанесение диэлектрика

Для управления зарядовой плотностью в изображенной на рисунке ?? ме- заструктуре, поверх нее был нанесен слой диэлектрика и металлическая пленка, образующие, таким образом МДП-структуру. В качестве диэлектрика был выбран парилен по ряду причин. Данное вещество имеет хорошую механическую и химическую устойчивость, обладает хорошими барьерными, а самое главное – диэлектрическими свойствами. Также парилен довольно прост в нанесении и способен образовывать довольно тонкие и равномерные плёнки, осаждаясь на различные поверхности. Принцип напыления основан на явлении вакуумной пиролитической полимеризации. Порошкообразный парилен (димер) возгоняется при температуре 100-120 °С, затем в большой печи при 700 °С происходит мономеризация и осаждение на поверхности образца в виде однородной полимерной плёнки. Таким образом, парилен полностью покрывает поверхность образца для исключения электрического контакта проводящего слоя HgTe с затвором.



Рис. 9: Установка для напыления парилена

Установка (рисунок 9) представляет собой большую и малую печь, стеклянную трубку и форвакуумный насос. Трубка вставляется в большую печь. С одной стороны трубки устанавливается ванночка с париленом и надевается малая печь, с другой – образцы. С помощью насоса в трубке создаётся вакуум, затем большая печь разогревается до температуры в 700 °С, а малая – до 100 °С. Таким образом происходит напыление парилена.

Толщину напыления диэлектрика можно измерять двумя способами. Первый заключается в визуальном определении цвета покрытия, который обусловлен интерференцией двух отражённых волн от поверхностей образца и напылённого парилена. Толщина диэлектрика будет равна половине разности хода этих двух волн, которая в свою очередь однозначно связана с длиной волны, на которую приходится максимум интенсивности, условием:

$$2d\sin(\theta) = n\lambda \quad (4)$$

Метод визуального определения толщины пленки парилена довольно простой и может быть использован, когда особая точность не нужна.

Второй метод основан на девиации резонансной частоты кварцевого ре-

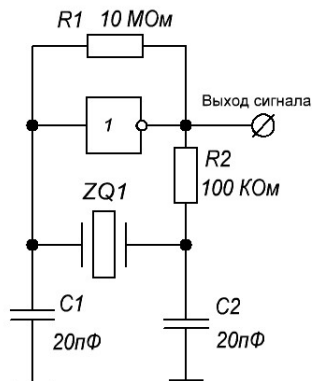


Рис. 10: Генератор Пирса

зонатора при напылении парилена на поверхность пьезоэлектрика. Для этого мы изготовили генератор Пирса (электрическая схема приведена на рисунке 10). Частота сигнала на выходе измерялась с помощью осциллографа, подключённого к компьютеру. Данные, полученные с осциллографа, обрабатывались на компьютере в реальном времени, что позволяло наблюдать текущую толщину и скорость напыления. Ранее была выявлена зависимость девиации частоты от толщины напылённого диэлектрика. Коэффициент пропорциональности составил 3 нм/кГц при резонансной частоте кварцевого резонатора $f_0 = 3.6864$ МГц

Стоит отметить, что первый метод в отличие от второго помогает выявить возможные неоднородности напыления. Различие в толщине напыления на разных участках образца видно по различному цвету структуры.

2.3 Нанесение затвора

Для электростатического управления квантовой ямой, над ней, поверх мезоструктуры, был нанесен тонкопленочный титановый затвор. Для того, чтобы затвор имел нужную форму, необходимо нанесение маски из фоторезиста, поэтому был повторно нанесён фоторезист, проведено экспонирование и проявление. Таким образом в фоторезисте было вскрыто окошко в форме затвора.

Нанесение металла осуществлялось методом электронно-лучевого напыления с помощью установки PLASSYS MEB550S (рисунок 11), принцип работы которой заключается в испарении наносимого металла из тигля, представляющего собой анод, бомбардируемый электронами.

На данный образец было напылено 35 нм титана. Этот металл обладает лучшей адгезией из доступных. Напыление металла меньшей толщины могло повлечь обрыв затвора при lift-off процессе или монтаже контактов.

После напыления металла для снятия фоторезиста можно использовать ацетон, как это было сделано в пункте 2.1. Но поскольку в данном случае фоторезист полностью покрыт металлом и доступ растворителя к фоторезисту затруднён, то был использован более оптимальный метод. Образец погружался в сосуд со снимателем позитивных фоторезистов СПР-01Ф, который в свою очередь подогревался на плите до 60 °С для ускорения реакции. В результате металл остался в области отмеченной на рисунке ?? зелёным цветом.

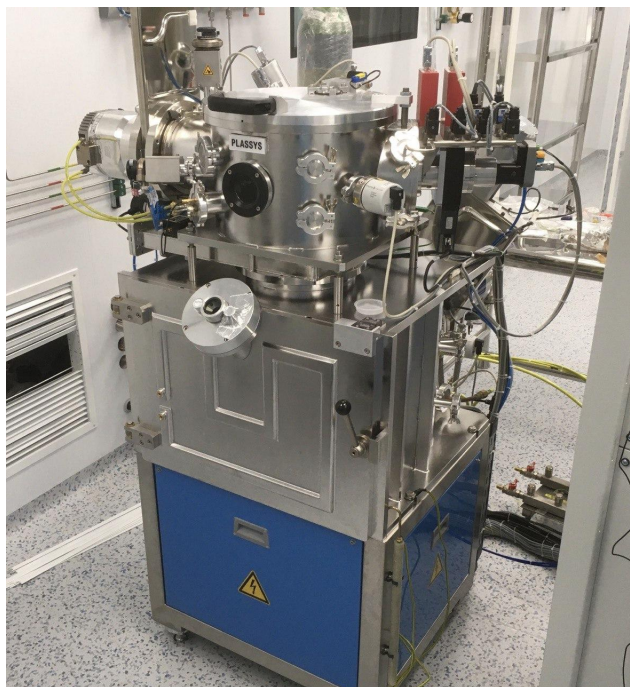


Рис. 11: Установка PLASSYS MEB550S

2.4 Монтаж контактов

Для создания электрического контакта с нужными участками структуры, место предполагаемого контакта аккуратно механически зачищается от парилена, после чего в него вжигается свинцово-индиевый припой с помощью паяльника. Вжигание должно производиться аккуратно и быстро, т.к., как уже было сказано ранее, при температурах выше 100 °С начинается активная деградация квантовой ямы. Затем к полученным контактам с помощью токопроводящего клея приклеиваются золотые провода, которые затем приклеиваются к контактам вставки (рисунок 12).



Рис. 12: Образец, смонтированный на вставке для работы с PPMS

3 Транспортные свойства

После изготовления образца и установки его на вставку для транспортных измерений, были проведены тестовые испытания для выявления возможных неточностей, допущенных при изготовлении образца: наличие выпрямляющих или высокоомных контактов, нежелательных соединений, нарушения целостности структуры и т.д. Далее, так как в задачу данной работы, как уже было сказано, входило изучение транспортных свойств изучаемой мезоструктуры, были проведены серии экспериментов по определению наличия эффекта поля, нелокального транспорта, а также эффекта Холла при раз-

личных значениях потенциала затвора. На основе полученных данных были произведены расчёты подвижности и концентрации носителей заряда, а также определена точка зарядовой нейтральности (напряжение на затворе, при котором концентрации электронов и дырок в квантовой яме равны).

3.1 Методика транспортных измерений

Образец был помещён в установку PPMS (Quantum Design Physical Property Measurement System), которая обеспечивала магнитное поле до 9 Т и температуру от 1.8 К до 400 К.

Измерения проводились с помощью Lock-In усилителя SR830 по четырёхточечной схеме. Ток пропусклся через канал образца и последовательно соединённый задающий резистор с сопротивлением $R=20$ МОм, существенно превышающем сопротивление канала. Таким образом, ввиду малости сопротивления структуры, можно считать, что ток определяется задающим резистором и равен 5 нА. Напряжения на интересующих участках образца измерялось с помощью Lock-In'ов.

Два 16 битных АЦП одного из Lock-In'ов использовались для измерения сигналов от PPMS, пропорциональных температуре и величине магнитной индукции. С помощью 16 битного ЦАП Lock-In'а устанавливалось и свипировалось в диапазоне $0 \div 6$ В напряжение на затворе.

3.2 Температурная зависимость сопротивления

В данном эксперименте измерительный ток проходил через контакты 1 и 9, а напряжение измерялось между контактами 2 и 3. На контакт 5 подавался потенциал затвора отсчитываемый относительно земли (рисунок 7). Также заземлен был один из токовых контактов.

На рисунке 13 представлена зависимость измеренного сопротивления образца от температуры при нулевых внешних полях. Отсюда видно, что сопротивление имеет характерную для полупроводников экспоненциальную температурную зависимость.

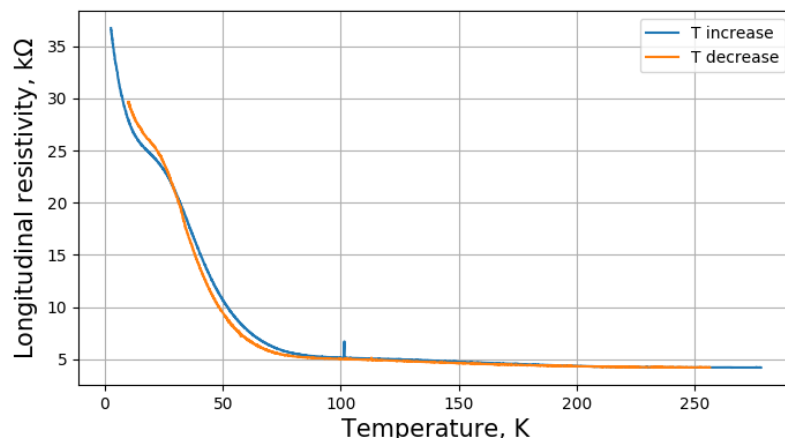


Рис. 13: График зависимости удельного сопротивления канала от температуры при нулевом напряжении на затворе. Синяя линия - при росте температуры, жёлтая линия - при понижении температуры.

3.3 Эффект поля

Путём изменения затворного напряжения, возможно управление уровнем Ферми, что позволяет контролировать концентрацию электронов и дырок в квантовой яме. По зависимости удельного сопротивления от затворного напряжения можно определить точку зарядовой нейтральности, а также знак заряда носителей. В данном эксперименте использовались те же самые контакты, что и в пункте 3.2.

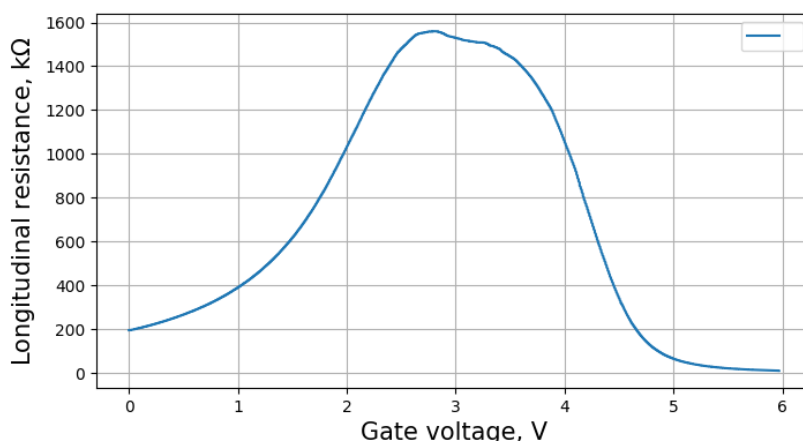


Рис. 14: Эффект поля.

Из рисунка 14 видно, что квантовая яма имеет дырочный тип проводимости, так как производная удельного продольного сопротивления по затворному напряжению положительна. Также можно определить положение точки зарядовой нейтральности $U_g \approx 3V$. Ей соответствует максимальное значение продольного сопротивления, представленного на графике.

3.4 Нелокальный транспорт

Наличие краевых состояний у топологического изолятора приводит к появлению нелокального транспорта, так как ток в основном распространяется только по краям образца, а не по всей площади.

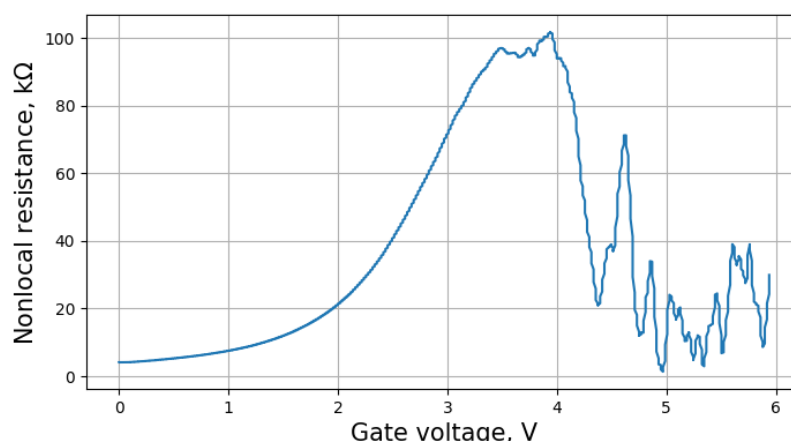


Рис. 15: Нелокальный транспорт.

Для измерения нелокального сопротивления были выбраны контакты 3 и 4 в качестве потенциальных и контакты 2 и 7 в качестве токовых. Такой выбор обусловлен тем, что потенциальные контакты не должны находиться между токовыми.

График зависимости нелокального сопротивления образца от напряжения на затворе представлен на рисунке 15. Легко видеть, что максимум нелокального сопротивления наблюдается в точке зарядовой нейтральности, ввиду минимизации концентрации носителей заряда по всей площади

структуры.

3.5 Эффект Холла

Одним из важных параметров, характеризующих полупроводниковые материалы является концентрация носителей заряда и их подвижность. Их можно определить из эффекта Холла по производной холловского сопротивления по магнитному полю. Путём несложных расчётов получают значения концентрации и подвижности носителей при различных затворных напряжениях.

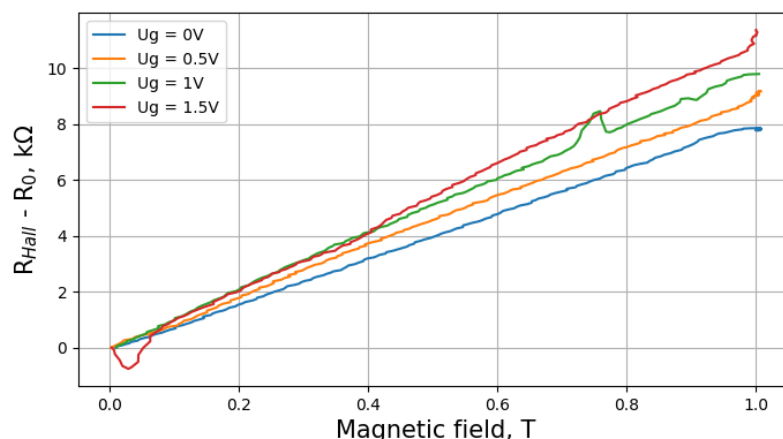


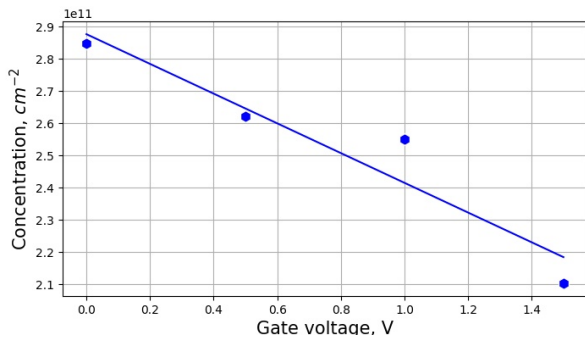
Рис. 16: Эффект Холла.

В данном эксперименте токовыми контактами были 1 и 9, потенциальными 4 и 8.

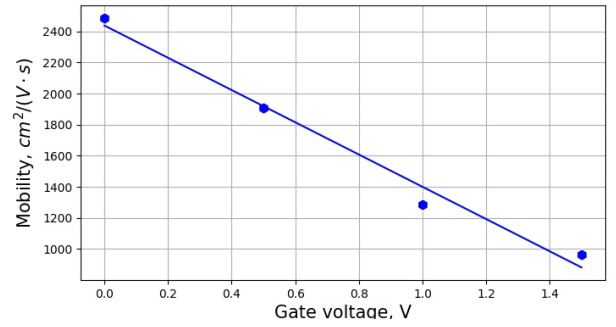
Графики зависимости концентрации и подвижности представлены на рисунках 17а и 17b. Расчёт был проведён по формулам:

$$n = \frac{J dU_y}{e dB}, \quad (5)$$

$$\mu = \frac{l_x}{l_y} \frac{1}{U_x(0)} \frac{dU_y}{dH}. \quad (6)$$



a



b

Рис. 17: Концентрация (а) и подвижность (б) носителей заряда

4 Терагерцовый отклик

4.1 Постановка задачи и ожидаемые результаты

Второй частью работы является наблюдение т.н. «терагерцового отклика», – эффекта, заключающегося в электродинамическом возбуждении циркулярно поляризованным излучением краевого спин-поляризованного тока, текущего по периметру двумерного мезаскопического HgTe-канала, находящегося в фазе топологического изолятора. Выбранная ширина 9 нм HgTe-слоя дает структуру с инвертированным спектром и шириной запрещённой зоны не менее 25 мэВ [4], что соответствует длине волны >50 мкм. Таким образом, используемое нами зондирующее излучение с длиной волны 118.6 мкм (энергия кванта 10 мэВ) исключает возможность нежелательной фотоэмиссии в объёме образца.

Направление протекания краевого спин-поляризованного тока определяется направлением вращения плоскости поляризации излучения, генерируемого лазером на парах воды посредством особого режима работы – режима генерации ортогональных поляризаций, который далее будет подробно описан.

Обсуждавшаяся ранее возможность управлять уровнем Ферми двумерного мезаскопического HgTe-канала как с помощью потенциала затвора, так и с помощью механического давления на образец, позволяет «включать» и «выключать» краевые токи и наблюдать их существование регистрируя, таким образом, «терагерцовый отклик».

Рисунок 18 иллюстрирует механизм возникновения проводимости при разных положениях уровня Ферми. Несмотря на то что в квантовой яме существуют два противоположнонаправленных токовых канала, падение напряжения на контактах всё же наблюдается за счёт электронно-дырочной асимметрии. [6] Проще говоря, вероятность оптического перехода зависит от спина электрона. Для правой круговой поляризации электроны со спином $s = 1/2$ имеют более высокую вероятность перехода нежели $s = -1/2$, а так как ток в каналах спин-поляризованный, наблюдается ярковыраженное

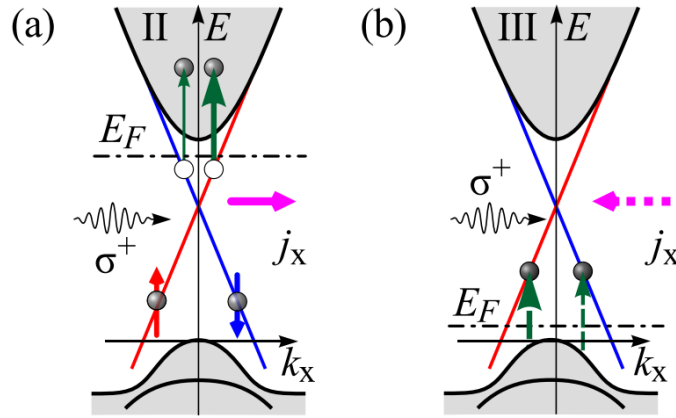
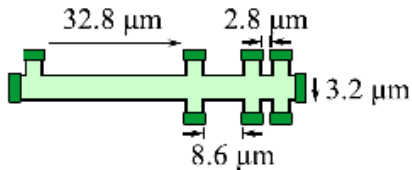
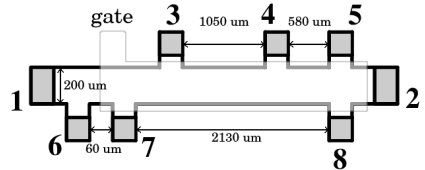
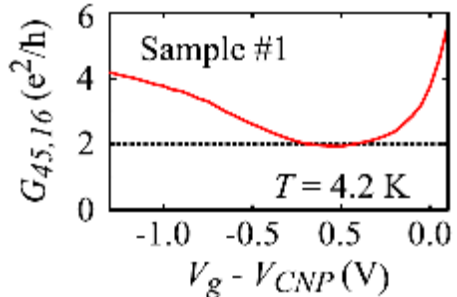
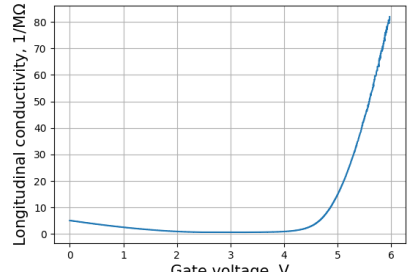


Рис. 18: Механизм возникновения проводимости при разных положениях уровня Ферми

преобладание одного канала над другим. Соответственно, для левой круговой поляризации вероятность перехода будет выше у электронов со спином $s = -1/2$

Наиболее близкая к нашей задаче работа среди опубликованных к настоящему времени, это работа [7], в которой изучался индуцированный циркулярно поляризованным излучением краевой фототок в мезаскопической структуре $\text{Cd}_{0.7}\text{Hg}_{0.3}\text{Te}/\text{HgTe}/\text{Cd}_{0.7}\text{Hg}_{0.3}\text{Te}$, подобной той, которую мы изучаем. В нижеследующей таблице приведено сравнение свойств образцов и условий эксперимента в цитируемой работе и в нашем случае. Такое сравнение полезно для оценки ожидаемых нами результатов эксперимента при наблюдению «терагерцового отклика».

Характеристика структуры	образец в [7]	наш образец
Толщина HgTe-слоя [нм]	8	9
Концентрация носителей [cm^{-2}], $T=4.2\text{K}$, $U_{\text{gate}}=0$	$3 \cdot 10^{11}$	$2.9 \cdot 10^{11}$
Подвижность носителей [$\text{cm}^2/\text{В/с}$], $T=4.2\text{K}$, $U_{\text{gate}}=0$	100000	2000
Длина волны зондирующего излучения [мкм]	118 и 185	118

Х-ка структуры	образец в [7]	наш образец
Дизайн		
Проводимость как функция потенциала затвора		

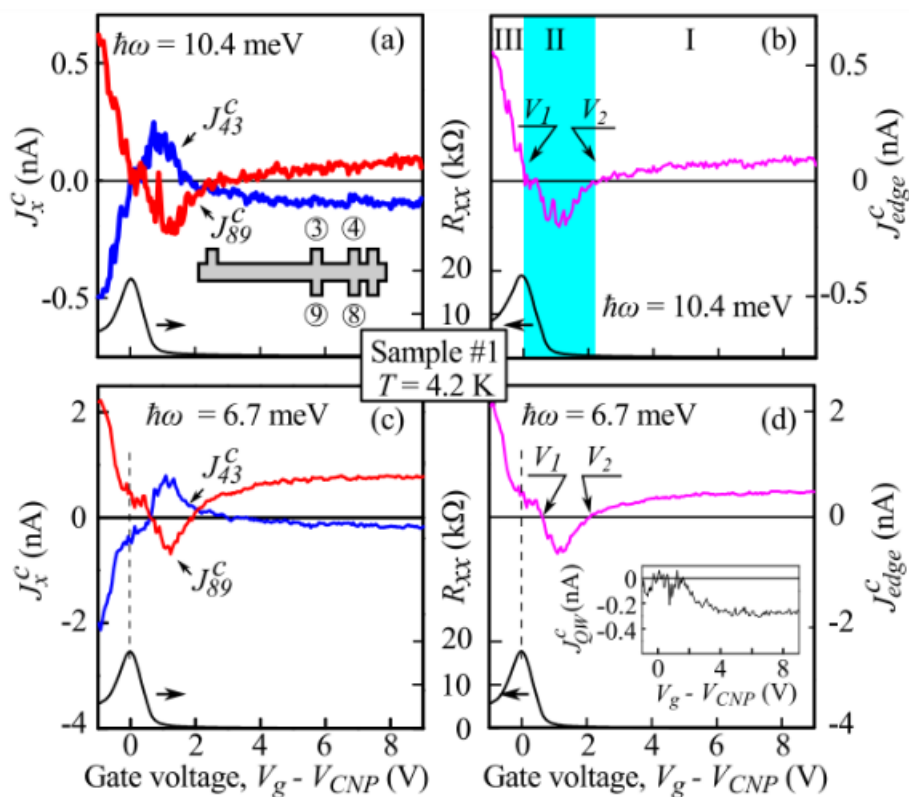


Рис. 19: Фототоки для разных энергий фотонов с разных пар контактов в зависимости от затворного напряжения. Чёрная кривая показывает продольное сопротивление между контактами 3 и 4 [7].

Ввиду того, что лазерное излучение, попадаемое на структуру, имеет кру-

говую поляризацию, на носители заряда действует сила вращающегося электрического поля, тем самым индуцируя вихревой ток. На рисунке 19b изображена зависимость краевого тока между контактами 3 и 4 от напряжения на затворе. График можно условно разделить на 3 области. В области I и III уровень Ферми лежит вблизи зоны проводимости и валентной зоны соответственно. В данном случае проводимость обусловлена механизмами, описанными в пункте 3.3 Эффект поля. Поднимая уровень Ферми из валентной зоны и двигаясь к точке зарядовой нейтральности, проводимость структуры падает, а, преодолев середину запрещённой зоны, ток меняет своё направление. Это происходит из-за зависимости импульса от спина электрона и электронно-дырочной асимметрии. Ранее было сказано, что на краях образца, вообще говоря, находится два противоположно направленных токовых канала, в которых спины электронов направлены в разные стороны. За счёт того, что токи в эти каналах не равны, возможна регистрация результирующего сигнала. Как можно видеть из рисунка 18a ввиду различной населённости краевых каналов из красной ветви больше электронов попадают в зону проводимости, но если вблизи валентной зоны они имели отрицательную компоненту волнового вектора, то вблизи зоны проводимости k_x поменяла знак, соответственно и поменялось направление тока. При дальнейшем увеличении энергии Ферми заметный вклад в проводимость будут давать электроны, возбуждённые по всему объёму структуры, а поскольку их импульс не связан со спином, да и никакой спиновой поляризацией они не обладают, то регистрируемый ток снова меняет знак (область I на графике).

4.2 Методика измерений

В работе применяется поляризационно-модуляционная методика детектирования краевого тока. Для регистрации терагерцового отклика используется синхронное детектирование падения напряжения на нагрузочном резисторе с помощью фазочувствительного усилителя SR830. В качестве опорного сигнала используется синусоидальный сигнал с фотоприёмника, появляющийся в результате биения ортогональных поляризаций используемого

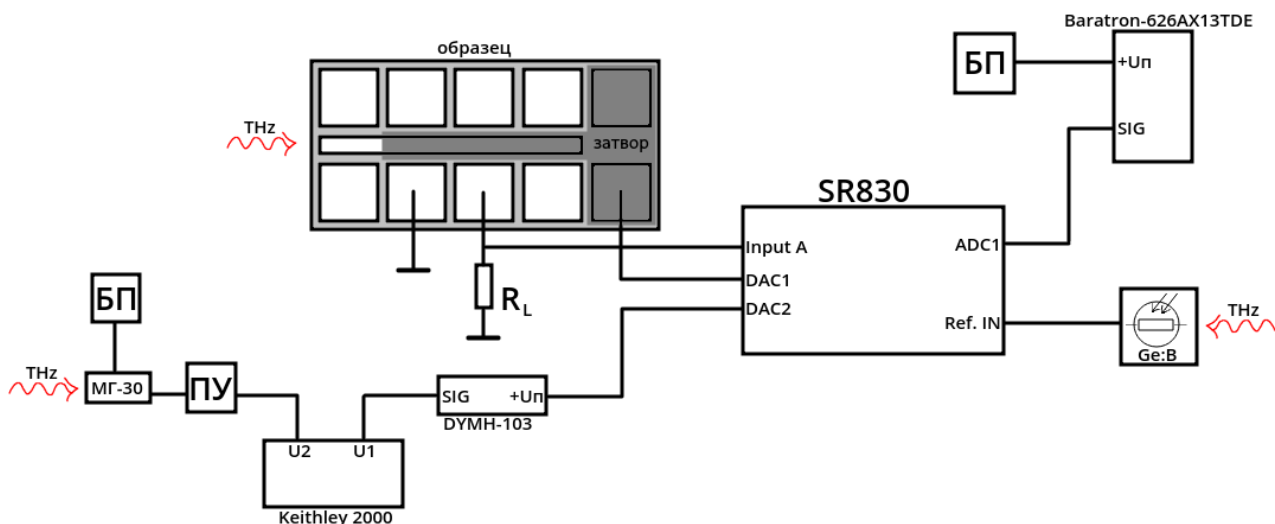


Рис. 20: Схема измерения

лазера [9].

Принципиальная схема измерительной части установки (рисунок 20) состоит из фазочувствительного усилителя SR830, который не только измеряет напряжение на нагрузочном резисторе, но и, благодаря имеющимся у него 16-битным АЦП и ЦАП каналам, регистрирует сигнал с емкостного датчика давления (Baratron-626AX13TDE), а также питает динамометр (ДУМН-103). Пироэлектрический датчик (МГ-30) служит для контроля уровня мощности лазера. Для работы этого датчика измеряемый им поток излучения должен быть промодулирован по амплитуде, для чего в измерительную схему добавлен механический обтюратор, частота модуляции которого может быть установлена в диапазоне от 70 до 400 Гц. Для измерения предварительно усиленных сигналов с пироэлектрического приемника и динамометра используется универсальный 10-канальный мультиметр Keithley 2000, обеспечивающий необходимую точность измерений.

Для работы с измерительным оборудованием была написана программа на языке программирования Python (Приложение А). В её функционал входит автоматическая настройка оборудования для измерений, несколько режимов работы для измерений с различными конфигурациями и сбор полученной информации с приборов для дальнейшего анализа.

Наладка установки происходит следующим образом. После настройки H_2O

лазера для проверки его работоспособности лазерный луч направляется через обтюратор и компенсатор на пироэлектрический датчик МГ-30. Обтюратор, перекрывая оптический сигнал с некоторой периодичностью, определённой скоростью вращения диска обтюлятора, преобразует непрерывный световой поток в переменный сигнал типа меандр, который может быть детектирован пироэлектрическим датчиком. Далее система настраивается так, чтобы лазерный луч через систему зеркал направлялся непосредственно на образец и затем попадал через собирающую линзу на фотоприёмник. Также во вставке криостата предусмотрена возможность механического сжатия образца с помощью гидропресса для возможности «отключения» краевых состояний электронной системы образца. Для этого на конце штока вварен сильфон, путем изменения давления в котором создается сила давления на образец.

4.3 Экспериментальная установка

4.3.1 Газоразрядный лазер на парах H_2O

Источником терагерцового излучения был выбран лазер на парах воды [10], настроенный на генерацию излучения с длиной волны 118.6 мкм, что соответствует энергии кванта в 10 мэВ.

Уникальной особенностью этого лазера для нашего эксперимента является его способность к генерации поляризационно-модулированного излучения, которое достигается следующим образом. В качестве выводного лазерного зеркала взята металлическая Ni:Cu сетка, слегка анизотропная за счёт небольшого предварительного растяжения вдоль своей диагонали. В результате поляризационное вырождение мод лазерного резонатора снимается, что приводит к одновременной генерации двух расщепленных по частоте ортогональных волн, принадлежащих одному типу колебаний резонатора. Величину расщепления в зависимости от относительного удлинения диагонали сетки можно оценить по эмпирической формуле $\Omega \approx 25 \cdot 10^6 \frac{\Delta l}{l}$ Гц. На практике удается получить величину Ω в диапазоне от нескольких кГц

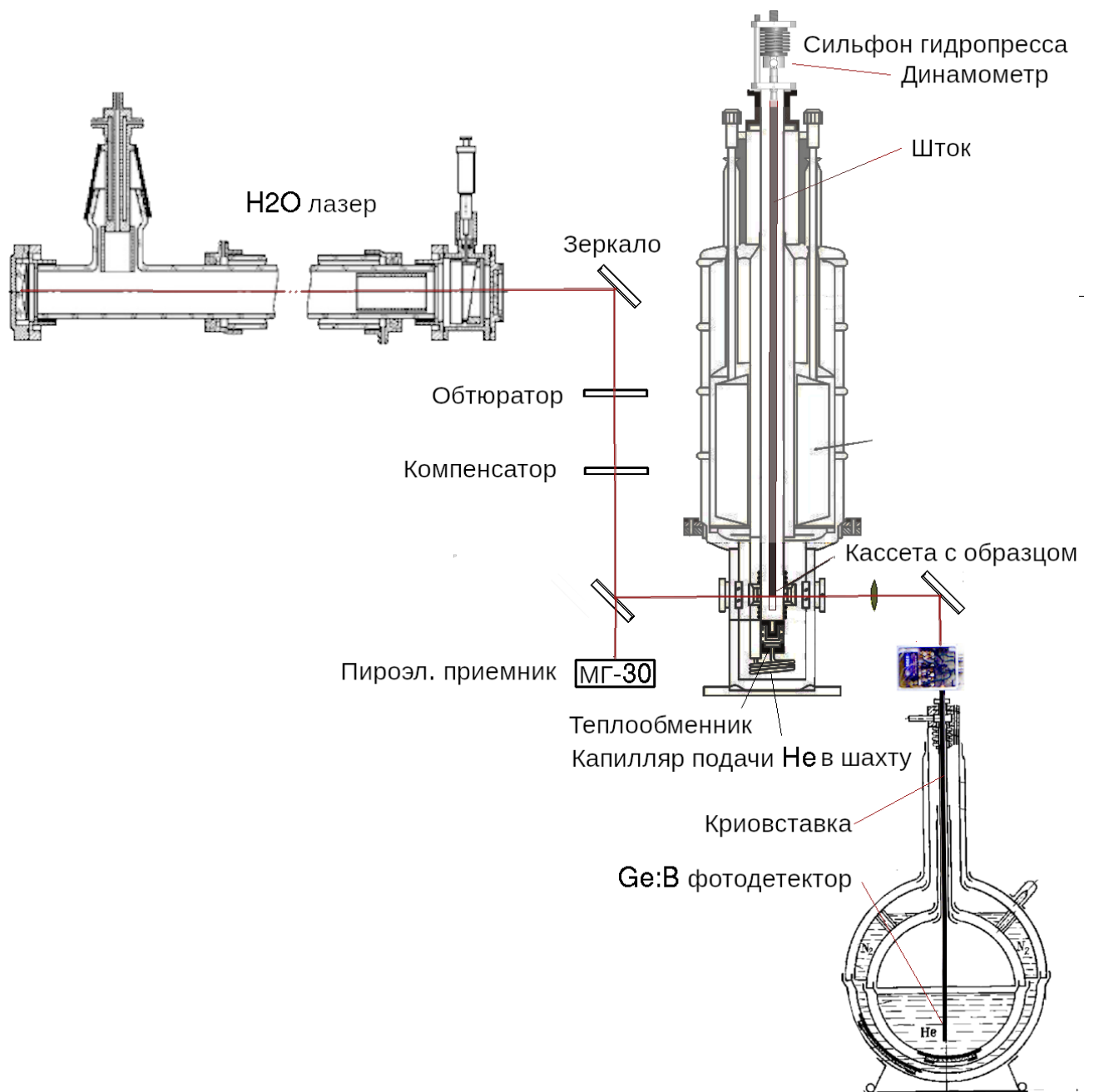
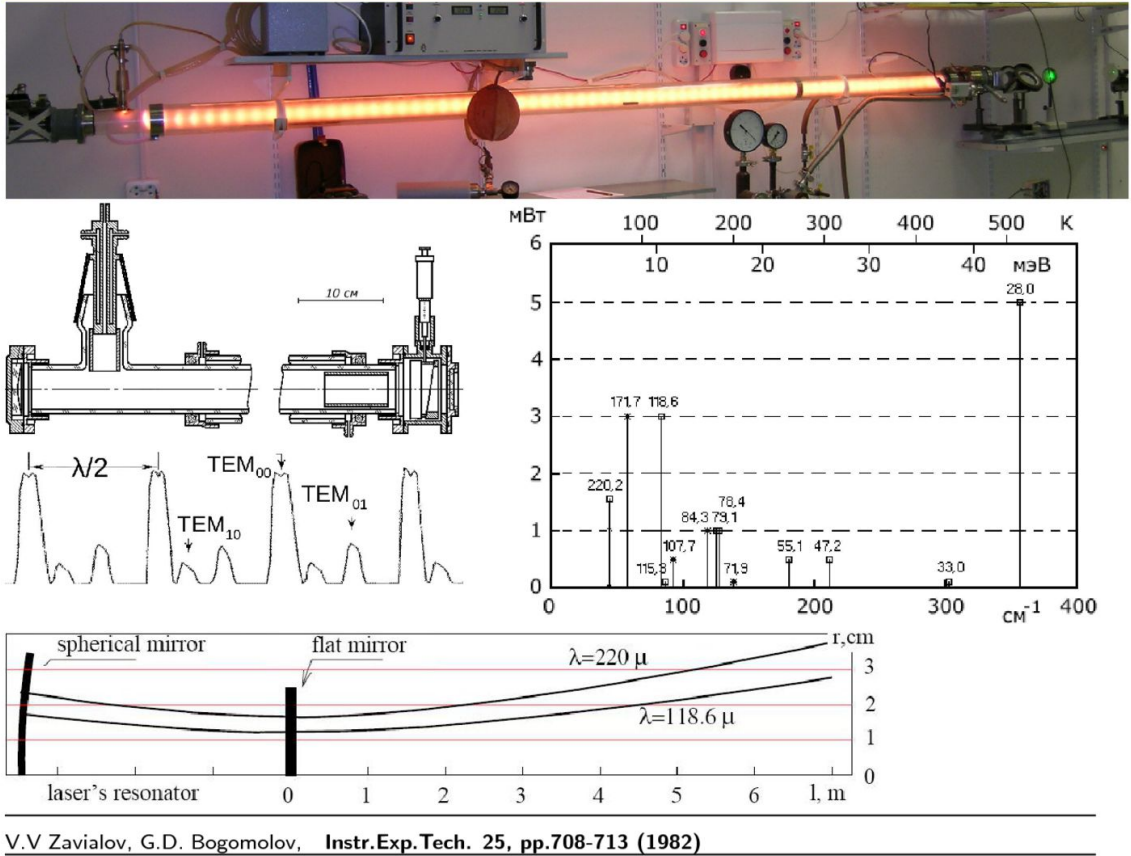


Рис. 21: Схема установки

CW Water-vapor gas-discharge laser



V.V Zavialov, G.D. Bogomolov, *Instr.Exp.Tech.* 25, pp.708-713 (1982)



Рис. 22: Лазер на парах H_2O

до 50 кГц. Амплитуды E_{\parallel} и E_{\perp} этих ортогональных волн, ориентированных соответственно вдоль и поперек направления анизотропии сеточного зеркала имеют вид:

$$E_{\parallel} = E_0 \cos[(\omega - \Omega)t] \quad E_{\perp} = E_0 \cos[(\omega + \Omega)t]. \quad (7)$$

Режим биений можно наблюдать, помещая на пути луча лазера поляризатор под углом θ к направлению анизотропии.

$$\mathcal{E}_{\perp} \sim \cos[(\omega + \Omega)t] \cos \theta, \quad \mathcal{E}_{\parallel} \sim \cos[(\omega - \Omega)t] \sin \theta, \quad (8)$$

где θ , – угол поворота поляризатора G_1 относительно направления поляризации волны.

Так как используемые фотоприемники регистрируют мощность излуче-

ния и, таким образом, являются квадратичными, то сигнал с фотоприемника будет иметь вид:

$$P(\theta) = \overline{(\mathcal{E}_\perp + \mathcal{E}_\parallel)^2} \sim \sin^2 \theta + \cos^2 \theta + \sin 2\theta \cos \Omega t, \quad P(45^\circ) = 1 + \cos \Omega t. \quad (9)$$

Здесь мы усреднили сигнал по оптическим частотам, оставив только медленно меняющиеся члены. При угле поляризатора $\theta = 45^\circ$ имеем:

$$P \sim \frac{1 + p^2}{2} + p \cos(\Omega t + \gamma) \quad (10)$$

$$U = U_0[1 - \cos(\Omega t)]. \quad (11)$$

Эффект генерации ортогональных поляризаций имеет квантовую природу участвующих в излучении молекулярных уровней. На линиях с длинами волн 28, 33 и 84.3 мкм, для которых изменение полного орбитального момента при переходе между соответствующими уровнями молекулы воды $\Delta J=1$, излучение лазера с описанным выше анизотропным резонатором линейно поляризовано и возбуждается только одна из ортогональных *линейно* поляризованных компонент, для которой резонатор имеет большую добротность, в то время, как вторая компонента эффективно подавляется первой из-за сильной конкуренции. Для целей данной работы эти длины волн не представляют интереса, а параметры выходного сеточного зеркала лазера подбираются так, чтобы они по-возможности не возбуждались.

На остальных линиях генерации лазера (47.2, 55.1, 78.4, 79.1, 115, 118.6 и 220 мкм), в том числе и интересующих нас в данной работе длинноволновых линий с $\lambda > 100 \mu\text{м}$, для которых $\Delta J = 0$, взаимодействие между компонентами оказывается слабым, что приводит к возникновению режима генерации *циркулярно* поляризованных ортогональных поляризаций. Метод создания требуемой фазовой анизотропии лазерного резонатора путем растяжения сеточного зеркала приводит также и к паразитной амплитудной анизотропии, которая, при превышения некоторого порога, приводит к генерации линейно-поляризованного ориентированного вдоль направления меньшей анизотропии излучения и на этих линиях.

Благодаря общему резонатору, обе волны имеют одинаковое пространственное распределение и высокую (≤ 100 Гц) стабильность разностной частоты.

Существуют также другие способы получения циркулярно поляризованного излучения. Первый способ заключается в отказе от использования режима биений поляризаций, перенастройке лазера на генерацию стационарного линейно поляризованного излучения, установке вращающейся $\lambda/4$ пластинки на пути лазерного луча, а второй – в перенастройке лазера на генерацию стационарного циркулярно поляризованного излучения.

4.3.2 Фотоприёмник

Для детектирования лазерного излучения используются фотоприёмник на основе Ge:Sb, (рисунок 21), охлаждаемый до температуры жидкого гелия и имеющий приемлимую чувствительность и частотную характеристику. Он представляет из себя вставку в гелиевый сосуд Дьюара, которая состоит из длинной трубки, на конце которой находится сам фотоприёмник, и корпуса с блоком электроники и автономным питанием.

Принцип работы фотоприёмника основан на внутреннем фотоэффекте. При попадании излучения на кристалл германия, его сопротивление падает. Изменение сопротивления детектируется и преобразуется в электрический сигнал.

4.3.3 Оптический криостат

Ввиду необходимости освещения образца лазерным излучением был использован оптический криостат optCRYO105, чертёж которого изображён на рисунке 23. Криостат предназначен для работы в температурных диапазонах от 1.8 К до 300 К. Вставка с образцом помещается в шахту так, чтобы исследуемый образец находился на уровне окон для попадания на него излучения.

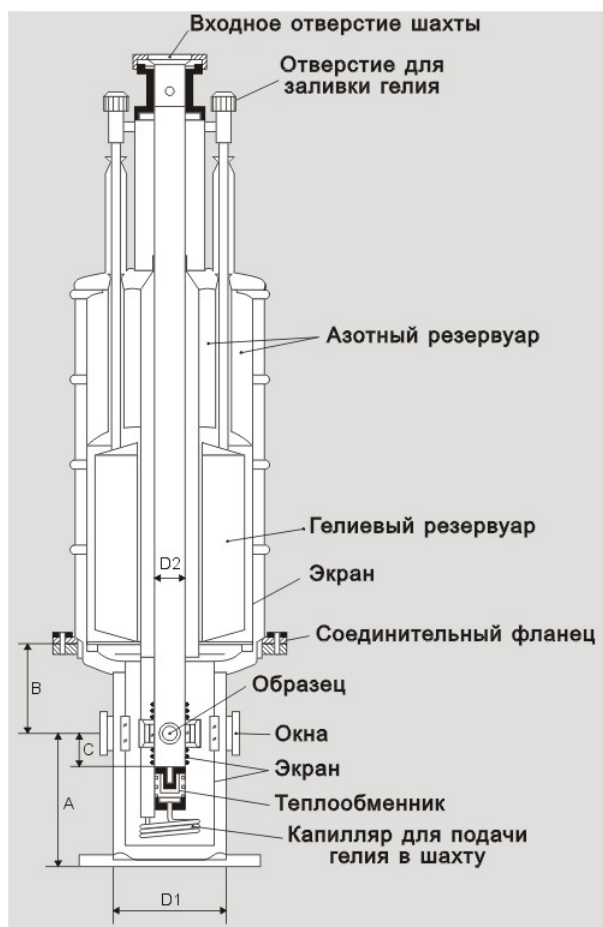


Рис. 23: Оптический криостат optCRYO105

Принцип работы криостата заключается в перетекании гелия (в качестве хладагента также может использоваться и азот) по капилляру из гелиевого резервуара в шахту с образцом. Таким образом, изменяя степень открытия клапана между гелиевым резервуаром и шахтой, можно регулировать температуру образца в диапазоне 4.2-300 К. Путём откачки паров гелия из шахты можно добиться снижения температуры до 1.8 К. В таком режиме работы образец будет погружён в жидкий гелий. Малый расход гелия (< 0.1 л/ч) даёт возможность работы более 20 часов. Давление, а следовательно и температура измеряется в диапазоне $1.8 \div 4$ К с помощью баратрона.

4.3.4 Вставка для оптического криостата

Образец устанавливается во вставку, изготовленную специально для этого эксперимента ввиду того, что она должна не только удерживать образец перпендикулярно ходу лазерного луча, но и позволять сдавливать его механически.

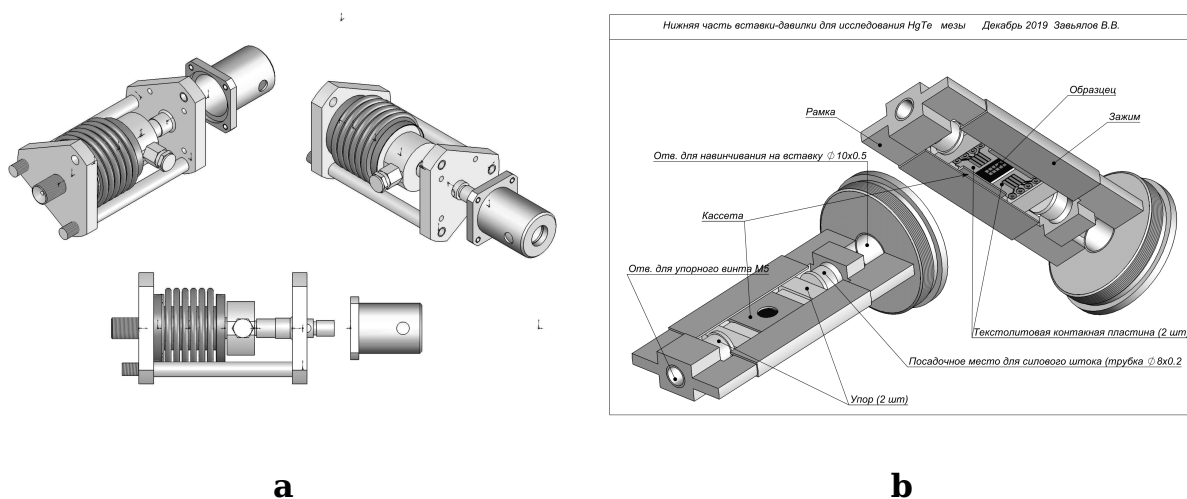


Рис. 24: Верхняя (а) и нижняя (б) часть вставки

Вставка состоит из верхней части, нержавеющей трубки, соосного с ней штока, обеспечивающего давление на образец и нижней части. На верхней части (рисунок 24а) располагается масляный сильфон, жёстко связанный со штоком, обеспечивающий гидравлическое сжатия образца, посредством накачки масла. Между штоком и сильфоном установлен динамометр, который даёт информацию о приложенной к образцу механической нагрузке. Нижняя часть вставки (рисунок 24б) представляет собой рамку, внутри которой с помощью зажимов и упоров удерживается кассета с образцом. Так как предполагалось измерение серии таких образцов, то для удобства их монтажа были изготовлены кассеты. Таким образом, снятие и установка нового образца будет происходить значительно быстрее.

Детали кассеты (рисунок 25) выполнены из бронзы и обеспечивают удобную фиксацию образца и подвод медных проводов от образца к разъёму 8

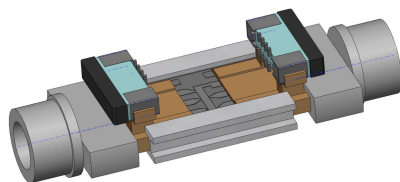


Рис. 25: Кассета для образца

pin, к которому подсоединяется 8 pin шлейф, идущий через трубку к верхней части вставки на 24 pin разъём.

5 Заключение

В ходе выполнения данной работы был изготовлен образец и определены основные характеристики носителей заряда в квантовой яме на основе HgTe – концентрация, подвижность, а также тип проводимости при различных затворных напряжениях. Исходя из результатов проделанных экспериментов по изучению транспортных свойств, можно говорить об успешном изготовлении образца: наблюдение нелокального транспорта свидетельствует об инвертированном спектре.

Вторым этапом стала подготовка к эксперименту по наблюдению терагерцового отклика. Отремонтирован и приведен в рабочее состояние газоразрядный лазер на парах воды, собрана оптическая и измерительная схемы специализированной установки, написана программа для работы с оборудованием, подготовлен оптический сосуд Дьюара и смонтирован образец на кассету, позволяющую подвергать образец одноосному сжатию. К сожалению, из-за форс-мажорных обстоятельств во втором квартале этого года, подготовленный нами эксперимент оказался отложенным.

Список используемых источников

Список литературы

- [1] Oostinga J. B., Maier, L., Schüffelgen P., Knott D., Ames C., Brüne C., Tkachov G., Buhmann H., and Molenkamp L.W. «Josephson Supercurrent through the Topological Surface States of Strained Bulk HgTe», *Phys.Rev.* **X3**, No.2, p. 21007 (2013).
- [2] Pfeuffer-Jeschke A., thesis, University of Wurzburg (2000).
- [3] Novik E.G., Pfeuffer-Jeschke A., Jungwirth T., V. Latus-sek, C.R. Becker, G. Landwehr, H. Buhmann, and L.W. Molenkamp, «Band structure of semimagnetic $\text{Hg}_{1-y}\text{Mn}_y\text{Te}$ quantum wells», *Phys. Rev.* **B72**, 035321 (2005).
- [4] M. König, H. Buhmann, L. W. Molenkamp, T. L. Hughes, C.-X. Liu, X. L. Qi, and S. C. Zhang «The Quantum Spin Hall Effect: Theory and Experiment», *J. Phys. Soc. Jpn* **77**, 031007 (2008).
- [5] S. S. Krishtopenko, I. Yahniuk, D. B. But, V. I. Gavrilenko, W. Knap, and F. Teppe, «Pressure- and temperature-driven phase transitions in HgTe quantum wells», *Phys.Rev.* **B94**, no. 24, 245402, (2016).
- [6] V. Kaladzhyan, P. P. Aseev, and S. N. Artemenko, «Photogalvanic effect in the HgTe/CdTe topological insulator due to edge-bulk optical transitions», *Phys. Rev.* **B92**, 155424 (2015).
- [7] K.-M. Dantscher, D. A. Kozlov, M. T. Scherr, S. Gebert, J. Bärenfänger, M. V. Durnev, S. A. Tarasenko, V. V. Bel'kov, N. N. Mikhailov, S. A. Dvoretzky, Z. D. Kvon, J. Ziegler, D. Weiss, and S. D. Ganichev, «Photogalvanic probing of helical edge channels in two-dimensional HgTe topological insulators», *Phys. Rev.* **B95**, 201103(R) (2017).
- [8] Г. М. Миньков, А. А. Шерстобитов, А. В. Германенко, О. Э. Рут, С. А. Дворецкий, and Н. Н. Михайлов, «Проводимость латерального p-n-перехода в двумерных структурах HgTe с инвертированным спектром:

роль краевых состояний», Письма в ЖЭТФ **101**, no. 7, pp. 522-526 (2015).

- [9] В. В. Завьялов, Г.Д. Богомолов, «Биения частот между ортогональными поляризациями в лазере на парах воды». Письма в ЖЭТФ **20**, вып.6, стр.393 (1974).
- [10] В. В. Завьялов, Отчёт по НИОКР «Терагерцовый газоразрядный лазер с генерацией ортогональных поляризаций для многочастотного зондирования плазмы стеллятора Л-2М», РАН (2006)

Приложение А Листинг программы

```
1 #!/usr/bin/python3
2 import pyvisa
3 import time
4 import os
5 import numpy as np
6 from math import fabs
7
8 class Measure:
9
10 def __init__(self, keithley_address=0, lockin_address=0,
11             source_address=0, check_cache=True, name='measure', head='##
12             t, s' + '\t' + 'R, Ohm' + '\t' + 'Ux, V' + '\t' + 'Uy, V' +
13             '\t' + 'Ug, V' + '\n'):
14
15     self.file_name = name + '_' +
16                     str(time.strftime('%d-%m-%Y_%X'))[: -3] + '.dat'
17
18     rm = pyvisa.ResourceManager()
19     if keithley_address != 0:
20         print('Installing keithley settings')
21         self.keithley = rm.open_resource('GPIB0::' +
22                                         str(keithley_address) + '::INSTR')
23         self.keithley.write("SENS:FUNC 'volt:dc'") # set resistance
24             measurement
25         self.keithley.write(':VOLT:DC:RANG 10') #range
26             ':VOLT:DC:RANG .1' ':RES:RANG 1e5'
27         self.keithley.write(':ROUT:CLOSE (@1);') # set channel
28
29     if source_address != 0:
```

```

23     self.source = rm.open_resource('GPIB0::' +
24         str(source_address) + '::INSTR')
25
26     if lockin_address != 0:
27         self.lockin = rm.open_resource('GPIB0::' +
28             str(lockin_address) + '::INSTR')
29     # check if the stack is empty and clean it
30     if check_cache:
31         stack_empty = False
32         print ('Cleaning lock-in cash')
33         while stack_empty == False:
34             try:
35                 self.lockin.read()
36             except:
37                 stack_empty = True
38                 print ('Lock-in cash is clear')
39     if lockin_address != 0:
40         print('Installing lockin settings')
41         self.lockin.write('FMOD 1') # internal/external source
42         self.lockin.write('RMOD 2') # low noise mode
43         self.lockin.write('SLVL .1') # amplitude
44         self.lockin.write('FREQ 5e2') # frequency
45         self.lockin.write('ISRC 1') # input configuration (0 A, 1
46             A-B, 2 I 1M $\Omega$ , 3 I 100M $\Omega$ )
47         self.lockin.write('AUXV 1 {, 0}') # gate voltage
48         self.lockin.write('AUXV 2 {, 2}') # force sensor supply
49         self.lockin.write('APHS') # auto phase
50
51 self.sens = [2e-9, 5e-9, 1e-8, 2e-8, 5e-8, 1e-7, 2e-7, 5e-7,

```

```

1e-6, 2e-6, 5e-6, 1e-5, 2e-5, 5e-5, 1e-4, 2e-4, 5e-4, 1e-3,
2e-3, 5e-3, 1e-2, 2e-2, 5e-2, 1e-1, 2e-1, 5e-1, 1]
51
52 with open(self.file_name, 'w') as f:
53     #setting the head
54     f.write('## Program: ' + os.path.basename(__file__) + ' (' +
            os.path.abspath(os.path.basename(__file__))) + ')' + '\n')
            # program name and path
55     f.write('## Date: ' + str(time.strftime('%d.%m.%Y %X')) +
            '\n')
56     f.write('## This data file: ' +
            str(os.path.abspath(self.file_name)) + '\n')
57     if lockin_address != 0:
58         f.write('## Reference frequency = ' +
            self.lockin.query('FREQ?')[:-1] + ' Hz' + '\n')
59         f.write('## Amplitude = ' +
            self.lockin.query('SLVL?')[:-1] + ' V' + '\n')
60         f.write('## Force sensor supply voltage = ' +
            self.lockin.query('AUXV?2')[:-1] + ' V' + '\n' + '\n')
61         f.write(head) # '## t, s' + '\t' + 'R, Ohm' + '\t' + 'Ux, V'
            + '\t' + 'Uy, V' + '\t' + 'Ug, V' + '\n'
62     print('Installing settings done')
63
64 def start_measurement(self, channels=[1], use_lockin=True):
65     print('Starting lockin measurements')
66     if len(channels) == 1:
67         self.keithley.write(':ROUT:CLOSE (@' + str(channels[0]) +
            ');') # set channel
68     time.sleep(1)
69     t0 = time.time()
70     while 1:

```

```

71
72     Ug = self.lockin.query('AUXV?1')[: -1]
73     keithley_out = []
74     for n in channels:
75         if len(channels) > 1:
76             self.keithley.write(':ROUT:CLOSE (@' + str(n) + ');') #
77                 set channel
78             time.sleep(1)
79             keithley_out.append(self.keithley.query(':SENS:DATA?')[: -1])
80
81     if use_lockin:
82         # changing range
83         x = fabs(float(self.lockin.query('OUTP ? 1')[: -1]))
84         i = int(self.lockin.query('SENS?')[: -1])
85         while (x < 0.35 * self.sens[i]) and (i != 0):
86             self.lockin.write('SENS ' + str(i-1))
87             x = fabs(float(self.lockin.query('OUTP ? 1')[: -1]))
88             i = int(self.lockin.query('SENS?')[: -1])
89         while (x > 0.95 * self.sens[i]) and (i != 26):
90             self.lockin.write('SENS ' + str(i+1))
91             x = fabs(float(self.lockin.query('OUTP ? 1')[: -1]))
92             i = int(self.lockin.query('SENS?')[: -1])
93         SR830 = self.lockin.query('SNAP?1,2')[: -1].split(',')
94         out = str(time.time() - t0) + '\t' +
95             '\t'.join(keithley_out) + '\t' + '\t'.join(SR830) +
96             '\t' + Ug + '\n'
97     else:
98         out = str(time.time() - t0) + '\t' +
99             '\t'.join(keithley_out) + '\t' + Ug + '\n'
100     print(out[: -1])

```

```

97     with open(self.file_name, 'a+') as f:
98         f.write(out)
99         time.sleep(.3)
100
101
102 def sweep(self, channels=[1], use_lockin=True, Umin=-1, Umax=1,
103           dU=.1, dt=.3):
104     print('Starting lockin measurements | sweeping')
105     if len(channels) == 1:
106         self.keithley.write(':ROUT:CLOSE (@' + str(channels[0]) +
107                               ');') # set channel
108     Ug = Umin
109     time.sleep(1)
110     t0 = time.time()
111     while Ug < Umax + dU:
112         keithley_out = []
113         for n in channels:
114             if len(channels) > 1:
115                 self.keithley.write(':ROUT:CLOSE (@' + str(n) + ');') #
116                     set channel
117                 time.sleep(1)
118                 keithley_out.append(self.keithley.query(':SENS:DATA?')[: -1])
119
120     if use_lockin:
121         # changing range
122         x = fabs(float(self.lockin.query('OUTP ? 1')[: -1]))
123         i = int(self.lockin.query('SENS?')[: -1])
124         while (x < 0.35 * self.sens[i]) and (i != 0):
125             self.lockin.write('SENS ' + str(i-1))
126             x = fabs(float(self.lockin.query('OUTP ? 1')[: -1]))

```

```

125         i = int(self.lockin.query('SENS?')[:-1])
126     while (x > 0.95 * self.sens[i]) and (i != 26):
127         self.lockin.write('SENS ' + str(i+1))
128         x = fabs(float(self.lockin.query('OUTP ? 1')[:-1]))
129         i = int(self.lockin.query('SENS?')[:-1])
130     SR830 = self.lockin.query('SNAP?1,2')[:-1].split(',')
131     out = str(time.time() - t0) + '\t' +
           '\t'.join(keithley_out) + '\t' + '\t'.join(SR830) +
           '\t' + str(round(Ug,3)) + '\n'
132 else:
133     out = str(time.time() - t0) + '\t' +
           '\t'.join(keithley_out) + '\t' + str(round(Ug,3)) + '\n'
134 print(out[:-1])
135 with open(self.file_name, 'a+') as f:
136     f.write(out)
137 Ug += dU
138 time.sleep(dt)

```