

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение
высшего профессионального образования
«Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»

Факультет физики

Арслан Анварович Галиуллин

**УПРАВЛЕНИЕ РАССЕЯНИЕМ В КРАЕВЫХ СОСТОЯНИЯХ
ДВУМЕРНОГО ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ИЗОЛЯТОРА**

Выпускная квалификационная работа - бакалаврская работа

студента образовательной программы «Физика»
по направлению подготовки 03.03.02 Физика

Рецензент

к.ф.-м.н., н.с. ИФТТ РАН, до-
цент факультета физики НИУ
ВШЭ

Е.С. Тихонов

Руководитель

д.ф.-м.н., в.н.с. ФИАН, до-
цент факультета физики НИУ
ВШЭ

А.Ю. Кунцевич

Москва, 2021 год

Аннотация

Работа направлена на исследование влияния механических, химических и геометрических модификаций края двумерного топологического изолятора в виде квантовой ямы теллурида ртути на электронный транспорт в нём. Подробно описаны технологические способы изготовления структуры. Описаны измерения полевых структур на основе квантовой ямы. Предложена и измерена геометрия структуры с длинным краем, описаны возможные причины отсутствия нелокального сигнала в этой структуре. Предложена геометрия структуры с отверстиями на краю, описаны способы изготовления тонких глубоких отверстий в квантовой яме, а также механический способ литографии на яме.

Оглавление

Глава 1. Введение	5
Глава 2. Краткий обзор свойств двумерных топологических изоляторов	7
2.1 Структура квантовой ямы HgTe	7
2.2 Спектр и краевые состояния	8
2.3 Описание краевых состояний	10
2.3.1 Детектирование краевых состояний	10
2.3.2 Описание сопротивления краевых состояний	13
2.3.3 Взаимодействие краевых состояний	16
Глава 3. Постановка задачи	18
3.1 Изготовление структур и исследование их транспортных свойств	18
3.2 Подавление краевых каналов геометрией	18
3.3 Нанопаттернирование образца при помощи АСМ и галлиевого ионного пучка	21
3.3.1 Литография	21
3.3.2 Изготовление массива отверстий на краю	22
Глава 4. Этапы изготовления структуры	24
4.1 Молекулярно-лучевая эпитаксия квантовой ямы	24
4.2 Создание микроструктуры	25
4.2.1 Обращение со структурой	25
4.2.2 Резка структуры	26
4.2.3 Приклеивание к кремниевой подложке	26
4.2.4 Литография	28
4.2.5 Травление структуры	32
4.2.6 Напыление диэлектрика	34
4.2.7 Нанесение затвора (гейта)	36
4.2.8 Создание индиевых контактов	41
4.2.9 Монтирование образца в держатель для измерений	44
Глава 5. Постановка эксперимента	47
Глава 6. Результаты	50
6.1 Измерения транспортных свойств структуры типа мостика Холла	50

6.1.1	2-точечные измерения при $T = 300\text{K}$	51
6.1.2	4-точечные измерения при $T = 300\text{K}$	51
6.1.3	Подтверждения проводимости травленной области	52
6.1.4	Локальные измерения при $T = 3\text{K}$	54
6.1.5	Нелокальный сигнал	54
6.1.6	Сигнал в магнитном поле	55
6.1.7	Концентрация носителей	55
6.1.8	Подвижность носителей	56
6.1.9	Температурная зависимость сопротивления в точке за- рядовой нейтральности	57
6.2	Поиск нелокальной проводимости в структуре с длинным краем	57
6.3	Нанофабрикация HgTe различными способами	59
Глава 7. Выводы		63
Глава 8. Благодарности		64
Литература		65

Глава 1. Введение

Наличие поверхностных состояний в теллуриде ртути [1, 2, 3] и необычные свойства квантовых ям на основе теллурида ртути [4] были предсказаны ещё в 80-х годах прошлого века. За этими предсказаниями последовали успешные обобщения теории поверхностных состояний теллурида ртути и других подобных материалов [5, 6, 7], изготовление квантовых ям различной толщины и различного ионного допирования методом молекулярно-лучевой эпитаксии [8, 9], а также последующее экспериментальное обнаружение баллистического транспорта на основе краевых дираковских состояний квантовой ямы теллурида ртути [8]. Всё это привело к бурному росту интереса к двумерным топологическим изоляторам [10]. После детектирования фазы двумерного топологического изолятора в структурах HgTe, она была измерена в других системах: гетеропереходах InAs/GaSb [11], монослое WTe₂, и тонких плёнках 1T'-MoS₂, модифицированных лазерным излучением [12].

Часть экспериментальных данных, таких как, например, существование нелокального транспорта за счет краевых состояний [8] и связь направления импульса частиц краевого тока с направлением их спина [13] подтверждают теорию топологических изоляторов [6]. Тем не менее, имеется также ряд экспериментов, результаты которых не сходятся с теорией и до сих пор не имеют внятного объяснения. Так, например, теория предсказывает топологическую защищённость одномерных краевых каналов от рассеяния назад, в то время как в эксперименте наблюдается конечная длина рассеяния в краевых каналах [8] и локализация краевых состояний [14]. Рассеяние в краевых каналах сильно зависит от способа изготовления структуры, что до сих пор также никак не объяснено [14]. Имеются и другие несоответствия, обзор которых представлен в дипломной работе [15].

Краевые состояния в двумерных топологических изоляторах являются перспективным направлением для реализации спинтронных приборов. Например, на основе двумерного топологического изолятора с магнитной примесью на краю можно поляризовать по спину электрический ток [16].

В данной работе исследуется влияние способов изготовления структуры и геометрии образца топологического изолятора на транспорт в нём. Пред-

ложена идея поляризации по спине электрического тока, проходящего через образец, при помощи удлинения одного из двух краёв, описаны результаты измерений локальной и нелокальной проводимости структуры с подобной геометрией. Предложена идея поляризации по спине электрического тока, проходящего через образец, при помощи создания вдоль одного из краёв плотно расположенных отверстий, а также идеи по реализации такого массива отверстий.

Глава 2. Краткий обзор свойств двумерных ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОЛЯТОРОВ

2.1. Структура квантовой ямы HgTe

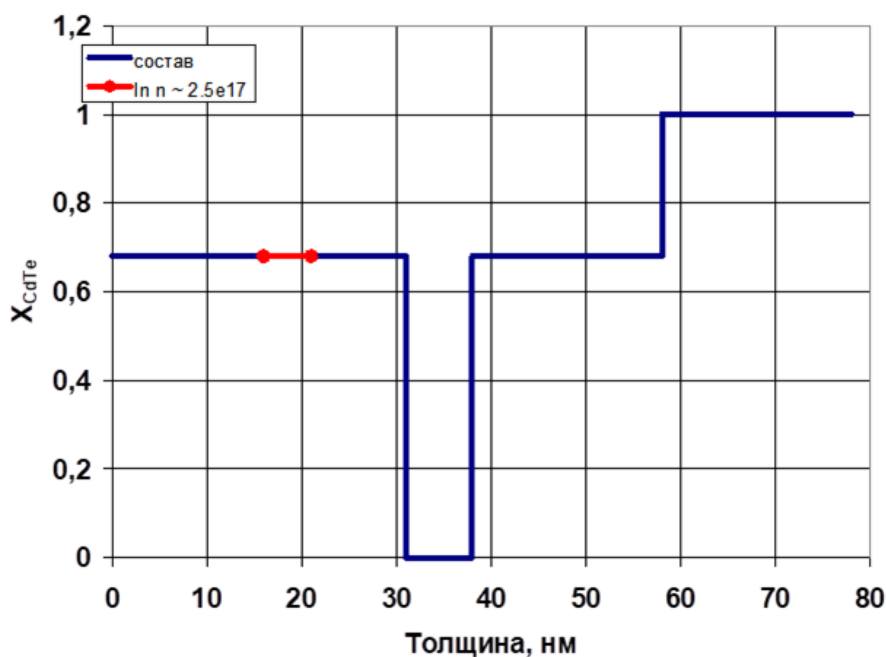


Рис. 2.1. (в цвете) Распределение состава образца квантовой ямы по толщине для используемого в работе типичного образца КРТ130403, выращенного в группе Н.Н. Михайлова в ИФП СО РАН.

Слева направо направо подложка GaAs-(400÷600) мкм, затем ZnTe – 30нм, далее 5-6 мкм CdTe и потом то, что изображено на рисунке. Подложка GaAs ориентации (013). Толщиной квантовой ямы называется толщина слоя HgTe в обкладках $Cd_xHg_{1-x}Te_x$. Структура допированна индием в указанном месте.

Образцы квантовой ямы теллурида ртути представляют собой напылённые на GaAs подложку соответственно буферные слои ZnTe, CdTe, рабочий слой $Cd_xHg_{1-x}Te_x$, образующий квантовую яму, и защитный слой CdTe (см. рис. 2.1, 2.2). Буферные слои необходимы для того, чтобы снять механическое напряжение с слоя квантовой ямы, вызванное несоответствием периодов кристаллической решётки подложки и ямы. Роль защитного слоя – обезопасить яму от внешних воздействий (механических и иных) в процессе хранения и работы с ней. Напыление слоёв производится методом молекулярно-

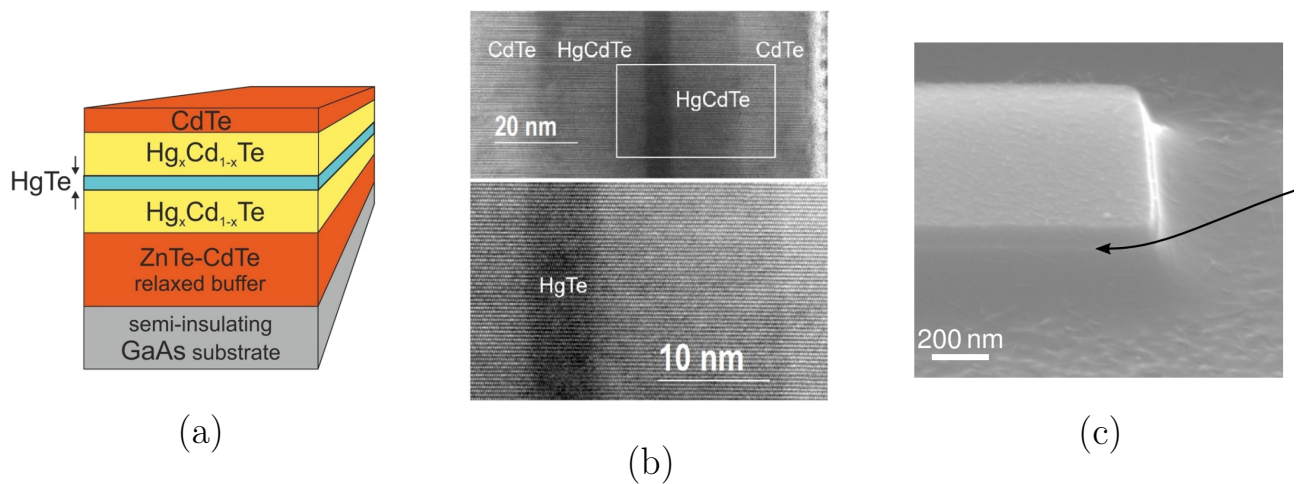


Рис. 2.2. (в цвете) Срезы квантовой ямы. (а) схематичное изображение; (b) изображение среза квантовой ямы в просвечивающий электронный микроскоп. Срез структуры был произведён при помощи фокусированного ионного пучка Ga. Рисунок из статьи [17]. (с) Электронная фотография края стравленной квантовой ямы толщиной 8нм. Яма видна на фотографии в виде горизонтальной белой полоски, на которую указывает стрелка. Рисунок из статьи [14]

лучевой эпитаксии [18] в высоком вакууме. В работе использованы образцы, произведённые группой Н.Н. Михайлова в Новосибирске [9].

Квантовая яма выращивается на подложке GaAs диаметром 2 дюйма ориентацией (013) . Поверхность ямы имеет тёмный цвет, зеркальный блеск и является достаточно мягкой: почти любое прикосновение к ней пинцетом оставляет вмятину или царапину, при том что GaAs подложка остаётся неповреждённой. Изготовленная на поверхности подложки меза-структура без затвора выглядит как показано на рис. 2.3. Подробно стадии изготовления структуры описаны ниже в главе "Этапы изготовления структуры"

2.2. Спектр и краевые состояния

Существование безмассовых состояний на границе двумерной структуры с вакуумом (см рис. 2.4) было частично предсказано ещё в статье [19]. Для существования краевых состояний необходим контакт между полупроводниками с прямым и инверсным спектром. В случае квантовой ямы теллурида ртути инверсный спектр достигается за счет сильного спин-орбитального взаимодействия в HgTe и размерного квантования, зависящего от толщины ямы

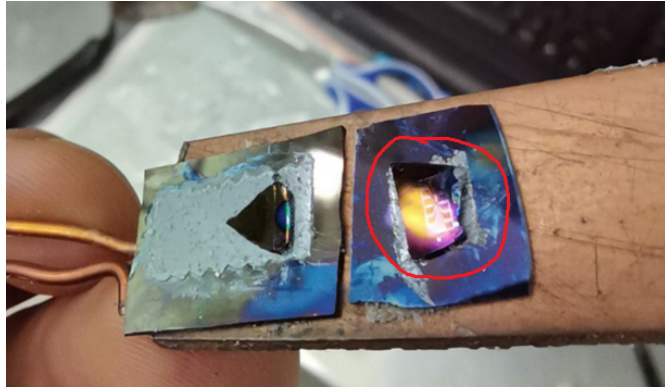


Рис. 2.3. (в цвете) Фотография образца после изготовления структуры и нанесения подзатворного диэлектрика. Образец теллурида ртути обведён красным цветом; он приклеен двусторонним скотчем к кремниевой подложке для удобства обращения с образцом. Размер изображённой на рисунке структуры порядка пяти миллиметров, толщина всей пластины теллурида ртути порядка миллиметра.

(см рис. 2.5); прямым спектром в этом случае можно считать спектр вакуума $E(p) = \pm\sqrt{p^2c^2 + m^2c^4}$.

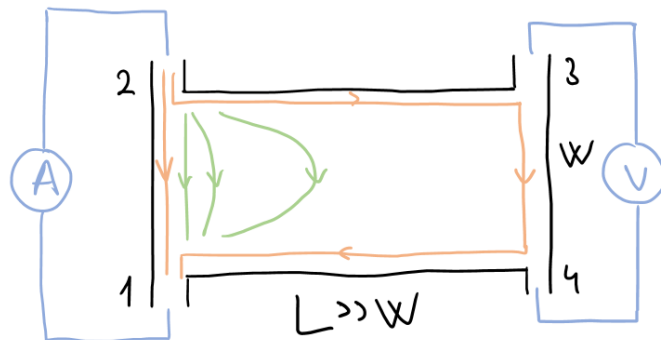


Рис. 2.4. (в цвете) Объёмные и краевые токи, текущие по образцу из контакта 2 в контакт 1. Длина образца L много больше его ширины W . Оранжевым обозначены краевые токи, текущие по обоим краям образца: напрямую из контакта 2 в контакт 1 и из контакта 2 в контакт 1 через контакты 3 и 4. Зелёным цветом обозначены линии тока, вызванные объёмными состояниями в образце. Напряжение в данной схеме измеряется на контактах 3 и 4.

Квантовая яма теллурида ртути имеет инвертированный спектр, если её толщина лежит в пределах от $6.2 \div 6.3$ нм до $15 \div 16$ нм (см рис. 2.5). Ориентация подложки (100) или (113) на спектр ямы влияет слабо [10], [20].

Помимо инверсии зон для топологической защищённости этих бесщелевых краевых состояний необходимо также наличие симметрии по обращению

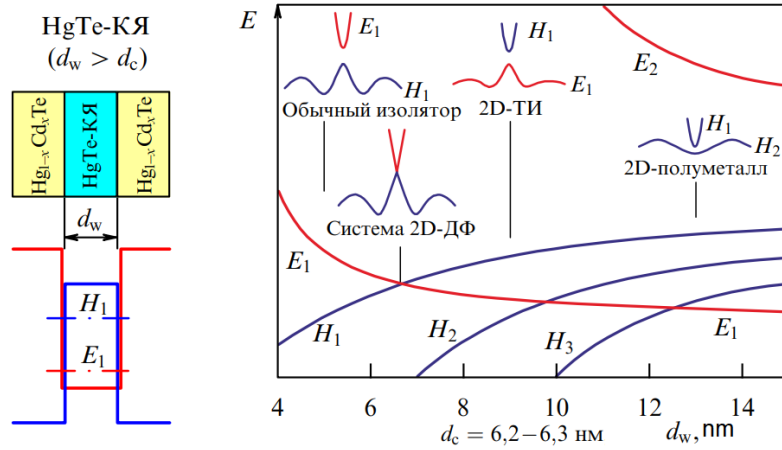


Рис. 2.5. (в цвете) Качественный вид зависимости энергии дна основных подзон размерного квантования от толщины ямы. E_1, E_2 – энергии дна электронных подзон, H_1, H_2, H_3 – энергии дна дырочных подзон. Картинка из обзора [10]

времени и расщепление краевых мод по спину, что обеспечивается сильным спин-орбитальным взаимодействием в структуре [21]. Топологическая защищённость этих состояний говорит о невозможности разрушить их немагнитными взаимодействиями. Магнитное поле способно разрушить эти состояния, так как оно нарушает симметрию по обращению времени.

Слово “изолятор” используется в том смысле, что спектр объёмных состояний имеет щель (см. рис. 2.6), так что управляя уровнем Ферми в системе при помощи затворного напряжения возможно перевести систему в состояние с низкой проводимостью по объёму, в котором транспортный ток будет предположительно распространяться по краю.

2.3. Описание краевых состояний

2.3.1. Детектирование краевых состояний

Для детектирования краевых каналов существует несколько способов. Наиболее распространено измерение нелокального транспорта. В эксперименте с геометрией, изображённой на рис. 2.4, ток может распространяться между контактами 1 и 2 двумя способами: через объёмные состояния, и через краевые. Если уровень Ферми системы находится в зоне проводимости, то почти весь ток потечёт по объёму и лишь экспоненциально малая (по параметру L/W) доля напряжения упадёт между контактами 3 и 4. В

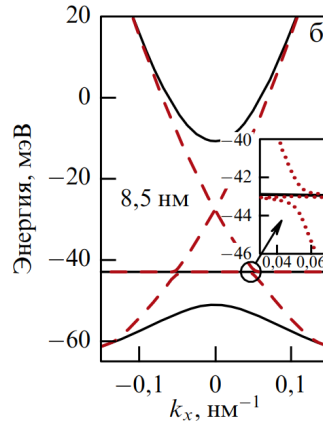


Рис. 2.6. (в цвете) Рассчитанный $k \cdot p$ методом спектр квантовой ямы теллурида ртути шириной 8.5 нм. Красными пунктирными линиями обозначен дираковский спектр краевых состояний, сплошными линиями обозначен спектр объёмных состояний. Рисунок взят из обзора [10] и статьи [20]

случае же, когда уровень Ферми находится в объёмной щели, проход тока осуществляют состояния на левом и правом крае структуры. Величина тока на левом и на правом краю будет пропорциональна отношению сопротивлений соответствующих краевых каналов. В предположении баллистического транспорта (без рассеяния) между контактами, в соответствии с предсказанием топологической теории, величина тока через левый край будет порядка величины тока через правый край. В таком случае падение напряжения на контактах 3 и 4 будет велико. Так детектируют краевые состояния в большинстве экспериментов с двумерными топологическими изоляторами.

Другое свидетельство существования краевых каналов проводимости — это визуализация тока, текущего по структуре, при помощи вычисления его по измеренному сканирующим СКВИДом [22] магнитному полю. В схеме, изображённой на рисунке 2.7, СКВИД измерял распределение магнитного поля вблизи образца, по которому тёк ток в режиме проводимости и отсутствия проводимости по объёму. Далее измеренное магнитное поле пересчитывалось в ток, текущий по образцу, и получалась картинка, свидетельствующая о том, что основная масса тока в режиме объёмного изолятора течёт по краю.

Ещё один интересный пример проявления краевых каналов с дираковским спектром — это обнаружение эффекта фотосопротивления на длинах

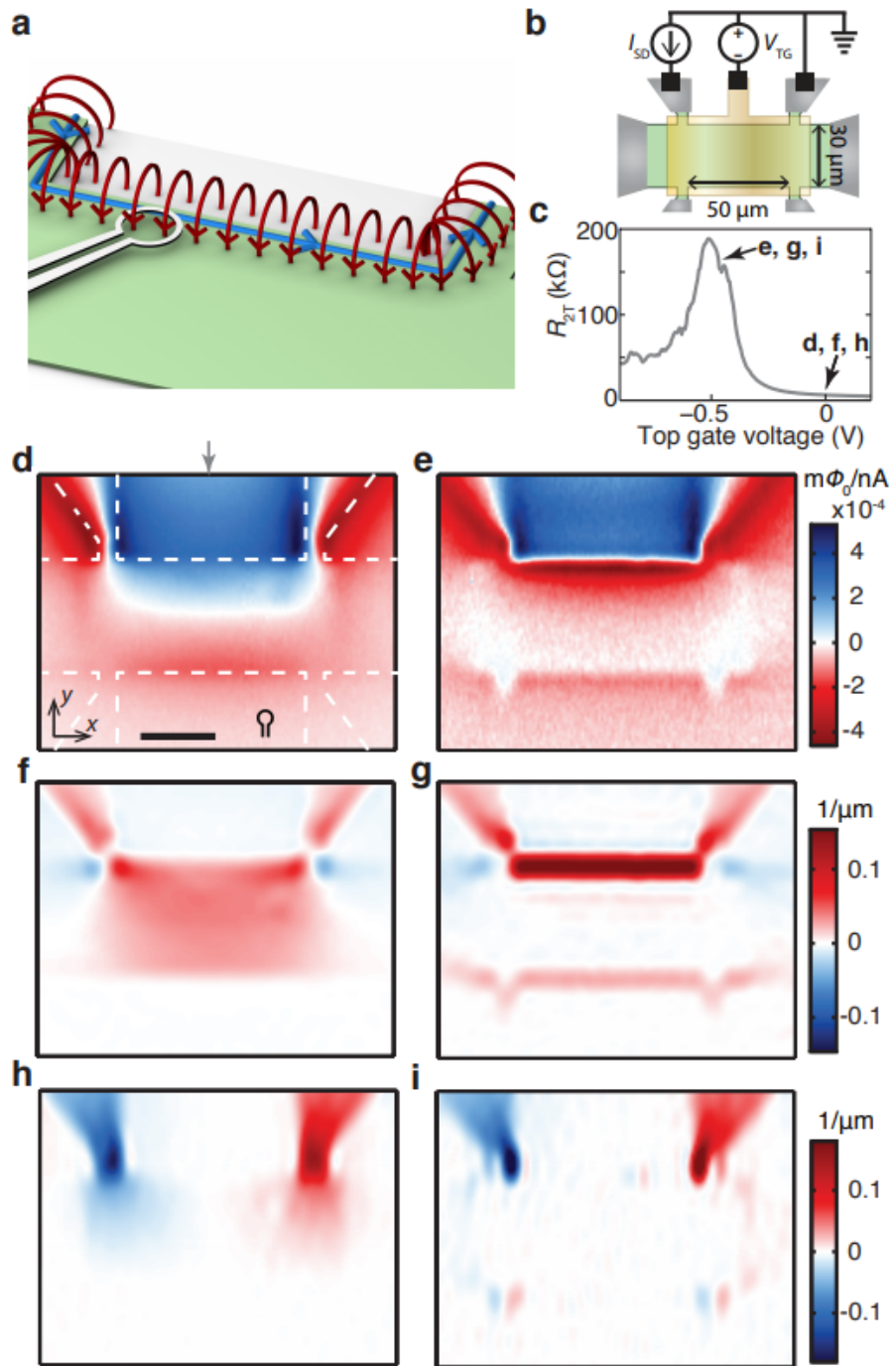


Рис. 2.7. (в цвете) (а) иллюстрация измерения магнитного поля (красный цвет), создаваемого краевым током (синий цвет) квантовой ямы (белый цвет) при помощи СКВИДа (белая петля); (b) схема измерения и результат трёхточечного измерения сопротивления. рисунки e, g, i (три правых рисунка) снимались в режиме объёмного изолятора, d, f, h (три левых рисунка) снимались с изоляторным объёмом; d и e – распределение магнитного потока по образцу; f, g – x-компонента тока в образце; h, i – y-компонента тока. Картинка из статьи [22].

волн, меньших ширины объёмной щели. В эксперименте [23] измерялся эффект от облучения квантовой ямы, находящейся под прозрачным затвором, на сопротивление структуры. Оказалось, что сопротивление структуры под лазерным пучком с длиной волны, соответствующей по энергии примерно $1/3$ от величины щели на 3 порядка уменьшалось как в локальном, так и в нелокальном режиме по сравнению со структурой, не подверженной облучению (см. рис 2.8). Одно из возможных объяснений этого эффекта заключается в возможности фотоиндуцированного дипольного перехода между краевыми состояниями.

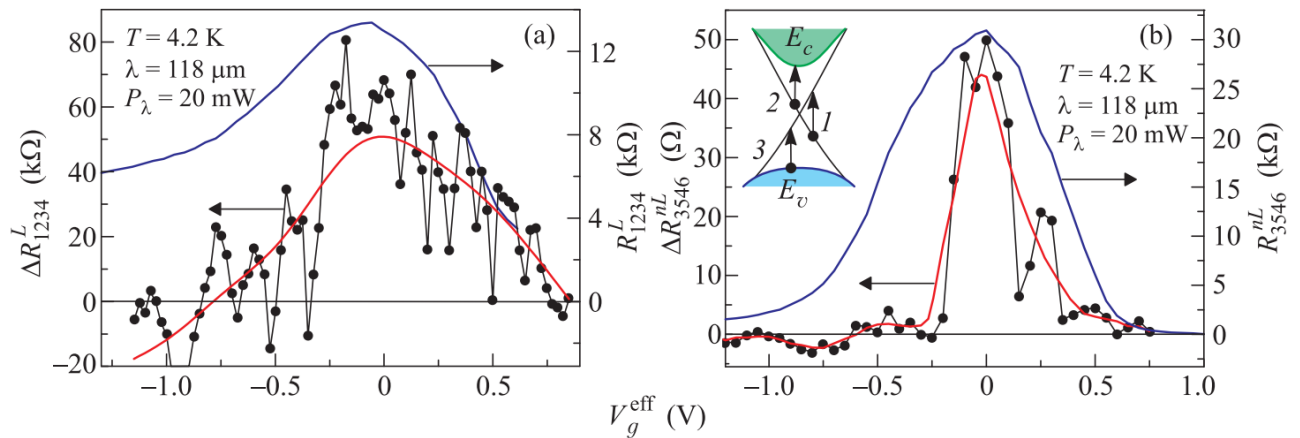


Рис. 2.8. (в цвете) зависимость ((a)) локального, (b) нелокального сопротивления и фотосопротивления от эффективного затворного напряжения; красные кривые – обычное сопротивление, чёрные – фотосопротивление. Картинка из статьи [23].

Связь направления тока и спина на макроскопических расстояниях проявляется, например, в эксперименте с ферромагнитными контактами [13].

2.3.2. Описание сопротивления краевых состояний

Теоретически ожидается, что в системе без магнитных примесей рассеяние назад подавлено, так как оно происходит с переворотом спина, а значит краевые каналы должны иметь баллистический транспорт между контактами. Каждый краевой канал вырожден по спину, см. рис. 2.9. Направлению спина строго соответствует направление импульса, поэтому на этом рисунке каждому краю, верхнему и нижнему, соответствует два одномерных канала

проводимости: со спином вверх и со спином вниз, при этом токи в них имеют различные направления и в равновесии компенсируют друг друга.

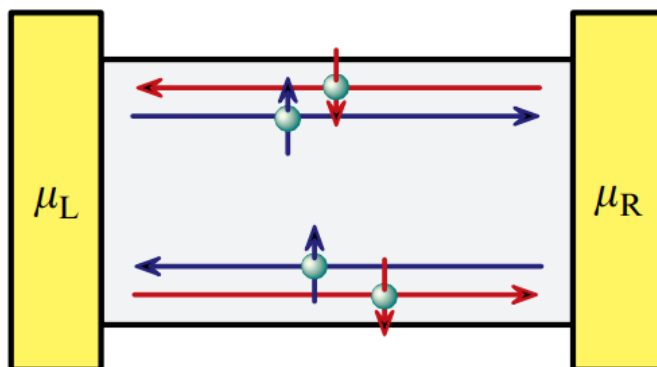


Рис. 2.9. (в цвете) Соответствие направления импульса и направления спина в краевом токе. Рисунок из обзора [10]

Именно такой баллистический транспорт и наблюдается на образцах малого размера [24]. На рисунке 2.10 (а) нарисована схема микронного мостика, в которой измеряется нелокальное сопротивление. Ток пускается через контакты 1-4, напряжение измеряется на контактах 2-3. По формуле Ландауэра-Бютикера сопротивление одномерного канала равно кванту проводимости $R_q = h/e^2$, поэтому электрическую схему образца (объём которого находится в щели) можно перерисовать как на рис. 2.10 (b). Несложный расчет приводит к сопротивлению $R_{14,23} = U_{23}/I_{12} = R_q/4$. Этот эксперимент неплохо согласуется с положением о баллистическом транспорте между контактами. Конечно, для более точного рассмотрения электрической схемы необходимо учитывать механизм, по которому один краевой канал соединяется со вторым, если их разъединяет контакт. Однако сопротивлением между двумя такими последовательными краевыми каналами (оранжевый r на рис. 2.10 (b)) по сравнению с их сопротивлением R_q можно пренебречь.

Положение о баллистичности краевого транспорта в топологическом изоляторе на основе теллурида ртути хорошо выполняется для микроскопических образцов. Однако для образцов с расстоянием между контактами, большим некоторой величины, которая в экспериментах разных групп составляет от 2 до 10 микрон, расчёт эффективной электрической схемы краевых

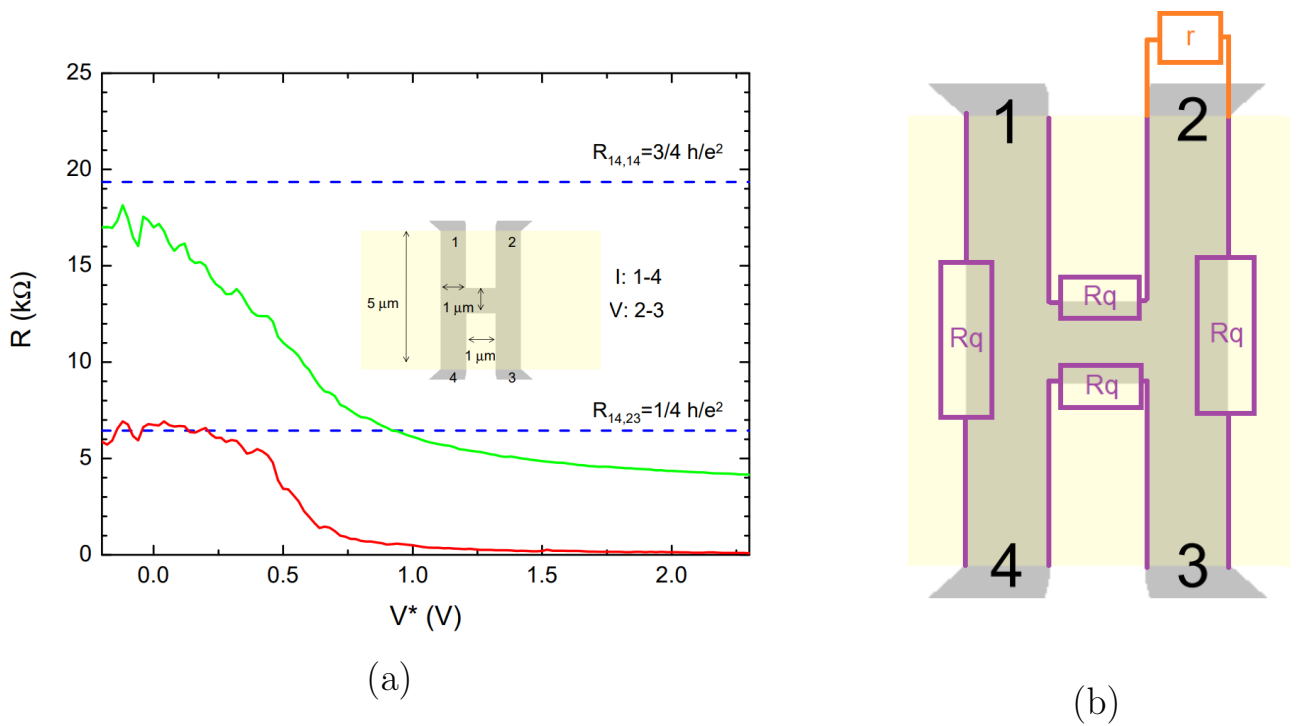


Рис. 2.10. (в цвете) Измерение микронного мостика. (а) результат измерений, (b) эквивалентная схема для тока краевых состояний при непроводящем объёме.

каналов необходимо проводить другим образом. Эффективная электрическая схема для образца с большим расстоянием между контактами изображена на рис. 2.11.

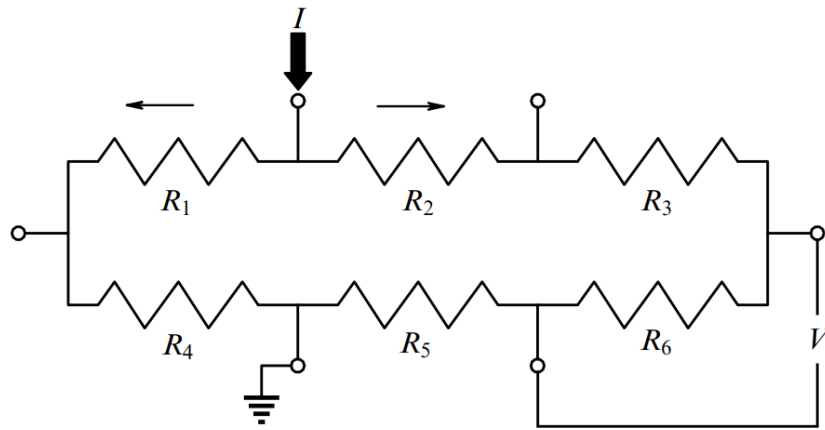


Рис. 2.11. (в цвете) Эффективная электрическая схема для краевых каналов из обзора [10]. Сопротивление краевого канала между двумя контактами $R_k = U_k/I_k = R_q L_k/l$, где L_k – расстояние между контактами, l – длина свободного пробега электронов в этом канале

Естественно, необходимо понимать границы применимости схемы 2.11. Во-первых, при больших значениях тока будет происходить шунтирование

краевых каналов остаточными объёмными [14]. Во-вторых, если два краевых канала расположены на малом расстоянии друг от друга, то между ними существует взаимодействие, приводящее к увеличению сопротивления [25]. Первое явление легко понять из простых классических соображений о поведении тока. Второе положение вызывает интерес.

2.3.3. Взаимодействие краевых состояний

На рис. 2.12 изображена 4-точечная схема измерения сопротивления тонкого перешейка из квантовой ямы. Из рисунка видно, что при некоторой ширине перешейка краевые каналы, текущие по верху и низу перешейка, взаимодействуют таким образом, что вместо ожидаемого для больших перешейков сопротивления $R_q/2$ наблюдается сопротивление R_q . Одна из возможных интерпретаций такова: из-за взаимодействия двух каналов проводимость по одному из них прекращается.

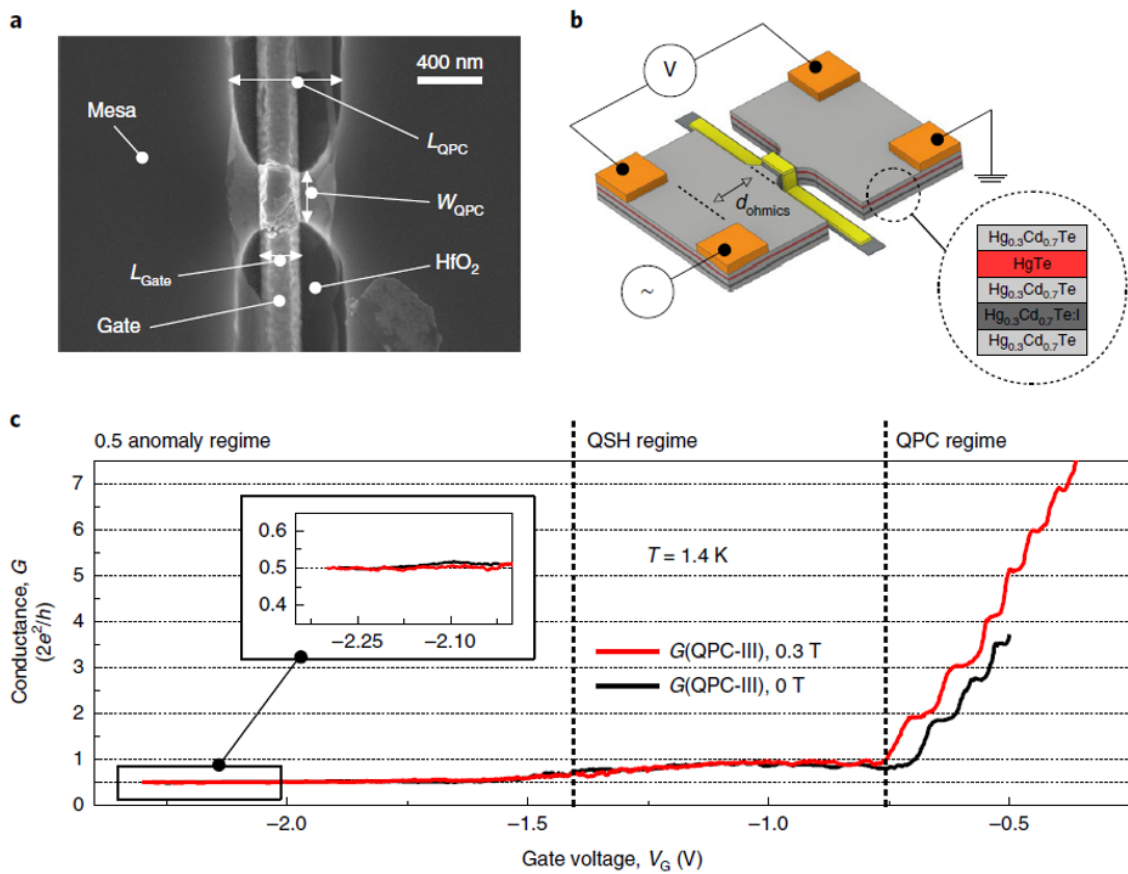


Рис. 2.12. (в цвете) 4-точечная схема измерения сопротивления тонкого перешейка квантовой ямы. Ширина перешейка в эксперименте варьировалась в пределах от 25 нм до 250 нм. Ширина перешейка в измерениях (с) равнялась 150 нм. Из статьи [25].

Глава 3. Постановка задачи

В работе поставлены следующие задачи:

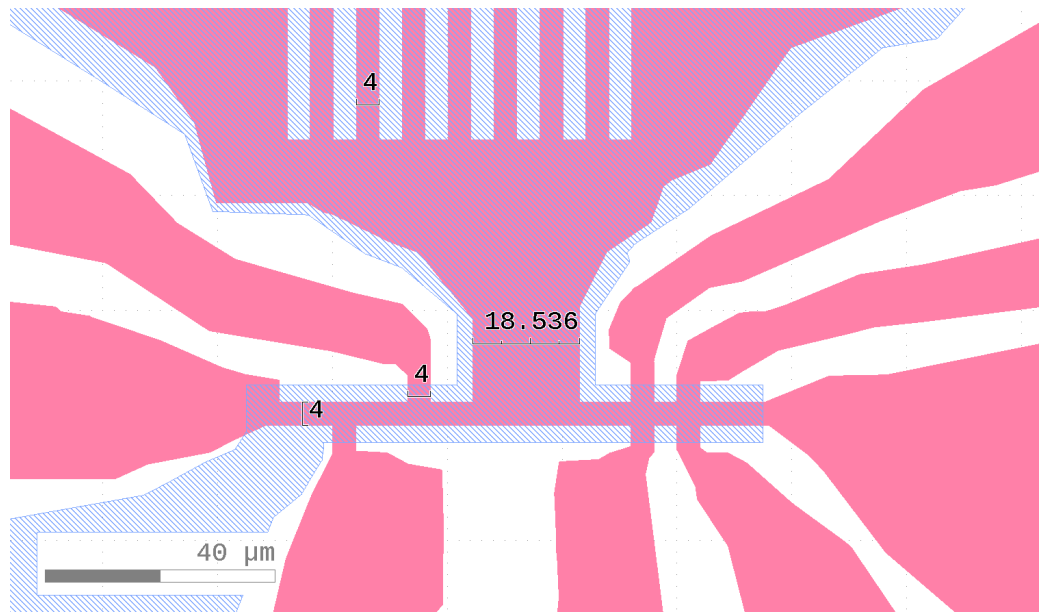
1. Научиться создавать устройства на основе квантовой ямы теллурида ртути и пронаблюдать краевой транспорт.
2. Изготовить и исследовать электронный транспорт в структуре с двумя краями предельно разных размеров: один короткий (размера порядка или на порядок больше длины рассеяния в краевом канале) и один длинный (длина которого много больше длины короткого).
3. Освоить изготовление наноструктур из теллурида ртути посредством литографии атомно-силовым (АСМ) микроскопом и фокусированным ионным пучком и изготовление массивов мелких отверстий, плотно расположенных вблизи одного из краёв для дальнейшего исследования воздействия на рассеяние краевых состояний.

3.1. Изготовление структур и исследование их транспортных свойств

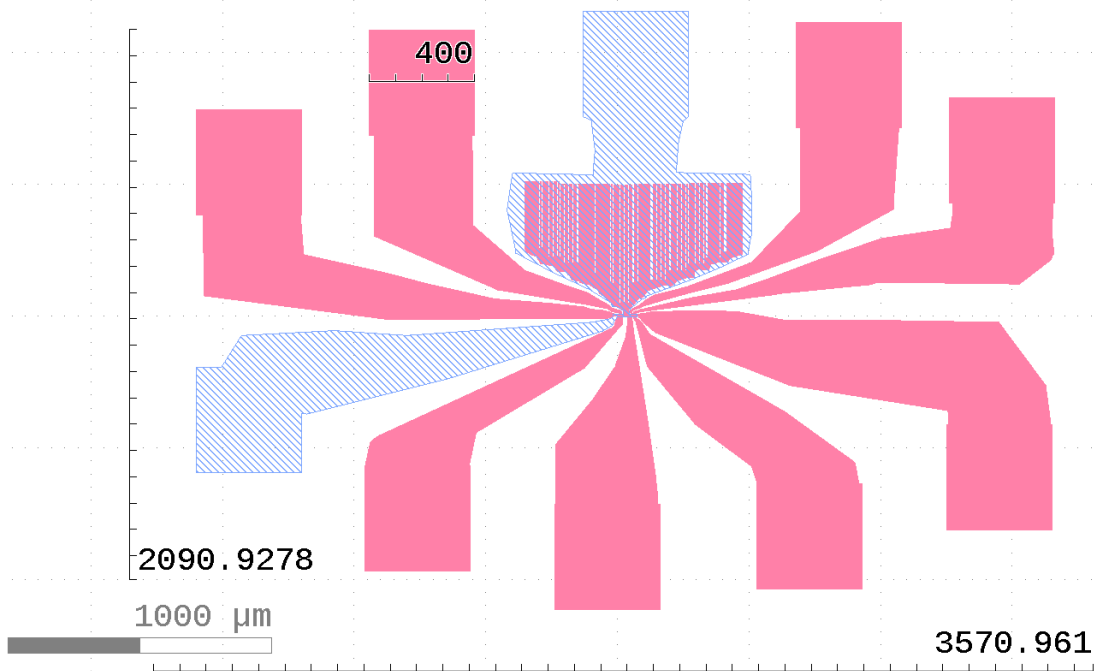
Первая задача этой работы – научиться изготавливать полевые структуры на основе теллурида ртути и измерять электронные свойства устройств на их основе. Только спустя годы после первого наблюдения значения сопротивления, близкого к квантованному в краевых состояниях HgTe группой Моленкампа, этот вид транспорта был измерен в другой лаборатории, см. обзор [10], что показывает технологическую сложность задачи.

3.2. Подавление краевых каналов геометрией

Вторая задача – это создание устройства, в котором присутствовал бы микроскопический и макроскопический край. Длинный (макроскопический) край может быть реализован путем создания ответвления от структуры суммарным периметром порядка 50мм, т.н. “рога”, находящееся под общим затвором. Если сопротивление края пропорционально его длине, то длинный край будет обладать очень малым контактным сопротивлением. Доступная площадь



(a)



(b)

Рис. 3.1. (в цвете) Схема структуры с длинным краем. Красным цветом обозначен слой квантовой ямы, синим – слой затвора. (a) вид мостика, (b) вид всей структуры

этих рогов определялась доступной для использования площадью образца, которая ограничивалась желанием сэкономить материал квантовой ямы, а также размером держателя образца измерительной установки. Минимальный размер элемента рогов определялся возможностями литографии. При

фиксированной доступной площади и фиксированном минимальном размере литографии простейшим вариантом является гребёнка, изображённая на рисунке. Для уменьшения шунтирования объёмом края, все подводящие к маленьким элементам площади изготавливались в максимально возможном размере. Этот размер ограничивался только масштабом мостика и необходимостью разведения областей подвода контактов.

До настоящего момента в литературе не была описана структура такого типа. В работе ставится задача изучить электронный транспорт в ней при описанной выше геометрии образца.

При пропускании тока через контакты i, j и измерении напряжения на контактах k, l схемы 3.2, ожидается увидеть следующие сопротивления на схеме $R_{ij,kl} = U_{kl}/I_{ij}$ в режиме топологического изолятора:

- a $R_{15,76} \gtrsim R_q$ Расстояние между потенциальными контактами равно примерно 10 микронам, поэтому локальное сопротивление на контактах 7, 6 должно равняться или быть немногим больше кванта сопротивления, потому что в этом случае край, проходящий через эти два контакта, будет переносить весь ток из контакта 1 в 5.
- b $R_{15,34} \ll R_q$ Так как через контакты 3, 4 идёт очень мало тока из-за длины соответствующего края, напряжение между контактами 3,4 будет сильно меньше напряжения на контактах 1, 5 в этой же геометрии тока.
- c $R_{18,76} \ll R_q$ Так как контакты 7, 6 лежат на длинном краю в данной геометрии, ток через них будет крайне мал.
- d $R_{73,64} \approx R_{23,18} \gtrsim R_q$ Так как все потенциальные контакты находятся на коротком краю, соответствующие сопротивления должны быть в несколько раз больше кванта сопротивления или равняться ему.

Такой эксперимент покажет, каким образом возможно эффективное отключение проводимости одного из двух краёв структуры. Так как спин частиц краевого тока связан с их импульсом, то впущенный в контакт 1 ток будет выходить из контакта 5 поляризованным по спине. Идея использования пол-

ной поляризации по спину инжектируемого тока будет развита в дальнейшей работе.

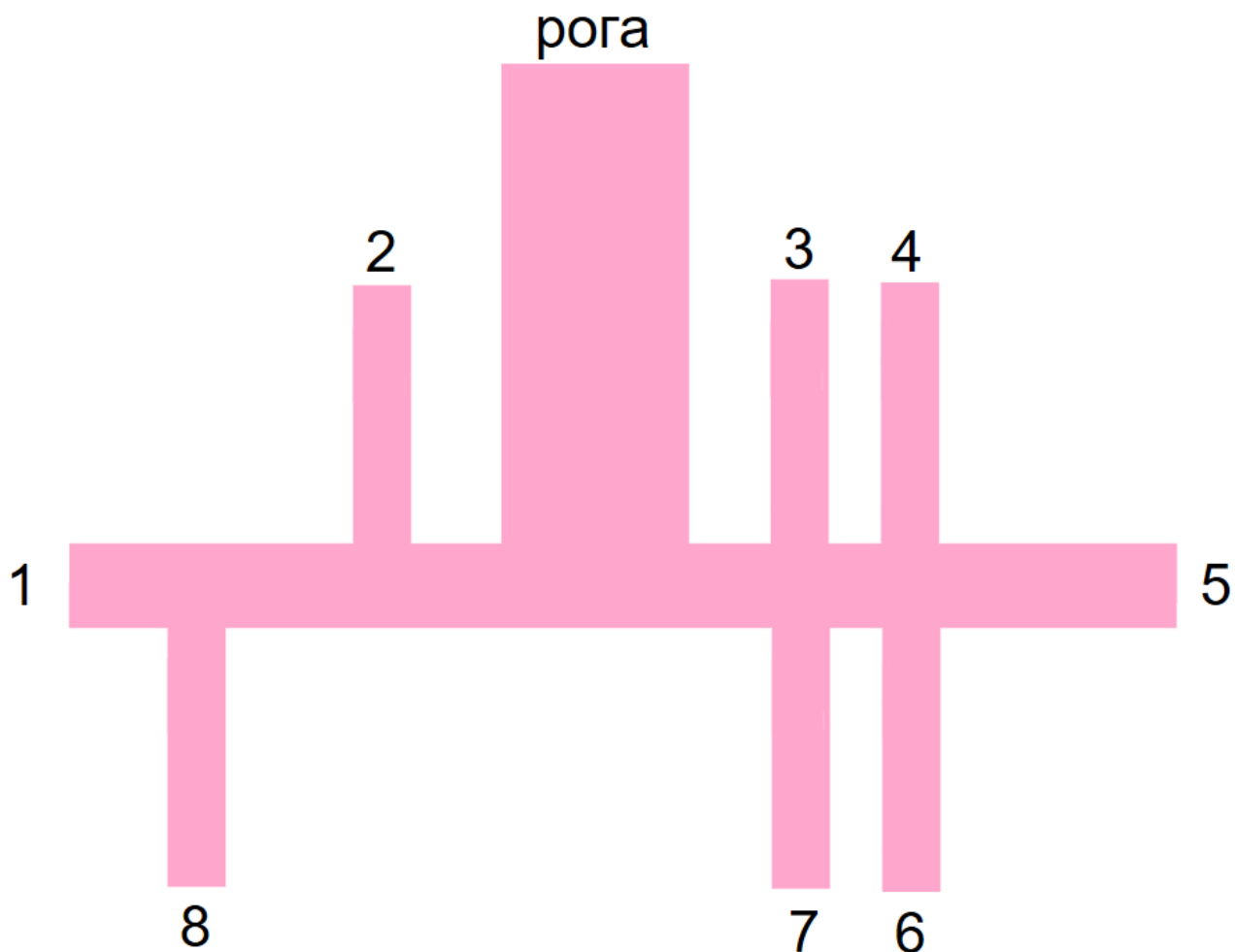


Рис. 3.2. (в цвете) Схема измерения с длинным краем. Весь мостик, включая рога, покрыт затвором. Структура изображена не в масштабе

3.3. Нанопаттернирование образца при помощи АСМ и галлиевого ионного пучка

3.3.1. Литография

В работе ставится задача освоить методику литографии образца с субмикронным разрешением. Также одной из задач является создание дырок диаметра порядка 50нм с аспектным отношением глубина/диаметр, равным нескольким единицам.

Квантовая яма располагается на глубине около 100нм от поверхности, поэто-

му требуется производить деформацию ямы при литографии на глубину не менее этой.

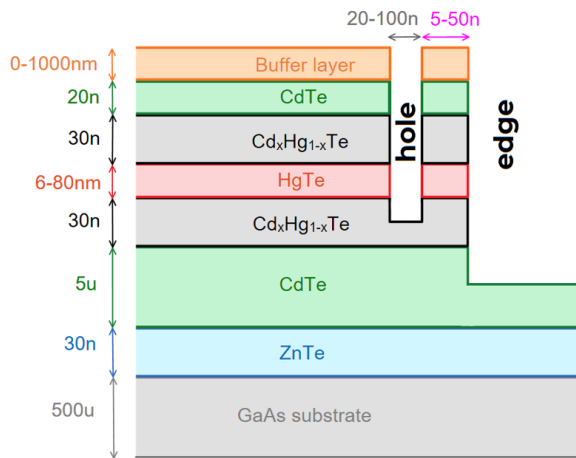
Поверхность образца весьма мягкая, поэтому возможно выполнение литографии образца при помощи иглы атомно-силового микроскопа.

Зонд атомно-силового микроскопа, несмотря на свой малый размер, способен проводить деформацию верхних слоёв мягких веществ [26]. Система его обратной связи может работать на отклонении кантилевера, держателя иглы, от своего свободного положения, поэтому метод литографии при помощи АСМ-зонда не требует проводящих свойств поверхности деформируемого материала.

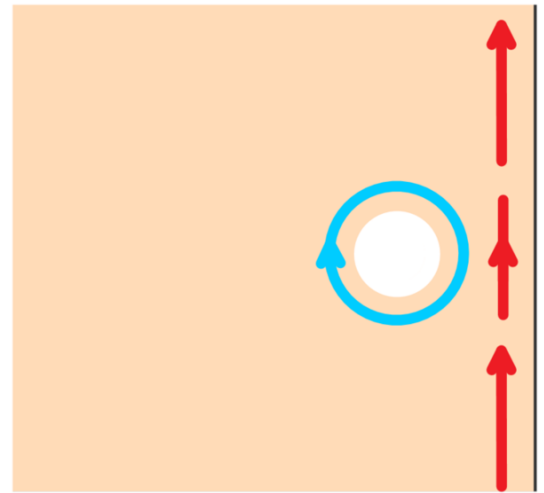
Подобные методы изготовления структуры не были ранее описаны в литературе, и они могут помочь изготовить структуру с нано-элементами для воздействия на рассеяние в краевых каналах.

3.3.2. Изготовление массива отверстий на краю

На рис. 3.3 изображена геометрия края с расположенным возле него отверстием. Размер отверстия и расстояние от него до края определяется шириной волновой функции краевого состояния, которое, по численным расчётам и экспериментам, лежит в пределах от 5нм до 100нм [25]. Если произвести массив отверстий на краю структуры, то возможно будет пронаблюдать взаимодействие состояний на краю структуры и на краю отверстий. Место контакта отверстия и края структуры будет выступать дополнительным рассеивающим центром, так что сопротивление края, возле которого расположен такой массив, должно возрасти. Если поместить систему в слабое магнитное поле, то система «отверстие + край» будет выступать в роли интерферометра Ааронова-Бома, и можно будет пронаблюдать периодическое влияние магнитного поля на сопротивление такого края. Производить мелкие отверстия с глубиной больше ширины труднее, чем неглубокие отверстия. Жидкостное травление убирает материал ямы не только вглубь, но и вбок. Сухое травление приводит к переосаждению материала ямы на стенки отверстия, что также затрудняет производство отверстий такой глубины и ширины.



(a)



(b)

Рис. 3.3. (в цвете) (a) срез структуры с изготовленным отверстием у края. (b) вид на структуру с отверстием на краю сверху; красным обозначены стрелочки краевых состояния структуры, синим – краевые состояния края отверстия

В работе ставится задача освоить производство таких отверстий двумя методами: при помощи АСМ и фокусированного ионного пучка на основе галлия.

Глава 4. Этапы изготовления структуры

4.1. Молекулярно-лучевая эпитаксия квантовой ямы

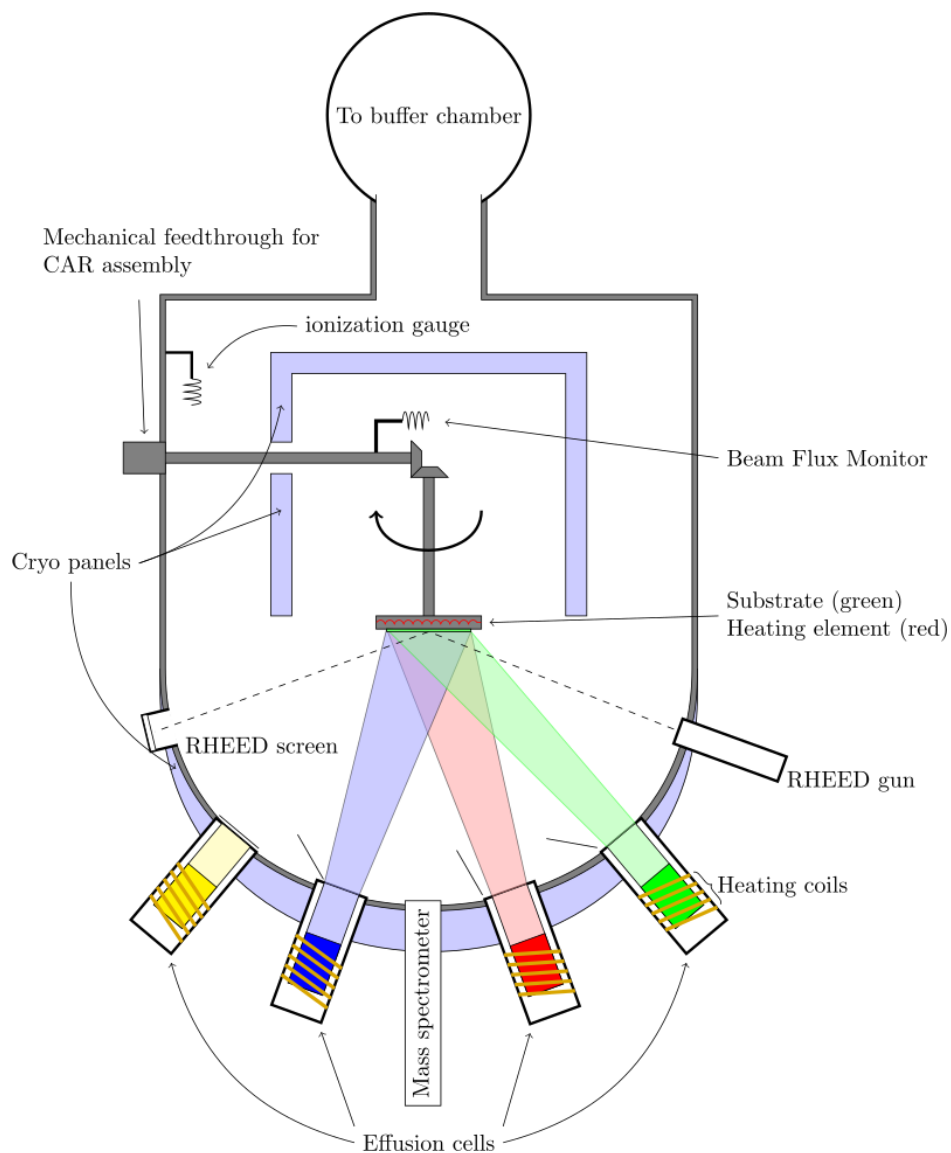


Рис. 4.1. (в цвете) Типичная схема установки молекулярно-лучевой эпитаксии.
Изображение с сайта [27]

Молекулярно-лучевая эпитаксия – известный метод выращивания гетероструктуры заданной толщины с атомно гладкими гетерограницами. Производством квантовых ям теллурида ртути разные группы занимаются ещё с прошлого века. Но только относительно недавно, в середине 2000-х годов, в группе Моленкампа в Вюртсбурге и в группе Михайлова в Новосибирске

удалось вырастить ямы с достаточной чистотой для изучения топологических эффектов.

Процесс молекулярно-лучевой эпитаксии представляет собой послойный рост структуры на атомарно-гладких подложках. Нарращивание структур этим методом отличается от обычного относительно дешёвого термического или магнетронного напыления материала на подложку по нескольким параметрам. Во-первых, в установке поддерживается высокая чистота всего: подложки, вакуума, напыляемого материала и т.д. Во-вторых, отличается принцип напыления: при молекулярно-лучевой эпитаксии температура подложки контролируется таким образом, чтобы осаждаемые на её поверхность атомы диффундировали вдоль поверхности до тех пор, пока не встанут в ячейку кристаллической решётки.

Выращиваются пластины квантовой ямы теллурида ртути с различными толщинами (имеются структуры как с инвертированным, так и с неинвертированным спектром, а также структуры с полуметаллическим спектром), разным уровнем допирования ионами и разными толщинами других слоёв.

Квантовая яма не деградирует на воздухе и, несмотря на свою мягкость, может без проблем выдержать транспортировку и хранение в обычных зип-пакетах без дополнительной защиты инертной атмосферой.

4.2. Создание микроструктуры

4.2.1. Обращение со структурой

Слои, нанесённые на подложку весьма мягкие, а сама подложка относительно хрупкая (может разбиться от падения на пол с метровой высоты), поэтому обращаться с ней следует аккуратно. Работу с ней также немного усложняет ориентация подложки (013), в которой боковые стороны структуры при сколе не перпендикулярны плоскости основания. Из-за этого она соскальзывает с пинцета, если взять им структуру за противоположные боковые стороны (в отличие, например, от кремниевой подложки ориентации (100)).

Для большинства технологических операций и раскалывания структура покрывается слоем резиста для дополнительной защиты хранимого куса квантовой ямы от механических и иных повреждений. Если этого не сделать,

то после резки большой структуры на более мелкие, структура покрывается механическими дефектами, которые могут привести к ненужным эффектам в дальнейшем.

4.2.2. Резка структуры

Для экономии материала большие подложки с нанесёнными на них квантовыми ямами нарезаются на более мелкие. Для этого используется скрайбер в виде ручки с твёрдым остриём. Для нарезки пластины необходимо провести прицельную царапину от одного до другого края, а затем медленно с постепенно усиливающимся перпендикулярным давлением царапать всё большую и большую линию. В какой-то момент из-за усилившегося давления и наличия глубокой царапины подложка треснет вдоль царапины сама. В процессе такого царапанья образуется много крошки из подложки, так что иногда следует очищать рабочую поверхность струёй сжатого воздуха; струя воздуха и уносимая ей мелкая крошка не наносит заметных повреждений структуре. Обычно достаточно провести 10-20 раз скрайбером по одному и тому же месту, после чего подложка трескается по «линии перфорации». Иногда для этого требуется заметно меньше или наоборот больше итераций в силу, вероятно, переменчивого настроения экспериментатора. Получаемая таким образом ширина испорченной скрайбером области структуры составляет порядка 200-300 микрон на каждой половине расколотой подложки.

4.2.3. Приклеивание к кремниевой подложке

Для облегчения работы с теллуридом ртути сразу после откалывания кусочка пластины нужного размера необходимо приклеивать его к большей по размеру кремниевой подложке (см рис. 2.3). Перед приклеиванием к кремниевой подложке предварительно чистится дно подложки ямы от мусора во избежание непараллельности подложек. Чистка проводится струёй сжатого воздуха, по необходимости перед этим поверхность обезжиривается ацетоном, изопропанолом и водой. Такая очистка необходима для того, чтобы выдержать параллельность низа кремниевой подложки и верха подложки ямы для качественного процесса литографии в дальнейшем (на используемом лазерном литографе высота объектива фиксируется относительно держателя пластины до начала литографии, поэтому важно чтобы верх ямы был ему параллелен). При дальнейшей работе со структурой необходимо производить

процесс литографии только убедившись в чистоте низа кремниевой подложки, так как на него может налипнуть клей, резист или другой мусор.

Наклеивание образца на подложку-носитель заметно упрощает обращение с ним: позволяет брать пинцетом за любой удобный участок кремниевой подложки, не боясь повредить квантовую яму, позволяет без опасения поломки подложки квантовой ямы отклеивать структуру от двустороннего скотча, позволяет производить нанесение резиста на квантовую яму любого размера, даже если этот размер меньше диаметра отверстия присоски центрифуги, при помощи которой наносится фоторезист.

Отклеивание квантовой ямы от подложки происходит в конце всех технологических процессов и перед монтированием образца в измерительную установку. Квантовая яма, приклеенная к кремниевой подложке, помещается в нагретый ацетон и пинцетом постепенно раскачивается за края в плоскости структуры, таким образом отклеиваясь от кремния. При таком отклеивании следует избегать чрезмерных усилий, а также усилий, направленных не в плоскости образца, так как если попытаться отклеить структуру силой, направленной перпендикулярно плоскости подложки, велик шанс сломать квантовую яму. После отклеивания от образца при необходимости откалываются ненужные кусочки, затем образец монтируется в ЛСС держатель.

Размер двустороннего скотча, на который приклеивается квантовая яма к кремниевой подложке, может быть как меньше, так и больше размера ямы. В случае, когда скотч не вылезает из-под ямы, затрудняется работа с квантовыми ямами малых размеров, поскольку трудно отрезать такой кусочек скотча, чтобы яма лежала на нём параллельно плоскости кремния. Поэтому в работе используются кусочки скотча, по размеру чуть превосходящие размеры приклеиваемой ямы. При таком подходе можно брать пинцетом за тот кусочек скотча, который будет лежать на кремнии не под ямой, из-за чего деформация скотча вследствие давления пинцета не скажется на параллельности подложек. Однако неполное покрытие ямой скотча вызывает некоторые дополнительные особенности работы с такой конструкцией: при работе с растворителями (в частности, с ацетоном) необходимо каким-то образом минимизировать вероятность попадания растворённого клея на поверхность ямы. Если клей всё же попал на поверхность ямы, её следует промыть под сильной прямой струёй ацетона – в большинстве случаев это полностью уби-

рает скотч с поверхности ямы. Вероятность отклеивания ямы от скотча или скотча от кремния при воздействии ацетона крайне мала, так как он не затекает в область под структурой.

4.2.4. Литография

Для создания структуры необходимо каким-либо образом удалить ту площадь квантовой ямы, которая не должна оказаться в итоговой структуре, см. рис. 4.2. Под удалением площади ямы подразумевается удаление слоя ямы, включая проводящий слой HgTe. Для некоторых экспериментов возможно удаление слоя ямы вплоть до GaAs подложки, однако удаление такого большого слоя приводит к сложности создания структур с микронным разрешением из-за перепада высот (см. далее).

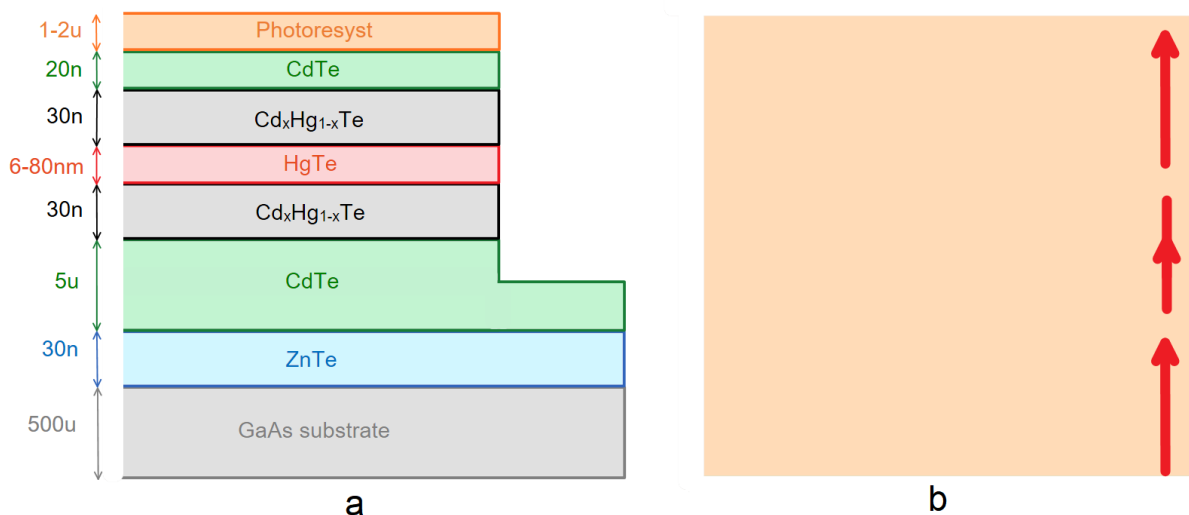


Рис. 4.2. (в цвете) (а) срез структуры после нанесения фоторезиста и после травления; (б) вид на структуру сверху. край структуры обозначен чёрной линией, красными стрелочками обозначены краевые состояния

Для удаления выбранной области ямы обычно используется травление – сухое (плазмой, направленным пучком ионов) или мокрое (при помощи жидких травителей). В обоих случаях необходимо обеспечить избирательность травления, с чем отлично справляется литография.

В основе процесса литографии лежит резист – некоторое вещество, обычно полимер, который изменяет свои свойства под действием света, электронов или ионов. После избирательного воздействия на него возможно уда-

ление засвеченной (фотонами, электронами или ионами) части при помощи проявителя резиста. Таким образом получается слой резиста, который покрывает выбранную часть подложки, в то время как другая часть подложки оказывается не покрыта ничем.

В данной работе используется фотолитография.

Оптическая литография может осуществляться лазерным и масочным методом. В первом методе засветку осуществляет сфокусированный луч лазера, во втором на подложку с нанесённым фоторезистом направляется параллельный пучок света (для однородной засветки всех частей резиста), а для избирательной засветки между источником света и подложкой помещается преграда для света – маска, заранее изготовленная при помощи лучевой литографии. Высокого разрешения при помощи масочной литографии как правило добиваются при приведении в контакт маски и подложки, однако в силу того, что квантовая яма весьма мягкая, соприкосновение твёрдой маски с ямой на всей её площади может привести к деформации теллурида ртути. Высокого разрешения лазерной литографии достигают за счет фокусировки качественного пучка микрообъективом. В работе используется медленная (процесс лучевой литографии может занимать порядка часа, в отличие от масочной, которая занимает около минуты), но надёжная технология лучевой литографии.

Процесс литографии происходит в четыре этапа [28].

1. Сначала на подложку наносится тонкий (200нм-4000нм) слой резиста. Толщина наносимого резиста зависит от целей: для повышения, например, разрешения литографии, толщина резиста обычно берётся как можно меньше; для процесса лифт-оффа, о котором речь пойдёт ниже (в подсекции о нанесении затвора), наносится толстый слой резиста для того, чтобы растворитель мог эффективно удалить слой резиста из-под слоя затвора. Резист наносится при помощи спинера – устройства, раскручивающего подложку до заданных угловых скоростей вокруг оси, проходящей через подложку. Регулируя скорость, ускорение и время раскрутки подложки с нанесённой на неё до раскрутки пипеткой кап-

лей резиста, возможно регулировать параметры получившейся плёнки резиста: чем больше скорость вращения, тем тоньше получается плёнка. Для нанесения резиста необязательно использовать специализированные дорогостоящие установки. Если требования к разрешению литографии не слишком высоки, может использоваться недорогой медицинский спинер для разделения крови с приклеенной на скотч у оси вращения подложкой.

2. После нанесения слоя резиста его необходимо высушить, так как невысушенный он обладает малой вязкостью, позволяющей ему при нанесении спинером покрыть подложку тонким слоем. Сушка может происходить при разных температурах: чем меньше температура, тем больше времени занимает процесс. Так, при комнатной температуре на сушку резиста уходит порядка суток. Большинство термоустойчивых подложек сушатся 1 минуту при температуре 100°C на лабораторной печи, однако квантовая яма очень чувствительна к температурам выше 80°C [29], поэтому все процессы, включая сушку, не должны проходить при слишком высоких температурах. Все используемые резисты 10 минут сушатся на печке при температуре 80°C . Если начать литографию не осушив резист, это крайне негативно скажется на её качестве.

3. После сушки резиста наступает пора делать литографию. В работе используется лучевой литограф Heidelberg uPG 101, на котором отработано разрешение около 1.5-2 микрон. Литограф осуществляет засветку при помощи 405нм лазера, поэтому фундаментальное ограничение на разрешение литографа равно по порядку длине волны этого лазера. Для целей работы, однако, этого разрешения хватает.

Образец крепится к вакуумной присоске литографа, в программе на компьютере задаётся необходимый рисунок литографии, шаговыми двигателями с точностью 100 нм микрон производится XYZ-позиционирования подложки относительно объектива, через который осуществляется засветка лазером, а при помощи Z-пьезоподвижки точно настраивается фокус объектива. После этого начинается процесс литографии. Данный литограф обладает камерой, которая позволяет совмещать шаблон со структурой на подложке. Это необходимо для лито-

графии затвора, который располагается в заданном месте относительно структуры квантовой ямы.

4. После засветки необходимой области лазером, резист необходимо проявить. Для этого в работе используется УПФ-1Б фирмы Фраст-М [30], предназначенный для проявления позитивных резистов (позитивный резист удаляется проявителем в засвеченной области). Образец помещается в небольшую ёмкость с налитым проявителем и держится там 30-50 секунд с переменным помешиванием проявителя подложкой, после чего остатки проявителя смываются водой. После всех необходимых манипуляций, проведённых с литографией на структуре, остатки резиста удаляются ацетоном. Время проявления резиста определяется на глаз: если стравливать большую область (хотя бы 400 на 400 микрон), то становится видно, как засвеченный позитивный резист растворяется. Если передержать резист на несколько лишних минут в проявителе, ни к каким негативным эффектам это не приводит. Если недодержать, то проявится не весь резист, что может сказаться на качестве последующих работ с ним.

Результат литографии изображён на рис. 4.3

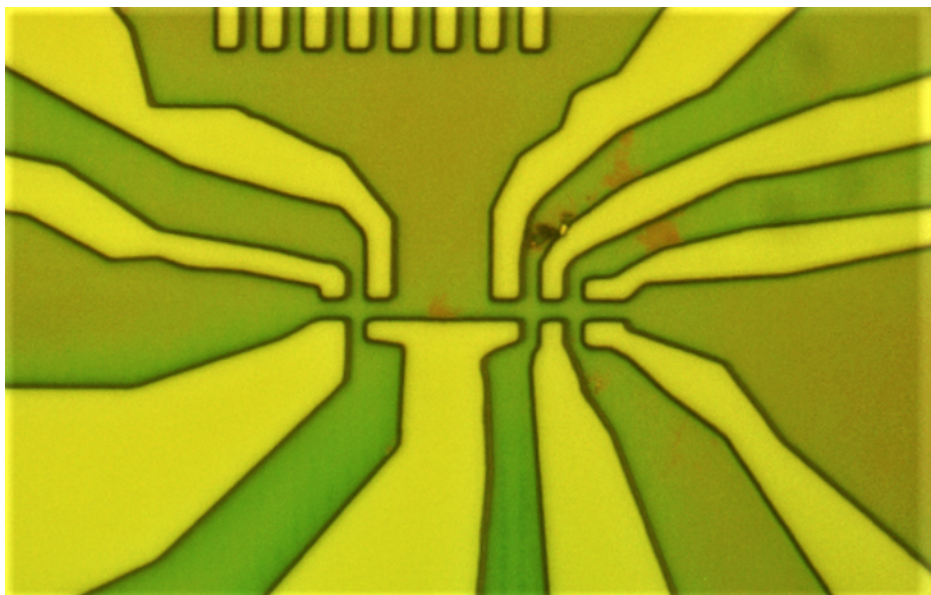


Рис. 4.3. (в цвете) Фотография литографии на поверхности квантовой ямы. Ширина мостика равна 4 мкм. Жёлтая область – поверхность ямы, более зелёная область – фоторезист

Для использованного резиста на основе метоксипропилацетата было выявлено, что если сделать литографию, смыть резист ацетоном, сделать литографию ещё раз, а затем протравить структуру, то останутся следы первой литографии, см. рис. 4.4. Даже если смывать слой первого резиста в ёмкости с нагретым ацетоном в ультразвуковой ванне, эффект истории литографии при травлении всё равно остаётся. Возможно, смывается таким образом не весь резист или же он вступает в какую-то реакцию с верхними слоями ямы. При травлении область, на которой до этого располагалась первая литография, травится, но травится чуть медленнее нетронутой первой литографией области.

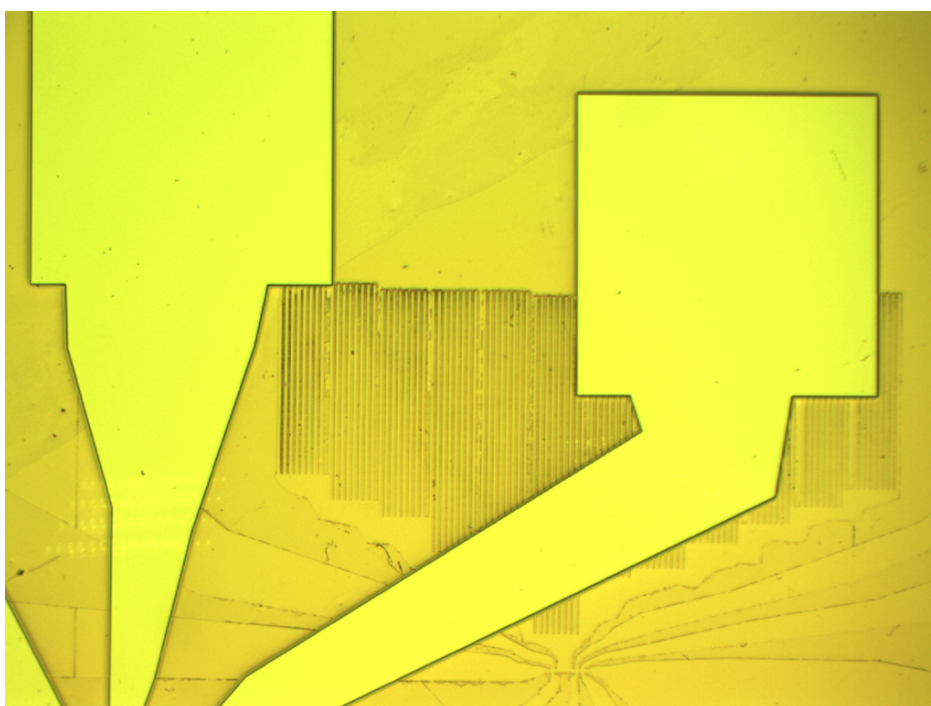


Рис. 4.4. (в цвете) Фотография структуры после травления. Область последней литографии, по которой производилось травление, отчётливо видно по цвету и тёмному контуру. История первой литографии на изображении видна в виде менее контрастного тёмного контура.

4.2.5. Травление структуры

Травление HgTe осуществлялось при помощи водного раствора KI, I₂, HBr, что давало гладкий профиль травления [31]. В работе используется следующий рецепт травителя: 1.0г KI смешивается с 0.025г I₂ и 3.1ml раствора HBr, затем данная смесь разбавляется водой до объёма 100 мл. Для быстрого растворения всех элементов в растворе баночка с травителем на некоторое

время помещается в ультразвук. Скорость травления данного раствора определяется в том числе тем, была ли размешана баночка с травителем перед тем, как травитель был налит в ёмкость для разового травления структуры. По этой причине и по причине неоднородной скорости травления разных слоёв ямы время травления подбирается экспериментально. При слишком большой скорости травления раствор можно разбавить водой для уменьшения этой скорости.

Глубину травления (и высоты других элементов, например, высоты нанесённого резиста) грубо можно определить при помощи фокусирования микроскопа с максимальным увеличением поочерёдно на стравленную и нестравленную область с дальнейшим пересчётом требуемого для этого поворота ручки Z-позиционирования микроскопа в высоту травления. Таким образом удавалось определить глубину травления с точностью порядка 30%. Для более точного контроля глубины травления используется атомно-силовой микроскоп.

При травлении необходимо убедиться, что во всей необходимой области образца квантовая яма стравилась ниже слоя HgTe. Для этого можно как использовать атомно-силовой микроскоп (см. рис. 4.5), так и пронаблюдать слой HgTe явно в электронный микроскоп (см. рис. 2.2 (b)). В данной работе для этих целей используется АСМ в силу простоты метода. При анализе глубины ямы необходимо убедиться, что она стравилась до нужной глубины на разных областях ямы, так как скорость травления зависит в том числе и от площади травления. Так, глубина травления у больших контактов может отличаться от глубины травления у микронной структуры, см. рис. 4.5. При работе с атомно-силовым микроскопом необходимо быть аккуратным, так как игла микроскопа способна поцарапать структуру.

Фотография структуры после травления и удаления остатков резиста ацетоном изображена на рис. 4.6. Травить структуру с мелкими элементами до подложки жидким травителем трудно, т.к. травление происходит не только вглубь структуры, но и в её бока, поэтому форма желаемой структуры деформируется. При литографии рисунка структуры используется фоторезист ФП-2506 фирмы ФРАСТ-М. Он наносится на подложку на спиннере, раскрученном до скорости 6 тысяч оборотов в минуту, в течение 1 минуты. Затем сушится на печке при температуре 80°C 10 минут. При литографии

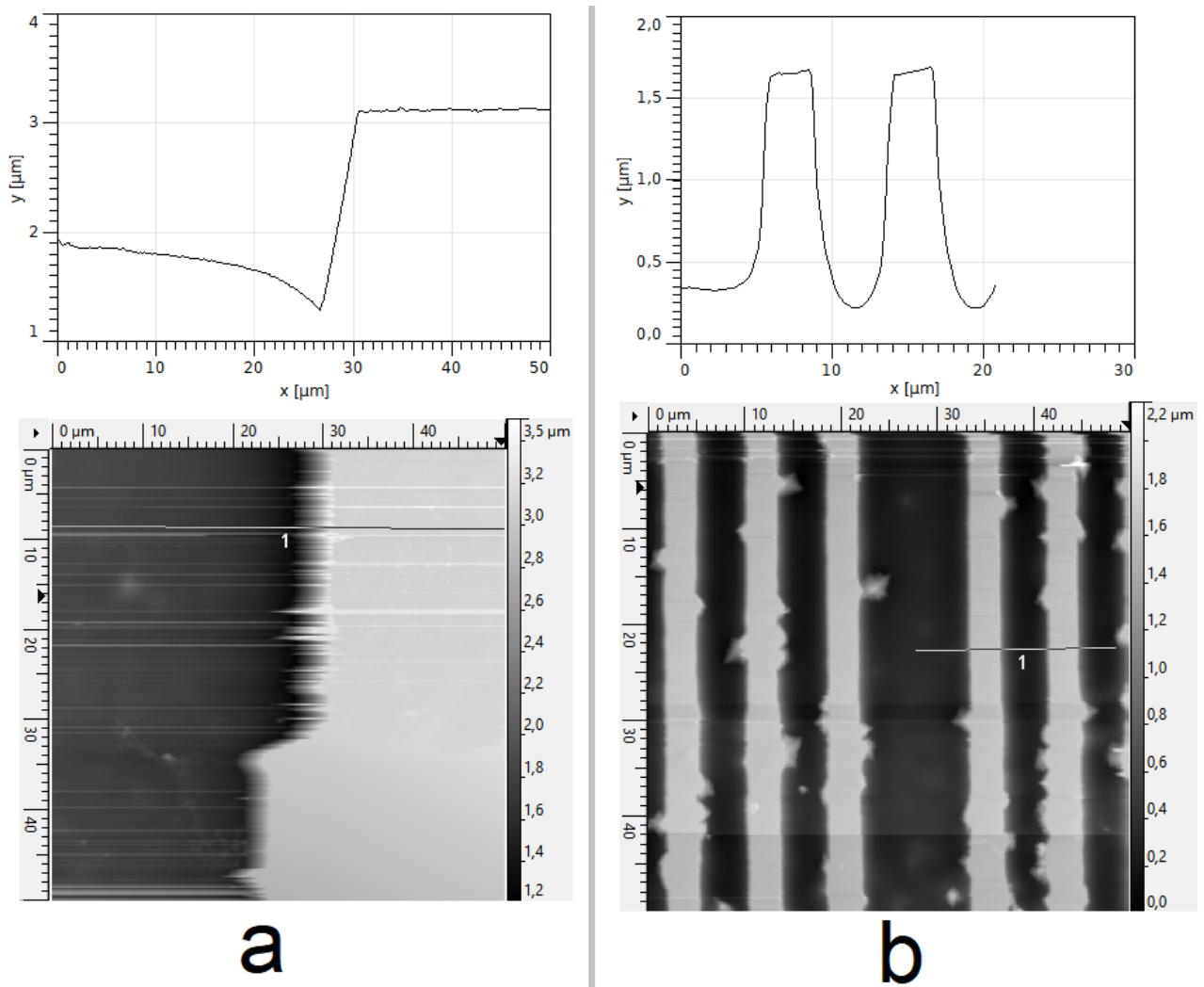


Рис. 4.5. АФМ изображение и профиль поверхности (а) области у контакта шириной 400 микрон и (b) области с полосками, каждая шириной 4 микрона.

Детализированность картинки можно увеличить, увеличив время сканирования. Так, область между полосками на рисунке (b) на самом деле имеет более угловатую форму.

используются мощность излучения лазера в 10 мВт. Такие параметры литографии подбирались экспериментально для данной марки резиста и для данной поверхности подложки. Если использовать другой резист или другую подложку, то параметры литографии должны быть другими.

4.2.6. Напыление диэлектрика

В качестве диэлектрика используется парилен (поли-пара-ксилилен). Этот материал удобен тем, что он наносится при комнатной температуре, что важно для работы с легкоплавкими материалами, инертен ко многим химическим веществам, в том числе к ацетону, некоторым кислотам и щелочам.

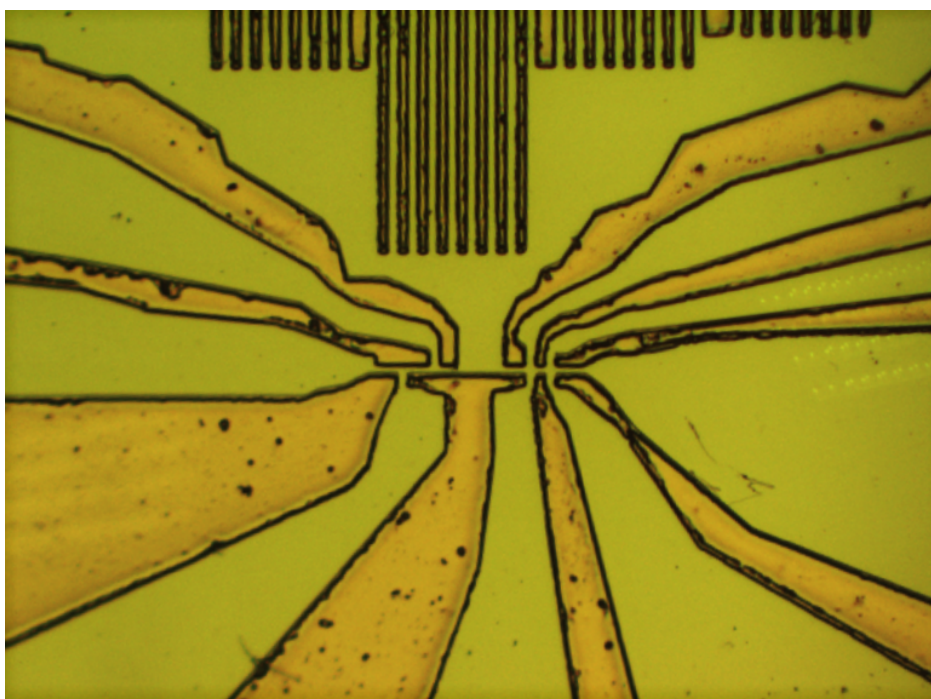


Рис. 4.6. (в цвете) Структура, стравленная на глубину около микрона.

Его адгезии к слою ртуть-теллура и прочности тонкой плёнки достаточно для удобной работы с ним. Также он имеет хорошую адгезию к алюминию, позволяя использовать этот металл в качестве затвора. Золото имеет плохую адгезию с париленом, так что, находясь в ацетоне, отклеивается от него в виде плёнки. Парилен также имеет хорошие диэлектрические свойства, что позволяет использовать его в качестве подзатворного диэлектрика. Плёнка толщиной несколько микрон без заметных изменений выдерживает напряжение в десятки вольт.

Схема установки напыления изображена на рис. 4.7, фотография – на рис.



Рис. 4.7. (в цвете) Схема установки напыления парилена

4.8. Образец и каретка с париленом помещаются в кварцевую трубку в разные её концы. Трубка откачивается форвакуумным насосом до давления около 1

торр. На вход форвакуумного насоса надета азотная ловушка, предотвращающая засорение насоса париленом и натекание паров масла из насоса в кварцевую трубку. Пространство между образцом и париленом нагревается печкой до температур $700-800^{\circ}\text{C}$, а парилеи нагревается второй печкой до температур $100-120^{\circ}\text{C}$. При такой конфигурации парилеи, стартуя с одной своей молекулярной фазы в каретке, последовательно переводится в несколько других фаз, последняя из которых оседает на подложке тонким, почти равномерным слоем. Неоднородность толщины нанесённого слоя оценочно составляет порядка 1 нм толщины на 10 мкм смещения вдоль подложки. Во время процесса напыления из-за большой длины кварцевой трубки и наличия в ней вакуума, образец не нагревается сильно выше комнатной температуры. Контроль скорости напыления можно проводить, создав обратную связь при помощи кварцевого датчика, помещённого возле подложки, однако для целей работы такая точность контроля была бы излишней. В работе используется смотровой способ контроля толщины напыления: в процессе напыления парилеи периодически меняется цвет структуры, см рис. 4.9. Как правило, плёнка парилеи напыляется до тех пор, пока подложка в третий раз не станет фиолетовой (толщина порядка 650 нм). Такой толщины хватает, чтобы плёнка не рвалась и не трескалась (см. рис. 4.10) под внешним воздействием струи ацетона, других жидкостей и воздуха, а также от кипящего ацетона. Напылённый парилеи изображён на фото 4.11 (а).

4.2.7. Нанесение затвора (гейта)

Напряжение на затворе позволяет менять концентрацию носителей в структуре, а также менять уровень Ферми в системе. В качестве затворного электрода была выбрана плёнка распространённого и простого в обращении алюминия. Попытки напылить на парилеи золото не удались, т.к. этот металл плохо адгезируется на нём. Алюминий напылялся на подложку при помощи установки Plasys MEV550S, которая испаряет металл пучком ускоренных напряжением 10 кВ электронов. Температура подложки при этом остаётся комнатной. Такая установка позволяет напылять металл с нанометровым контролем толщины.

Затвор можно наносить двумя способами: нанести равномерный слой металла, а затем удалить ненужную часть, или нанести металл на парилеи

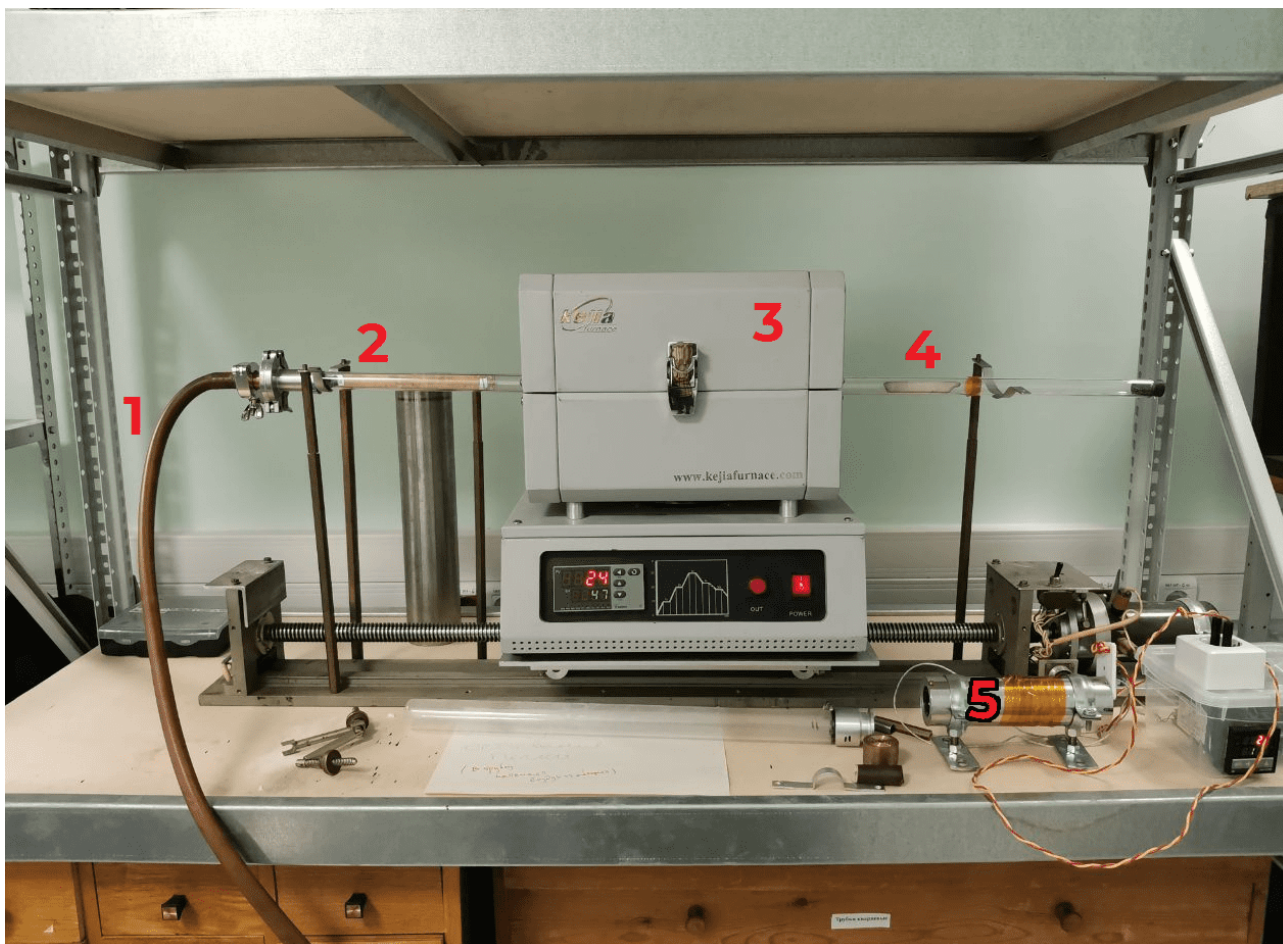


Рис. 4.8. (в цвете) Фотография установки по напылению парилена. Под цифрой 1 обозначен шланг откачки насоса; под цифрой 2 обозначен край кварцевой трубки, в которой располагается образец; под цифрой 3 обозначена печь, нагреваемая до 800°C ; цифрой 4 обозначена каретка с париленом, находящегося в ней в виде порошка; цифрой 5 обозначен нагревательный элемент, надеваемый на трубку так, чтобы каретка с париленом оказалась внутри него

только в нужной области. В первом случае удобно удалять металл при помощи травления, во втором – наносить металл при помощи технологии lift-off:

травление В работе использовались два способа травления – кислотный и щелочной. Поверхность структуры даже после напыления парилена остаётся ступенчатой, с перепадами высот, сопоставимыми с глубиной травления. Поэтому в обоих случаях для качественной литографии резист ФП-2506 наносился на малых оборотах – 2.5 тысячи оборотов в минуту. Сушился резист стандартным образом, 10 минут при температуре 80°C .

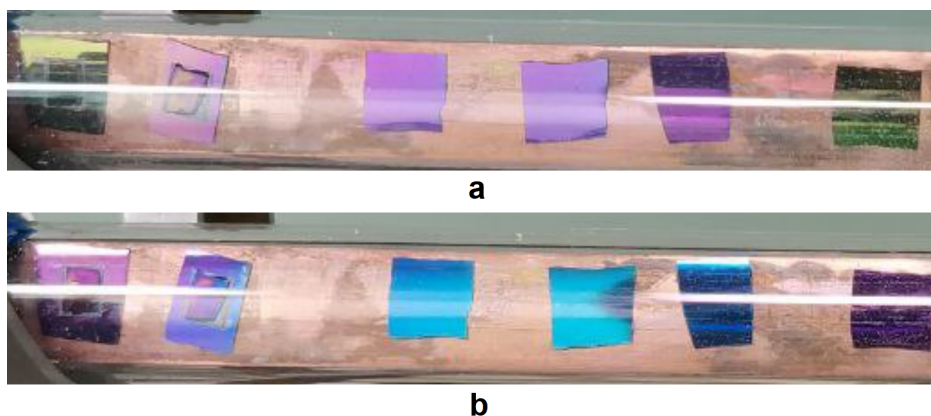


Рис. 4.9. (в цвете) Изменение цвета подложки в зависимости от времени и расстояния от источника парилена. Фотография (а) сделана на 25 секунд позже фотографии (б). На каждой фотографии 4 правых подложки – подложки кремния, левые две – структуры теллурида ртути, приклеенные на кремниевые подложки. Фотографии сделаны примерно под одним ракурсом. Источник парилена на снимках расположен справа.

Для кислотного способа использовался травитель на основе азотной кислоты $\text{HNO}_3/\text{H}_3\text{PO}_4$ [32]. Основная сложность в работе с ним в том, что азотная кислота реагирует с квантовой ямой. Из-за её паров, случайно попавших в место хранения образцов, было потеряно несколько относительно больших пластин квантовых ям. Несмотря на то, что парилен кажется непрерывной прочной плёнкой, не пропускающей в отсутствие трещин или других дефектов жидкость, в том числе травитель, азотная кислота вступает в реакцию с квантовой ямой, см. рис. 4.11. После повторного травления одной ямы её поверхность теряла свой цвет, приобретённый после напыления парилена, поверхность становилась более блестящей и тёмной, терялось различие в цвете и матовости между областью контактов и стравленной областью, структура теряла свою мягкость, её невозможно было поцарапать небольшим надавливанием пинцета (в отличие от структуры, не подверженной влиянию азотной кислоты). По этой причине было решено отказаться от метода производства затвора путём травления его в азотной кислоте. Травление слоя алюминия толщиной 50нм длилось около минуты.

Для щелочного способа использовался травитель на основе КОН. Разведя его в воде, удалось протравить слой алюминия толщиной 50нм при-

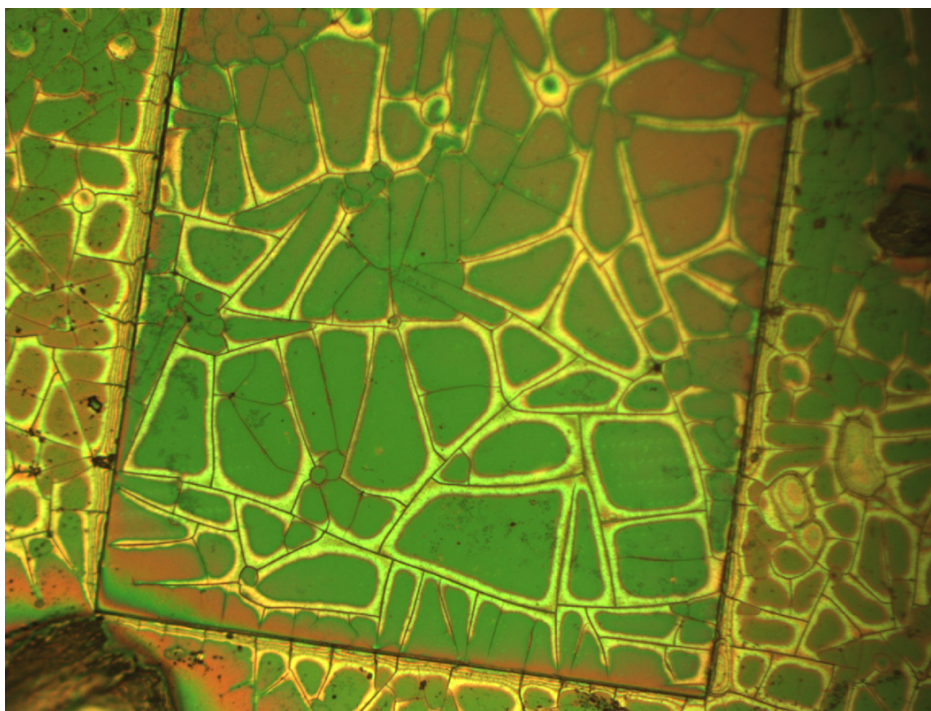
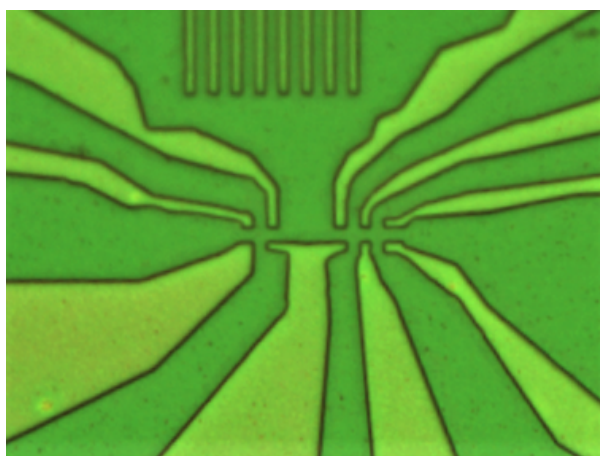


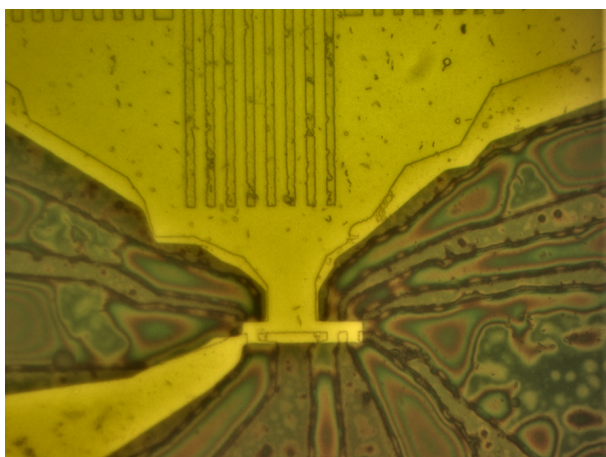
Рис. 4.10. (в цвете) Потрескавшийся парилен на поверхности квантовой ямы. Толщина парилена соответствует первому синему цвету при напылении парилена (одна из самых маленьких толщин, которые можно напылить, ведя контроль напыления глазами). Парилен потрескался после того, как лежал в ванне с подогреваемым ацетоном. Нагрев был такой силы, что ацетон кипел, образуя пузырьки на образце. Возможно, именно кипение на образце привело к растрескиванию парилена. Через трещины под парилен смогла затечь жидкость (парилен, изопропанол или вода) при его промывке, которая спустя минуту после сушки струёй воздуха испарилась. Тем не менее, короткого замыкания структуры на затвор в этом образце не произошло, структура затвора не была нарушена. Напыление затвора произошло до растрескивания парилена.

мерно за 1 минуту. КОН не реагирует с квантовой ямой, не реагирует с париленом, однако медленно растворяет фоторезист, поэтому использование этого травителя оправдано тогда, когда не требуется проводить травление на литографии с минимальным размером элемента порядка микрона.

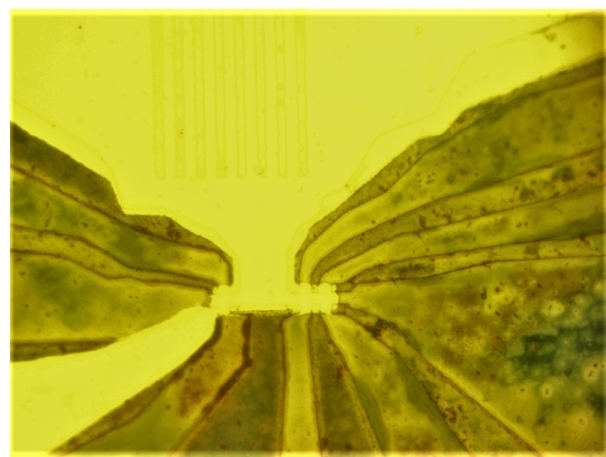
lift-off В работе чаще всего используется технология lift-off для нанесения затворного электрода на поверхность диэлектрика. Выполняется она в три действия:



(a)



(b)



(c)

Рис. 4.11. (в цвете) (a) Парилен на поверхности образца, с которым после напыления диэлектрика не проводилось никаких действий. (b) парилен с напылённым и протравленным кислотой слоем алюминия. Видны кольца Ньютона на вспучиваниях поверхности парилена. (c) Деградирующая поверхность структуры после повторного травления кислотой. Ширина мостика равна 4 микронам. Фотографии (b) и (c) сделаны последовательно на одном образце. Яркий жёлтый цвет на рисунке – цвет осветительной лампочки, отражённой от поверхности алюминия. Все фотографии делались с разной экспозицией камеры

- a) Производится литография нужной формы на поверхности парилена. Литография проходит в два этапа: сначала наносится специальный резист для взрывной литографии Microchem PMGI / LOR [33], он сушится стандартным образом, поверх него наносится слой резиста ФП-2506. После его сушки производится процесс литографии. Резист LOR наносится при скорости 4 тысячи оборо-

тов в минуту, ФП-2506 – 2,5 тысячи оборотов в минуту. Если не использовать резист LOR, то алюминий отклеится от парилена не везде, где это необходимо. Проявляется двухслойный резист в том же проявителе, что использовался для травления структуры.

- б) Напыляется необходимая толщина (200нм) алюминия на всю структуру. С одной стороны, слой такой толщины удаётся легко удалить при помощи lift-off-метода, а с другой стороны, обеспечивается устойчивое электрическое соединение затворной контактной площадки и самого затвора. Для уверенности в электрическом соединении контактной площадки и затвора к затвору подводятся две контактные площадки с разных сторон структуры. Если сопротивление между этими контактными площадками порядка нуля, то они обе также соединены с затвором.
- в) После напыления металла его необходимо удалить во всех местах, кроме места затвора. Алюминий прилипает к парилену в местах, где литографией был удалён резист, формируя затвор. Остальная часть алюминия напыляется на резист, который, растворяясь в нагретом ацетоне, уносит с собой плёнку алюминия.

Таким образом, возможно наносить затвор с элементами размером несколько микрон, см. рис. 4.12.

4.2.8. Создание индиевых контактов

Так как верхний слой квантовой ямы не проводит, а проводящий слой залегает на глубине порядка 100нм от поверхности, отдельной проблемой становится создание контакта к двумерному электронному газу в квантовой яме.

Контакт можно осуществить, например, напылением металла на край структуры, вытравленной жидким травителем [13]. Другой способ создать контакт – это удалить верхний слой квантовой ямы (до проводящего слоя) при помощи аргоновой плазмы и, не вынимая образец из вакуума, напылить на него металлические контакты [14]. В данной работе используется метод вжигания контактов в образец при помощи индия и паяльника [34, 29], см. рис. 4.13. Паяльник, нагретый до 160°, втыкается в контактную площадку, механически деформируя слой парилена, и удерживается в таком состоянии

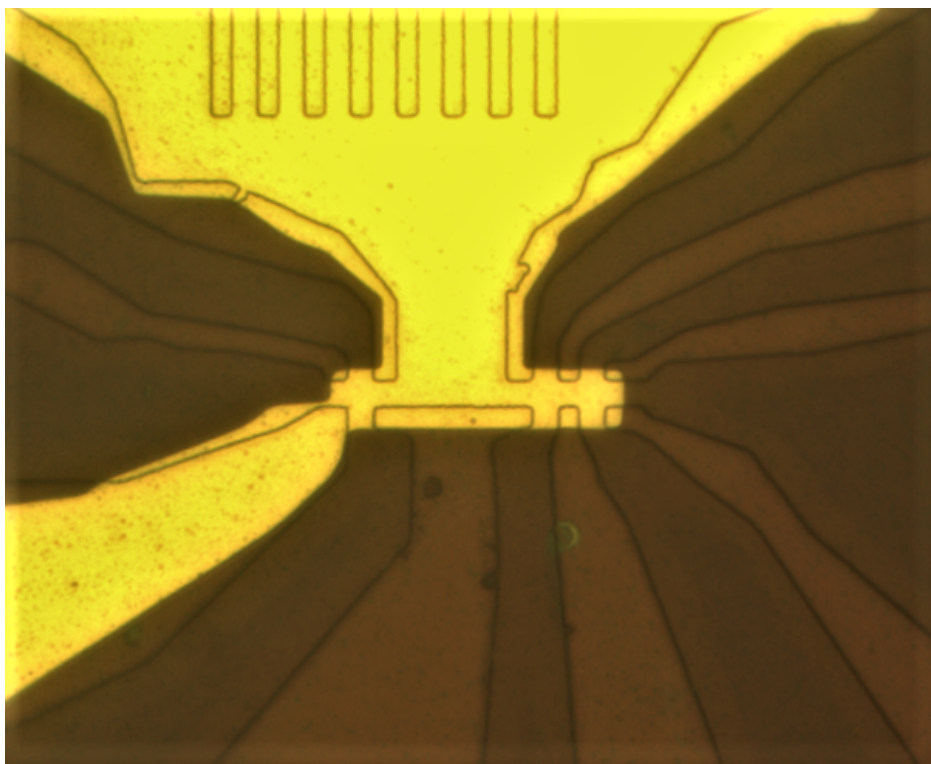


Рис. 4.12. (в цвете) Затвор, изготовленный lift-off технологией. Ширина мостика структуры 4 мкм

некоторое время, за которое индий успеваеет легировать контактную площадку, но не успеваеет нагреть всю подложку.

На образцах, к которым индий припаиваеетс без дополнительного охлаждения, это время определяется следующим образом: берётся ненужная пластина квантовой ямы такого же размера так, чтобы с одной стороны она касалась пальца экспериментатора, с другой – паяльника; считается время, которое необходимо паяльнику, чтобы нагреть подложку до ощущения боли в пальце, касающегося подложки, но не паяльника; это время делится примерно на два-три. Таким образом, безопасное время получается равным примерно 1.0-1.5 секундам. Если считать, что боль человек чувствует при нагреве пальца до $50-60^{\circ}\text{C}$ градусов, то за время вдвое-втрое меньшее достижения ощущения боли, центр подложки, где расположена структура, не успеваеет сильно нагреться.

На образцах, к которым индий припаиваеетс с дополнительным охлаждением в виде элемента Пельте и компьютерного куллера (см. рис. 4.14), безопасное время нагрева определяется пропаданием росы с образца. Температура элемента Пельте подбираеетс таким образом, чтобы на образце кон-

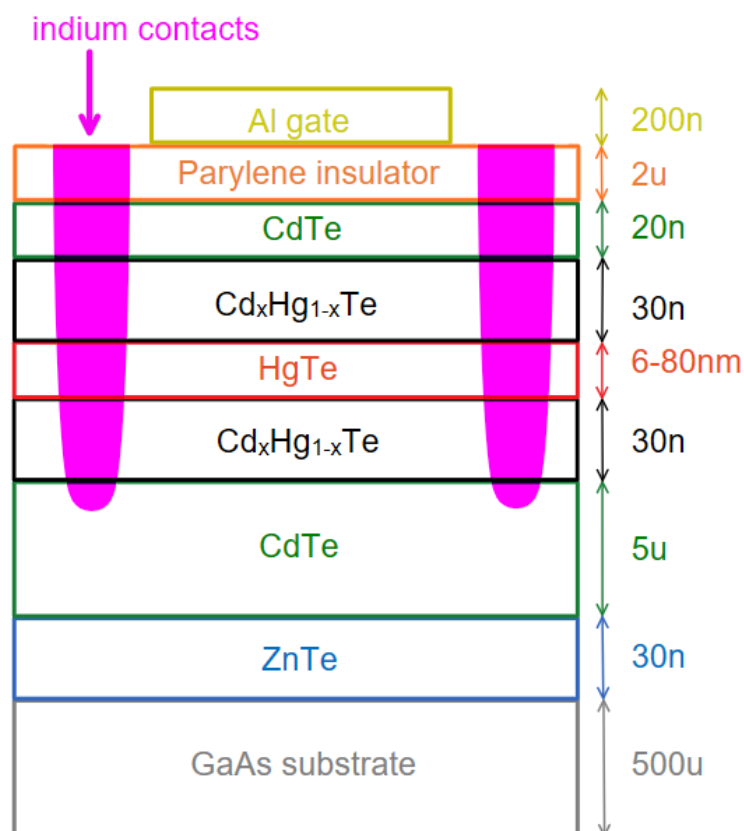


Рис. 4.13. (в цвете) Разрез квантовой ямы с нанесённым затвором и индиевыми контактами.

денсировались мелкие капли воды, которые испаряются примерно через 0.5-1.0 секунды после прикосновения паяльником к структуре.

В работе припайка считается успешной, если при касании паяльником контакта на нём остаётся индиевая капля, которая затем убирается пинцетом. Для надёжности успешная пайка осуществляется на каждом контакте несколько раз. Заметного изменения цвета области припайки в данной работе не наблюдается, но наблюдается в других работах [29]. Если какой-то из контактов показывает большое сопротивление, то можно допаять структуру, смыв с неё ацетоном приклеенные после первой пайки серебряные контакты и пройдясь паяльником по контактам ещё раз.

Создаются контактные площадки размера $400 \times 400 \text{ мкм}^2$, с расстоянием между контактами не менее ширины контакта. Если для пайки использовать паяльник с тонким жалом, то припаяться к такому контакту не составляет большого труда. Для удобства пайки можно взять плоскогубцами за жало паяльника. Для пайки более мелких контактных площадок можно



Рис. 4.14. (в цвете) Система охлаждения образца для припаивания индиевых контактов.

Элемент Пельте находится на радиаторе, охлаждаемом вентилятором.

Образец, смонтированный на держатель образца измерительной установки, находится на холодной стороне Пельте. Все элементы соединены термопастой.

использовать жёсткую проволоку, накрученную на жало паяльника.

Таким образом, удаётся создавать контакты к двумерному электронному газу в квантовой яме. Полное сопротивление, измеренное по двухточечной схеме при нулевом гейте и комнатной температуре между контактами составляло порядка 200кОм.

4.2.9. Монтирование образца в держатель для измерений

Для измерений используется установка CFMS с возможностью вращения образца. Для монтажа образца в установку используются 20-пиновые держатели LCC-20, см. рис. 4.15. Перед монтированием образца в держатель он очищается ацетоном от остатков серебряной пасты с предыдущего эксперимента, затем к проводящему дну держателя приклеивается на клей БФ слюдяная пластинка, а на слюду тем же клеем крепится образец. Слюдяная пластинка нужна для того, чтобы избежать контакта с подложкой.

Для соединения контактных площадок образца и держателя в работе используется тонкая золотая проволока и проводящая серебряная паста. Толщина проволоки подбирается из соображений удобства работы: чем толще проволока, тем сложнее её сломать, но чем она тоньше, тем легче она

гнётся в нужных местах. В работе используется проволока толщиной 20 микрон. Для манипуляций с проволоками используется тонкий пинцет, а для переноса серебряной пасты на контактные площадки используется деревянная шпажка для гриля с намотанной на неё тонкой проволокой. Шпажкой удобно манипулировать благодаря её длине и малому весу.

В работе используются два удобных способа соединения контактных площадок на образце и на держателе:

1. В первом способе золотые проволоки нарезаются на нужное количество кусочков почти произвольной длины острыми маникюрными ножницами, затем на контактных площадках ставятся капли, к которым одним концом подносятся проволоки. Паста смачивает проволоки, поэтому они охотно пристают к нужному контакту. Из-за смачивания трудно осуществить процесс в другом порядке: если сначала положить проволоку на контакт, а затем попытаться капнуть на этот контакт каплей пасты, то проволока прилипнет не к контакту, а к шпажке. После высыхания всех капель на держателе (~ 1 час) проволоки можно гнуть, обрезать до нужной длины и подводить к контактным площадкам на образце. Из-за упругости проволоки и закрепления одного конца на стороне держателя образца при поднесении пасты к месту контакта проволоки и образца золотая проволока остаётся на месте и приклеивается к образцу.
2. Второй способ требует предварительной нарезки проволоки нужной длины для каждой пары соединяемых контактов. После нарезки проволоки капли пасты ставятся одновременно и на держателе, и на образце, а затем проволоки подобранной длины кладутся на эти капли. Из-за смачивания проволоки приклеиваются к нужным местам. Этот метод сложен тем, что для каждого образца необходимо нарезать новые проволоки, что занимает довольно продолжительное время. Такой вариант нарезки также подразумевает возможность контакта проволоки и поверхности образца, так что для исключения возможных закороток для расклейки используется первый метод, позволяющий загнуть проволоку так, чтобы она касалась образца только в области контакта.

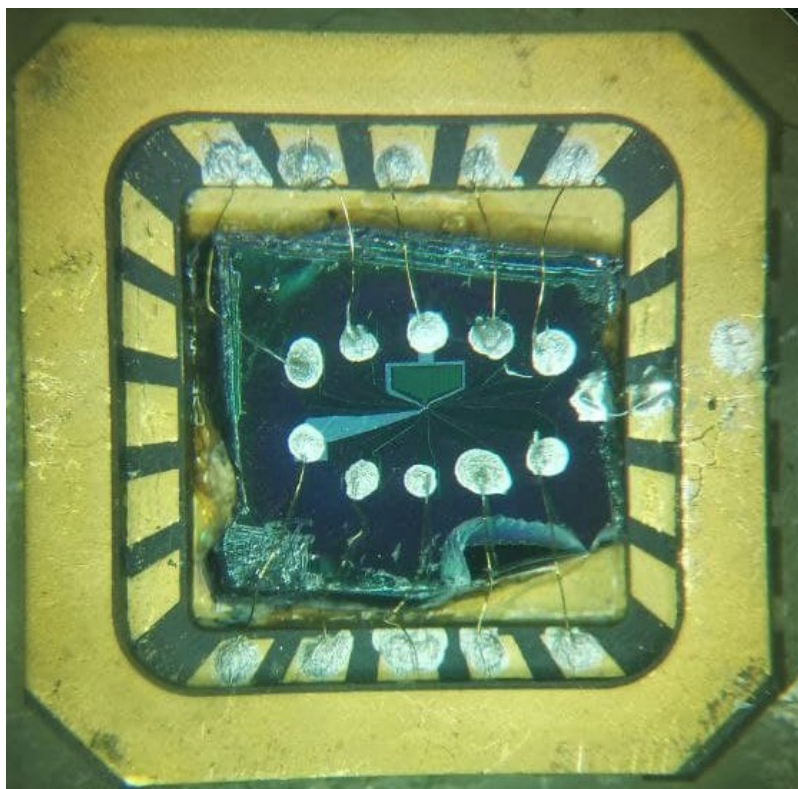


Рис. 4.15. (в цвете) Образец, смонтированный в измерительный держатель. К образцу подведены золотые проволоки, приклеенные к контактным площадкам. Размер стороны измерительного держателя около сантиметра, размер структуры около 5мм в длину

Глава 5. Постановка эксперимента

Измерения проводятся в центре «Высокотемпературной сверхпроводимости и квантовых материалов» им. В.Л. Гинзбурга. Для них используется установка mini-CFMS и CFMS (Cryogen Free Measurement System) [35], см. рис. 5.1. Охлаждение установки производится по замкнутому циклу, что значительно облегчает процесс измерений. Для помещения образца в измерительную камеру измерений нужно около 10 минут, а для охлаждения образца до 3К требуется около 2 часов. Система может поддерживать температуру образца в пределах 1.6-300.0 К и магнитное поле в пределах 0-16 Тл (CFMS) и 0-5 Тл (mini-CFMS). Температура поддерживается при помощи автоматической регулировки потока газообразного гелия и нагревателя, установленного как в основном объёме криостата, так и непосредственно у образца.

Соболевским О. А., сотрудником Центра, была написана программируемая среда работы с этой установкой, что сильно упростило процесс измерений. Возможно программирование этой системы и её автономная работа по заданной программе.

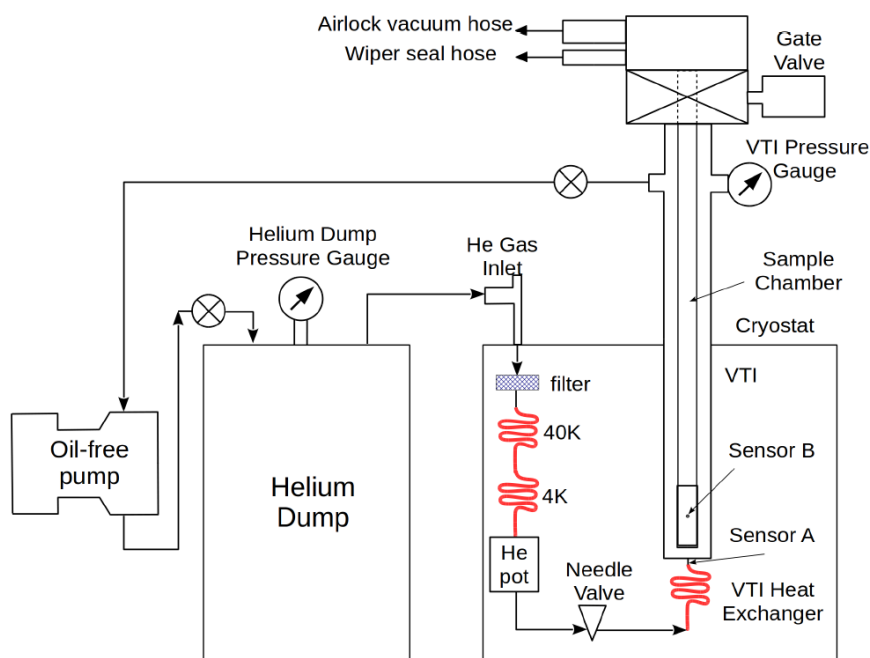
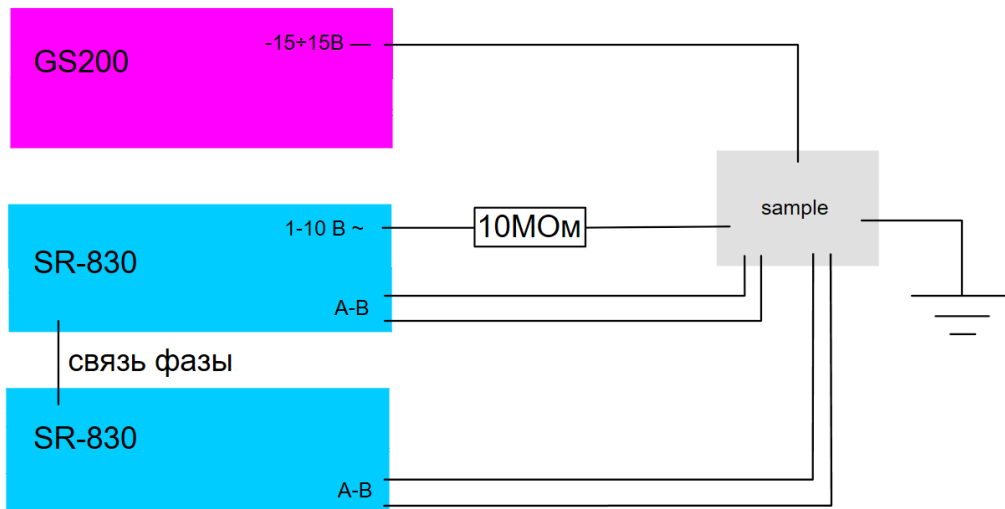


Рис. 5.1. (в цвете) Схема установки CFMS из диплома [банников]

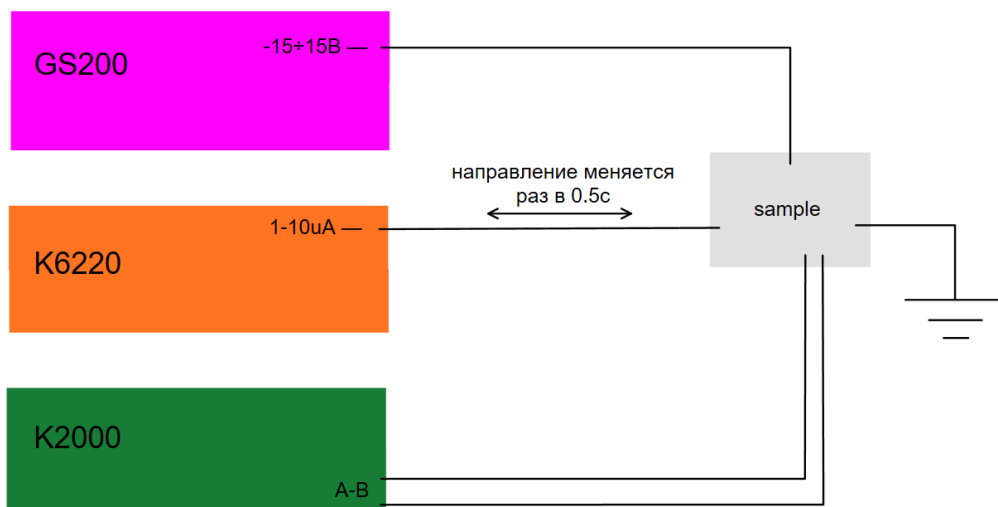
Для измерений на переменном токе используется схема, изображённая на рис. 5.2 (а). На ней на образец подаётся переменный сигнал при помощи источника сигнала синхронного детектора (лок-ина) через задающий резистор 10МОм. Сопротивление задающего резистора подбиралось так, чтобы оно было много больше сопротивления схемы. При помощи двух лок-инов с согласованной фазой снималось дифференциальное напряжение на образце в двух парах точек. Напряжением на гейте управлял источник постоянного напряжения. Все измерения проводились на частоте 3-18 Гц, которая подбиралась из соображения неkratности частоты электрической сети и минимальности фазы сигнала. У всех приборов была общая земля, соединение было реализовано при помощи коаксиальных проводов.

Для измерений на постоянном токе используется схема измерений, изображённая на рис. 5.2 (b). Для учёта термо-ЭДС и других постоянных напряжений ток на образец подавался при помощи программируемого источника тока, ток в котором менял своё направление раз в 0.5 с. Измерения напряжения велись при помощи вольтметра. В качестве сигнала бралась полуразность показаний вольтметра при токе «туда» и «обратно». Земля источника тока и источника напряжения были связаны, земля мультиметра была плавающей. При соединении земли мультиметра с общей возникала постоянная сдвигка сигнала.

Токи через образец во всех схемах брались такие, что вольт-амперная характеристика образца была линейной.



(a)



(b)

Рис. 5.2. (в цвете) Измерительная схема на (а) переменном, (b) постоянном токе. GS200 – источник напряжения фирмы Yokogawa. SR-830 – синхронный детектор фирмы Stanford Research Systems. K6220 – источник тока, K2000 – измеритель напряжения фирмы Keithley

Глава 6. Результаты

Ниже описаны электронные измерения двух структур, изготовленных из одной и той же пластины квантовой ямы. Одна структура была изготовлена с геометрией типа мостика Холла, вторая структура – структура с длинным краем.

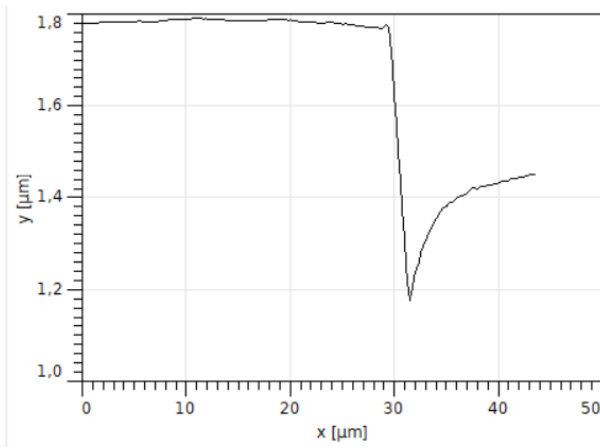
На структуре типа мостика при низких температурах были проведены 4-точечным методом измерения локального и нелокального сопротивления в зависимости от затворного напряжения, магнетотранспортные измерения при разных затворных напряжениях, измерена температурная зависимость сопротивления. После всех измерений выяснилось, что даже при низкой температуре образец имеет проводимость через поверхность подложки, что объясняет наличие в эксперименте нелокального транспорта при вдали от точки зарядовой нейтральности и при комнатной температуре. Тем не менее, данный образец позволил оценить концентрации и подвижности носителей.

На структуре с длинным краем проводились измерения локального и нелокального сопротивления в зависимости от затворного напряжения а также температурной зависимости сопротивления.

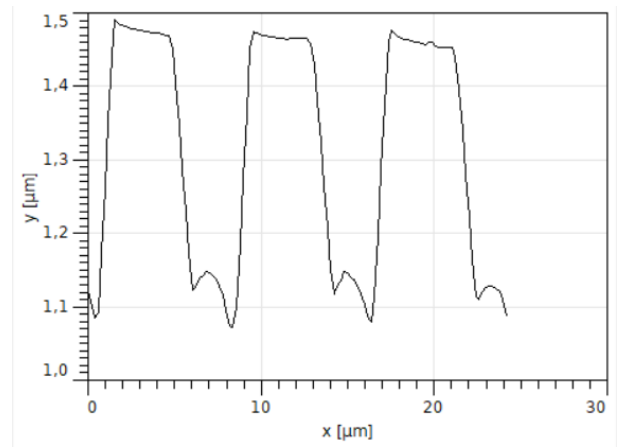
6.1. Измерения транспортных свойств структуры типа мостика Холла

Измерения транспортных свойств проводилось на образце КРТ160203 с заявленной толщиной ямы 7,6нм. АСМ-снимок профиля образца после травления изображён на рис. 6.1. Дизайн меза-структуры изображён на рис. 6.2. Структура квантовой ямы в данной геометрии имеет длинный край, но рога квантовой ямы не покрыты гейтом, поэтому простых интересных эффектов такой непокрытый затвором длинный край давать не должен.

Измерения проводились на переменном токе. Если не оговорено иное, на затворе выставлено нулевое напряжение, и магнитное поле равно нулю.

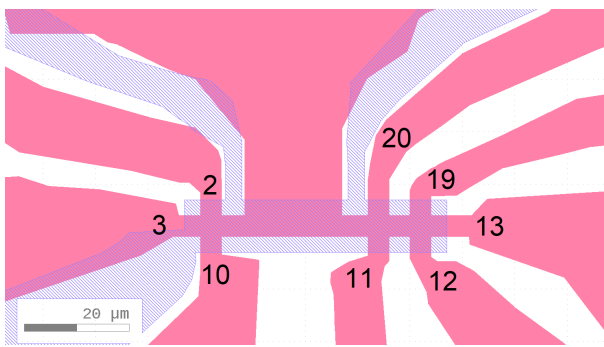


(a)

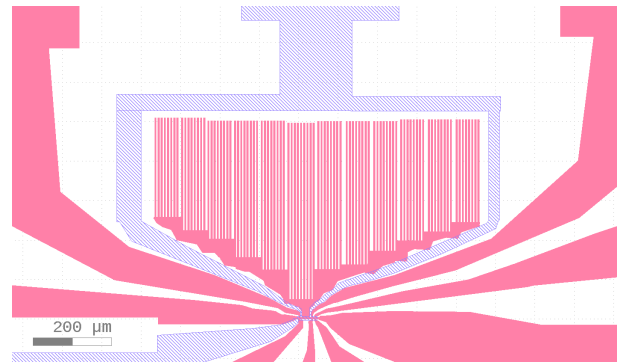


(b)

Рис. 6.1. АСМ-снимок профиля образца КРТ160203 после травления. (a) область у контактов, (b) область у рогов.



(a)



(b)

Рис. 6.2. (в цвете) Схема структуры с длинным краем, не покрытым гейтом. Красным цветом обозначен слой квантовой ямы, синим – слой затвора. (a) вид мостика, (b) вид всей структуры

6.1.1. 2-точечные измерения при $T = 300\text{K}$

Стандартное двухточечное измерение показало, что сопротивление между всеми контактами схемы равно 150 ± 50 кОм. Сопротивление между контактами к мезе и затвором около 120 МОм.

6.1.2. 4-точечные измерения при $T = 300\text{K}$

Ниже указаны результаты измерений, проведённых по четырёхточечной локальной схеме. Ток пускался через контакты 3, 13, напряжение измерялось на указанных:

R_3 13,10 11	15 кОм
R_3 13,11 12	6.2 кОм
R_3 13,2 20	20 кОм
R_3 13,20 19	6.2 кОм
R_3 19,13 12	1.6 кОм
R_3 13,11 20	1.6 кОм
R_3 13,2 10	4 кОм

Несколько странно выглядят измерения холловского напряжения на парах контактов {19, 12}, {20, 11}, {2, 10}. Такие большие напряжения связаны с тем, что в структуре проводит не только область, не подверженная травлению, но и частично травленная область.

6.1.3. Подтверждения проводимости травленной области

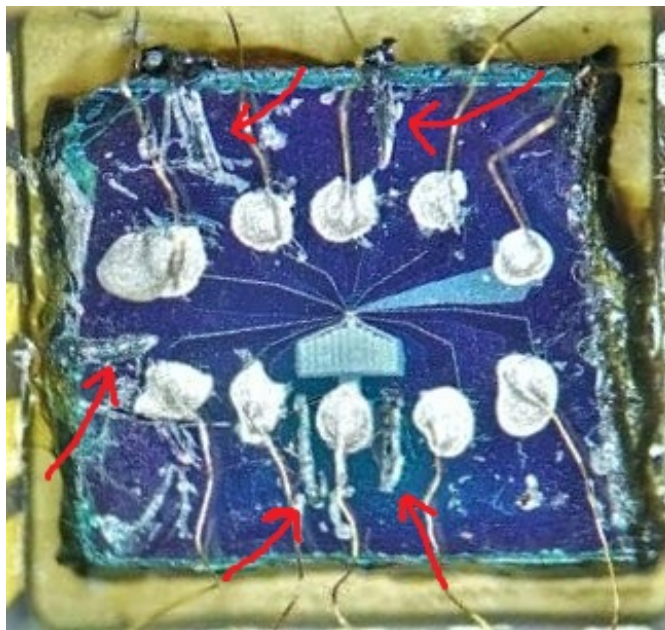


Рис. 6.3. (в цвете) Царапины между контактами на образце квантовой ямы указаны стрелочками

После всех измерений, описанных в параграфах ниже, образец был отогрет до комнатных температур и были проведены повторные измерения нелокального сигнала. При пропускании тока через образец в любой нелокальной схеме на контактах наблюдалось падение напряжения, сопоставимое с тем, какое падает на токовых контактах. Естественно, объяснить такой эффект краевыми состояниями при комнатной температуре нельзя. Для объяснения эффекта было выдвинуто предположение о проводимости не

только вытравленной структуры, но и большой области вокруг неё. Это могло произойти из-за того, что структура, в паспорте которой не указана глубина залегания квантовой ямы, была протравлена на недостаточную глубину. Имеются два наблюдения, подтверждающие данную гипотезу.

Первое наблюдение заключается в наличии прямого электрического контакта структуры и травленной области. Были изготовлены дополнительно 2 контакта в районе травленной области: один был приклеен к парилону без деформации слоя диэлектрика, второй был приклеен к месту, которое было предварительно пропаяно индием. При впуске тока через непаянный дополнительный контакт на локальных для выбранной геометрии контактах структуры падало на 3 порядка меньше напряжения, чем когда токовводящий контакт был контактом структуры. При впуске тока через паянный дополнительный контакт на аналогичных измерениях на локальных контактах структуры падало столько же напряжения, сколько падало, когда токовводящий контакт был контактом структуры.

Второе наблюдение заключается в падении нелокального сигнала при царапании пинцетом подложки между токовыми и потенциальными контактами, см. рис. 6.3. Такими царапинами удалось понизить нелокальный сигнал на 20%.

Таким образом все проведённые измерения структуры включают в себя неявным образом характеристики недотравленного материала. Естественен вопрос о том, почему проявившаяся проводимость травленной области является проводимостью недотравленной квантовой ямы, а не чем-либо иным. Ответ на этот вопрос заключается в отсутствии проводимости по травленной области в образцах из той же пластины квантовой ямы, в которых глубина травления была сильно больше, например в образце с длинным краем, о котором идёт речь в параграфе "Измерение структуры с длинным краем".

6.1.4. Локальные измерения при $T = 3\text{K}$

Локальные измерения при низкой температуре и нулевом магнитном поле показали сопротивления на контактах $\{11, 12\}$ и $\{20, 11\}$ изображённые на рис. 6.4 (а)

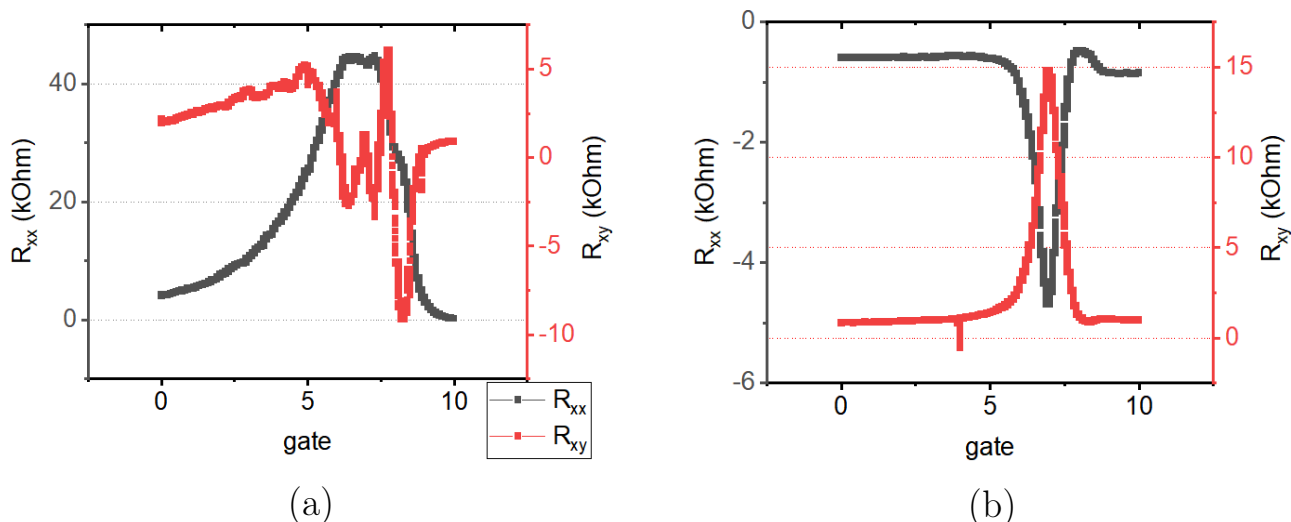


Рис. 6.4. (в цвете) (а) Локальные сопротивления структуры, здесь $R_{xx} = R_{\text{з } 13,11 \text{ } 12}$, $R_{xy} = R_{\text{з } 13,20 \text{ } 11}$. (б) Нелокальное сопротивление, $R_{xx} = R_{\text{з } 10,11 \text{ } 12}$, $R_{xy} = R_{\text{з } 10,20 \text{ } 11}$. Отрицательное сопротивление соответствует отрицательному падению напряжения между контактами. Температура 3К, магнитного поля нет.

Измерения показывают точку зарядовой нейтральности (напряжение, при котором уровень Ферми находится в объёмной щели) при напряжении на гейте $V_g = 7.5\text{ В}$. Локальное сопротивление между контактами 11 и 12 в этой структуре в точке зарядовой нейтральности достигает величины 44 кОм, однако было бы безосновательно связывать эту величину с квантом проводимости, так как в неё входит проводимость травленной части структуры.

6.1.5. Нелокальный сигнал

Нелокальный сигнал измерялся во многих конфигурациях подключения контактов. Все измерения имеют одни и те же особенности. На всех нелокальных измерениях присутствует большой сигнал в точке зарядовой нейтральности, а также сильно ненулевой сигнал при уровне Ферми вне объёмной щели, см. рис. 6.4 (б). Это также объясняется тем, что ненулевой проводимостью обладает не только сама структура, но и область травления. Поэтому объяснять наличие большого сигнала в точке зарядовой нейтральности наличием краевого нелокального транспорта нельзя.

6.1.6. Сигнал в магнитном поле

Были проведены измерения сопротивления образца в магнитном поле. На рис. 6.5 изображены холловские сопротивления структуры в дырочной области спектра. При нулевом поле сопротивление xy имеет электронный вид наклона, который при увеличении магнитного поля переходит в дырочный. Откуда взялся электронный вид зависимости $R_{xy}(B)$ не вполне ясно, так как в спектре ямы при таких напряжениях на затворе должны присутствовать только дырочные ветви спектра. Объяснить это явление присутствием нестравленных участков на подложке нельзя, поскольку они эффективно находятся при нулевом напряжении затвора, а следовательно их спектр находится в дырочной области. Для вклада краевых состояний величина этой аномалии слишком велика.

Возможное объяснение этого явления – плохое качество изготовленной структуры, а именно неоднородность толщины квантовой ямы или неоднородность расстояния от структуры до затвора. Это подтверждается увеличением величины этой аномалии при приближении напряжения к точке зарядовой нейтральности из дырочной области.

Также на R_{xy} видно, по-видимости, первое плато КЭХ. Оно не доходит до кванта сопротивления $R_q = 25.8$ кОм, как и не доходит до нуля R_{xx} в этой области магнитного поля. Оба этих несоответствия можно объяснить шунтированием структуры сопротивлениями 100кОм, вызванными проводимостью травленной области.

6.1.7. Концентрация носителей

Вычисленная по наклону холловского напряжения концентрация носителей изображена на рис. 6.6 (а). Наклон холловского сопротивления брался не в малой окрестности нуля, где могла наблюдаться вышеописанная особенность, а в большой окрестности нуля, где этой особенностью можно пренебречь. Концентрация носителей возле точки зарядовой нейтральности в одножидкостной модели не определяется, поэтому точек на графике в этой области нет. Видно, что все точки лежат на одной прямой.

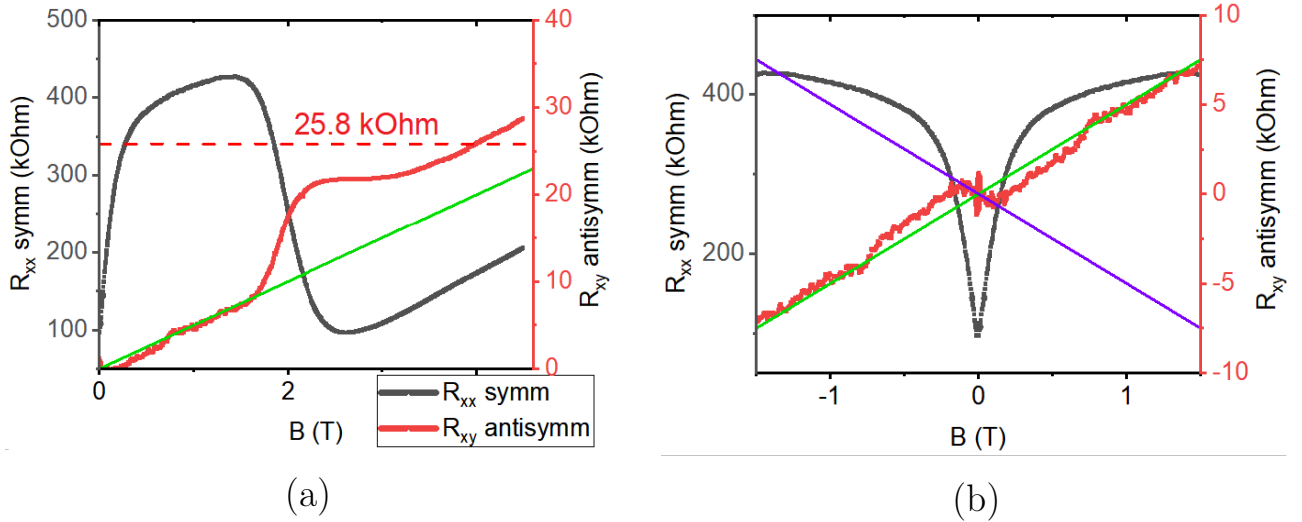


Рис. 6.5. (в цвете) Симметризованные и антисимметризованные соответственно значения холловского сопротивления в зависимости от магнитного поля. (a) и (b) отличаются масштабом. Напряжение на затворе $V_g = +6$ В. $R_{xx} = R_{3,10,11,12}$,

$$R_{xy} = R_{3,10,20,11}$$

Если положить, что концентрация от напряжения зависит по конденсаторному закону $n(V_g) = V_g \epsilon \epsilon_0 / (ed) + n_0$, а диэлектрическая проницаемость парилена $\epsilon = 2.65$ [36], то по графику 6.6 (a) можно восстановить толщину парилена $d = 600$ нм. По порядку величины она соответствует ожидаемой толщине напыления. Это обстоятельство, однако, не подтверждает предположение о том, что за проводимость отвечает не только область структуры, потому что при наличии не зависящего от затвора шунта вычисленная таким образом эффективная толщина диэлектрика должна была быть на порядки меньше полученной.

6.1.8. Подвижность носителей

На рисунке 6.6 изображена подвижность дырок и электронов. Подвижность считалась по формуле $\mu = dR_{xy}/dB(0) \gamma / R_{xx}(0)$, геометрический фактор γ положен равным единице. Видно, что подвижность дырок от затворного напряжения почти не зависит, подвижность электронов больше подвижности дырок на порядок, но меньше на порядок, чем подвижность электронов в других структурах [31].

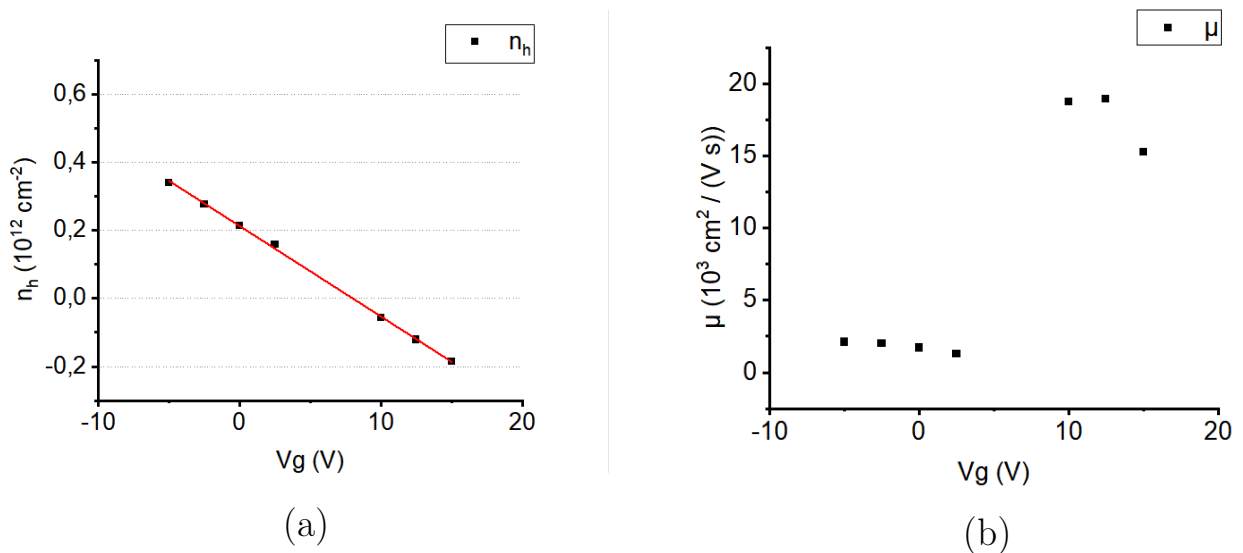


Рис. 6.6. (в цвете) (а) Концентрация носителей заряда в зависимости от затворного напряжения. Здесь положительные концентрации обозначают концентрацию дырок, отрицательные – концентрации электронов. (б) Подвижность носителей заряда в зависимости от затворного напряжения. Положению уровню Ферми в щели соответствует напряжение 7.5 В.

6.1.9. Температурная зависимость сопротивления в точке зарядовой нейтральности

Из формулы сопротивления для высоких температур $R(T) = R_0 \exp \Delta / (2kT)$ легко получается величина щели. В данном образце она равна $\Delta = 12.7$ мЭв, см. рис. 6.7. На величину таким образом вычисленной щели проводимость травленной области не сказывается.

6.2. Поиск нелокальной проводимости в структуре с длинным краем

Структура с длинным краем сделана из квантовой ямы КРТ160203. Измерения проводились на постоянном токе, потому что при измерении на переменном присутствовала сдвигка сигнала относительно нуля неопределённой природы. Схема образца указана на рис. 6.9. Двухточечные измерения при низких температурах показывают сопротивления на всех контактах, кроме 12го, меньше 400кОм. Контакт 12 имеет сопротивление со всеми контактами структуры порядка 1 МОм.

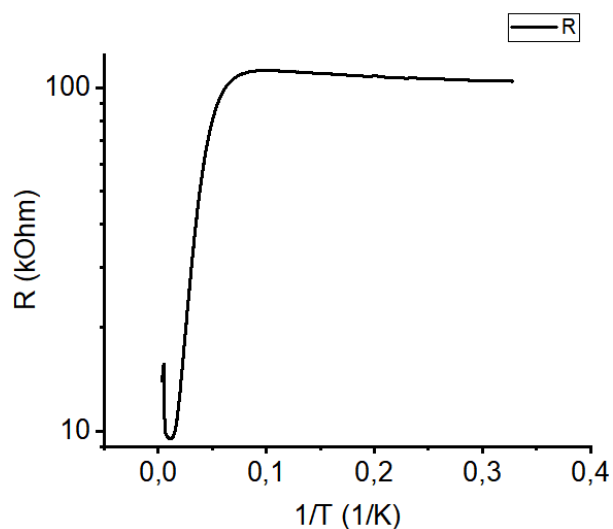


Рис. 6.7. (в цвете) Температурная зависимость локального сопротивления в нулевом магнитном поле в точке зарядовой нейтральности $R(T) = R_3$ 13,11 12

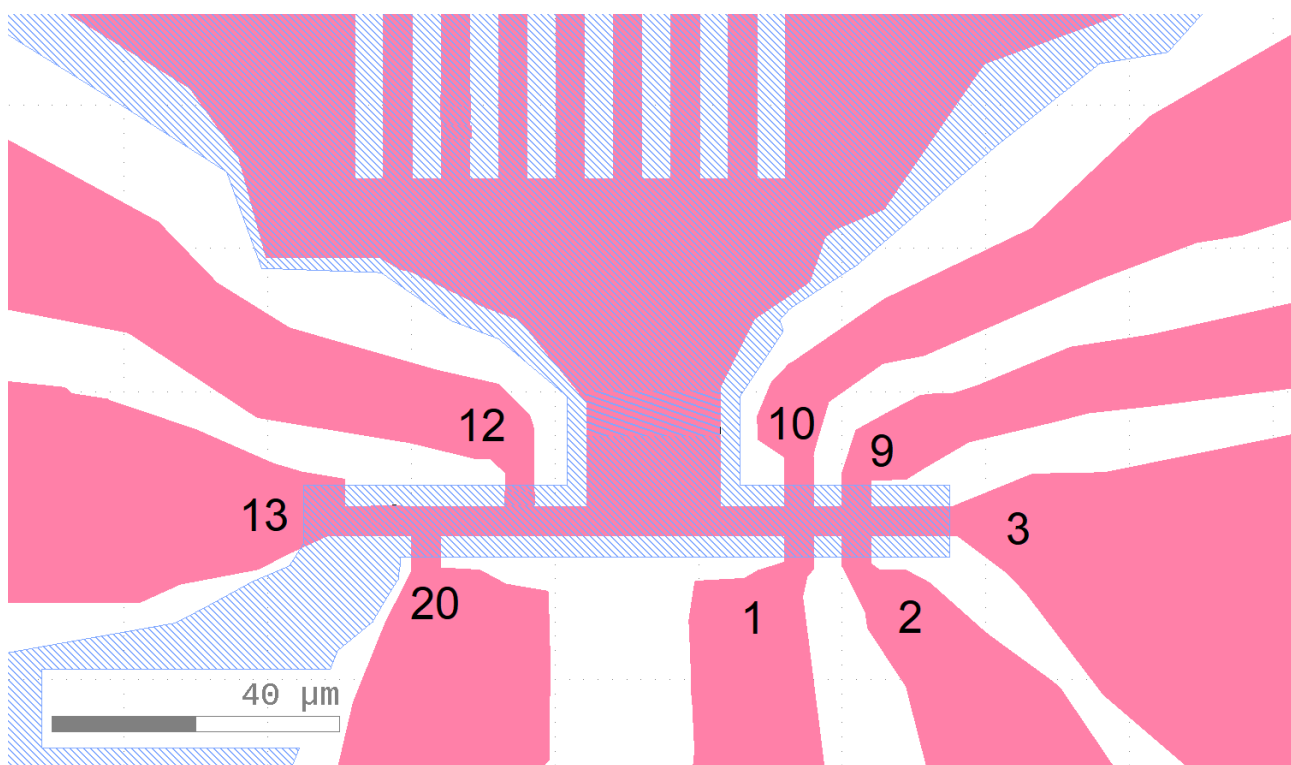


Рис. 6.8. (в цвете) Схема структуры с длинным краем. Красным цветом обозначен слой квантовой ямы, синим – слой затвора.

На рисунке 6.9 показаны результаты измерения локального и нелокального сопротивления образца. Локальный сигнал, измеренный на контактах, расстояние между которыми порядка 10 микрон, показывает сопротивление, близкое к двум квантам сопротивления $2R_q = 51.6$ кОм. Со-

противления порядка кванта получаются и на других локальных геометриях.

Несмотря на то, что ожидается ненулевой нелокальный сигнал $R = R_{1\ 10,2\ 3}$, на эксперименте его нет. На графике 6.9 (b) видны ненулевые показания, однако подобный по форме и величине сигнал получается при отсутствии тока через структуру. Было испробовано множество измерительных схем, но ни в одной из них нелокальный сигнал не наблюдался.

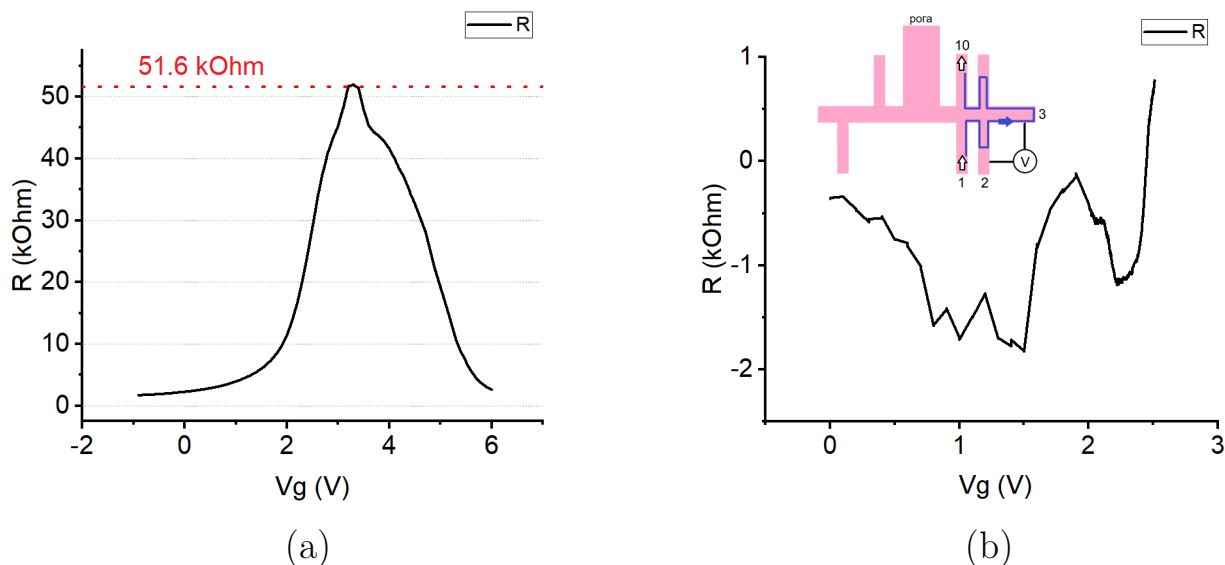


Рис. 6.9. (в цвете) (a) Локальные $R = R_{1\ 10,11\ 12}$ и (b) нелокальные измерения $R = R_{1\ 10,2\ 3}$; на схеме синей линией изображён ожидаемый, но ненаблюдаемый ход краевого тока

Объяснения отсутствия нелокального сигнала на коротком краю при наличии локального порядка кванта на момент написания работы нет.

Температурная зависимость сопротивления этой структуры в точке зарядовой нейтральности даёт значение объёмной щели около 12 мэВ.

6.3. Нанофабрикация HgTe различными способами

Первый способ производства отверстий основывается на механическом воздействии на образец тонкой иглой атомно-силового микроскопа. Атомно-силовые микроскопы (АСМ), например Solver-Pro NT-MDT, своим функционалом позволяют прецизионно воздействовать иглой микроскопа на поверхность квантовой ямы, надавливая ею в определённое место микроструктуры с заданной силой.

В данной работе таким способом удалось получить углубления глубиной порядка 100нм и диаметром в основании углубления порядка 100нм, см. рис. 6.10 (а). Экспериментальным путем выяснены условия получения качественных дырок: чтобы профиль отверстия был острым, игла должна быть достаточно острой; чтобы отверстие было глубоким (больше 30нм), жёсткость кантилевера, на котором крепится игла, должна быть не менее 30 Н/м. Первое обстоятельство определяется тем, что форма отверстия повторяет форму иглы, см. рис. 6.11. Замечание про жёсткость иглы определялось экспериментально проверкой наличия возможности литографии при помощи зондов с разной жёсткостью кантилевера.

Второй способ производства отверстий основывается на воздействии на образец пучком ионов. В работе используется фокусированный ионный пучок (ФИП) на основе ионов галлия с энергией 10кВ в установке Fei Helios 660 в Центре ВСиКМ ФИАН. Ранние эксперименты разных групп показывают, что воздействие галлиевого пучка на квантовую яму напрямую приводит к её деградации, что обусловлено мягкостью HgTe, поэтому для работы с ионным пучком необходима защитная маска.

В данной работе удалось произвести массив отверстий на краю структуры, покрытой защитным слоем парилена толщиной порядка микрона, который был покрыт 20нм слоем алюминия, см. рис. 6.10 (b). Парилен выступал в роли защиты всей площади структуры от рассеянного воздействия ионного пучка и от слоя алюминия. Алюминий использовался для того, чтобы по нему стекал заряд и можно было наблюдать структуру в электронный микроскоп. Ток ионного пучка в данном эксперименте составлял минимально возможные 1.1 пА.

Успехи в контролируемом производстве отверстий на небольшом расстоянии от краевого состояния позволяют надеяться на то, что взаимодействие подобных краевых состояний будет исследовано.

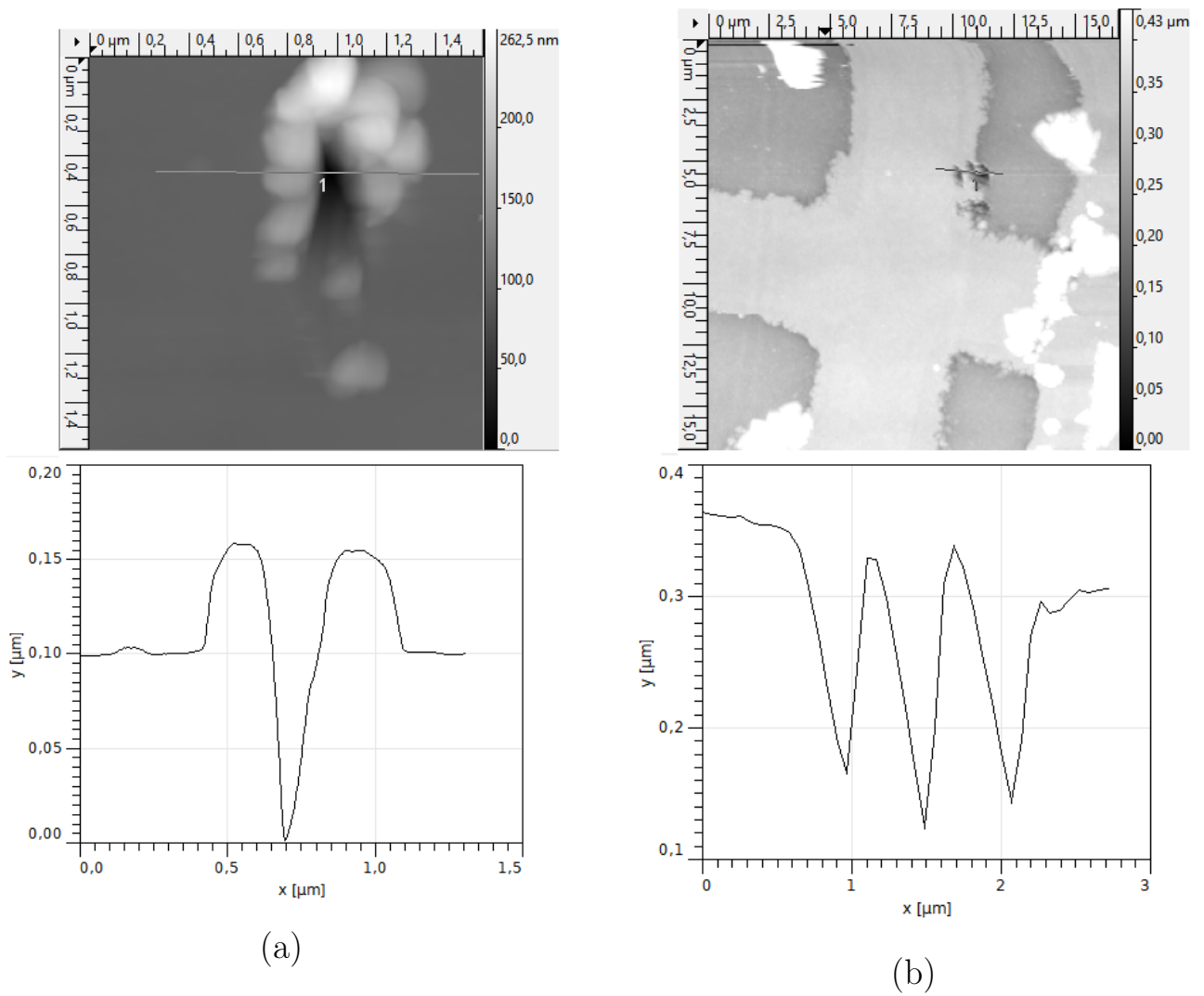


Рис. 6.10. (а) АСМ топография поверхности квантовой ямы HgTe с проделанным при помощи АСМ отверстием. (б) АСМ топография поверхности квантовой ямы HgTe с проделанным при помощи ФИПа массивом отверстий. В качестве буферного слоя выбран парилен, а виде электрода для стекания заряда – тонкий слой алюминиевой плёнки

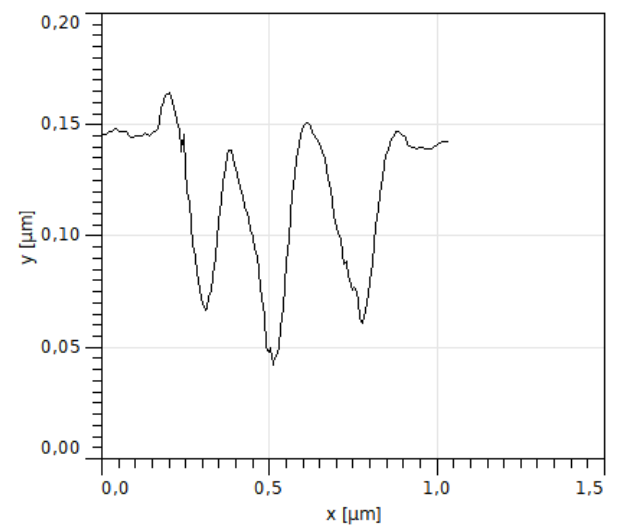
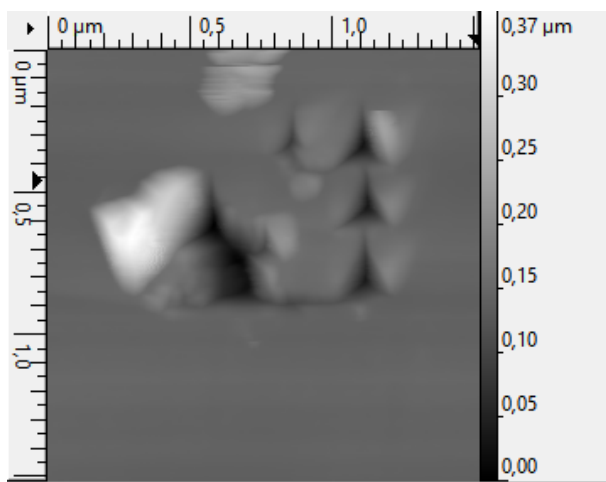


Рис. 6.11. АСМ топография поверхности квантовой ямы HgTe с проделанным при помощи АСМ массивом отверстий. Для литографии использовалась игла с треугольным профилем.

Глава 7. Выводы

В работе подробно описаны технологические этапы производства устройств на основе квантовой ямы теллурида ртути. Проведены транспортные измерения подобных структур, однако из-за плохого качества выбранной пластины квантовой ямы (КРТ160203) или из-за дефектов при производстве эти измерения носят не до конца определённые знания.

Была предложена и реализована геометрия структуры с длинным краем на основе топологического изолятора, были проведены её локальные и нелокальные измерения сопротивления. Эти измерения показали локальные сопротивления в точке зарядовой нейтральности порядка кванта сопротивления и отсутствие нелокального сопротивления как на коротком, так и на длинном крае. Объяснения этому явлению пока нет. Величина локального сопротивления в точке зарядовой нейтральности порядка кванта говорит о наличии каналов, проводимость которых не зануляется в точке зарядовой нейтральности, но отнести их к краевым каналам, которые описаны в статьях других групп, нельзя из-за отсутствия нелокального сигнала.

Был предложен и частично реализован метод производства отверстий и литографии на образце при помощи АСМ-микроскопа и ФИПа на основе ионов галлия. Частичная реализация означает успешное производство отверстий нужного или почти нужного размера без дальнейших электронных измерений.

Глава 8. Благодарности

Выражаю большую благодарность моему научному руководителю, Кунцевичу Александру Юрьевичу, за наставничество и терпение в этих наставлениях, за создание рабочей атмосферы. Благодарю Бубиса Антона Владимировича, Минькова Григория Максовича и Банникова Михаила Игоревича за дельные обсуждения и советы по работе. Шуплецова Алексея Владимировича за помощь в обучении работе на установках, Валентина Юрьевича Качоровского за обсуждение идей экспериментов, Лосякова Владимира Владимировича и других участников семинара ОТФ ФИАН за дельные вопросы, Массалимова Бурхана Исмаиловича, Садакова Андрея Владимировича, Соболевского Олега Александровича и Рыбальченко Георгия Владимировича за помощь с работой на установках, Александра Иосифовича Дулеба и Михаила Пугачева Михаила Владимировича за обсуждения процесса литографии и, наконец, благодарность Роме Г. и Юшковской Анастасии за неоценимый вклад в работу.

Литература

- [1] M. I. Dyakonov and A. V. Khaetskii, “Surface states in a gapless semiconductor,” *JETP Lett.*, vol. 33, no. 2, p. 110, 1981.
- [2] V. A. Volkov and T. N. Pinsker *Sov. Phys. Solid State*, vol. 23, p. 1022, 1981.
- [3] M. I. Dyakonov and K. A. V., “Size quantization of the holes in a semiconductor with a complicated valence band and of the carriers in a gapless semiconductor,” *JETP*, vol. 55, no. 5, p. 917, 1982.
- [4] L. G. Gerchikov and S. A. V., “Interface states in subband structure of semiconductor quantum wells,” *physica status solidi (b)*, vol. 160, no. 2, pp. 443–567, 1990.
- [5] C. L. Kane and E. J. Mele, “Quantum spin hall effect in graphene,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 95, no. 22, p. 226801, 2005.
- [6] C. L. Kane and E. J. Mele, “ Z_2 topological order and the quantum spin hall effect,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 95, no. 14, p. 146802, 2005.
- [7] B. A. Bernevig, T. L. Hughes, and S.-C. Zhang, “Quantum spin hall effect and topological phase transition in hgte quantum wells,” *American Association for the Advancement of Science*, vol. 314, no. 5806, pp. 1757–1761, 2006.
- [8] M. König, S. Wiedmann, C. Brüne, A. Roth, H. Buhmann, L. W. Molenkamp, X.-L. Qi, and S.-C. Zhang, “Quantum spin hall insulator state in hgte quantum wells,” *American Association for the Advancement of Science*, vol. 318, no. 5851, pp. 766–770, 2007.
- [9] S. A. Dvoretzky, D. Ikusov, Z. Kvon, and et al., “Growing HgTe/Cd_{0.735}Hg_{0.265}Te quantum wells by molecular beam epitaxy,” *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, vol. 43, no. 5806, p. 375–381, 2007.
- [10] Z. D. Kvon, D. A. Kozlov, E. B. Olshanetsky, G. M. Gusev, N. N. Mikhailov, and S. A. Dvoretzky, “Topological insulators based on hgte,” *Phys. Usp.*, vol. 190, pp. 673–692, 2020.

- [11] L. Du, I. Knez, G. Sullivan, and R.-R. Du, “Robust helical edge transport in gated,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 114, no. 9, p. 096802, 2015.
- [12] N. Katsuragawa, M. Nishizawa, T. Nakamura, and et al., “Room-temperature quantum spin hall phase in laser-patterned few-layer 1T’- MoS₂,” *Commun Mater*, vol. 1, no. 51, 2020.
- [13] A. Kononov, S. V. Egorov, N. N. Kvon, Z. D. an Mikhailov, S. A. Dvoretzky, and E. V. Deviatov, “Evidence on the macroscopic length scale spin coherence for the edge currents in a narrow hgte quantum well,” *Jetp Lett.*, vol. 101, no. 12, p. 913 – 918, 2015.
- [14] A. Bubis, N. Mikhailov, S. Dvoretzky, A. Nasibulin, and E. Tikhonov, “Localization of the helical edge states in the absense of external magnetic field,” 2021.
- [15] S. K. Konyzheva and V. S. Chrapay, *Выпускная квалификационная работа (бакалаврская работа). Сопротивление одиночного края в квантовой яме HgTe с инвертированным спектром. Долгопрудный: Московский физико-технический институт, 2018.*
- [16] R. A. Niyazov, D. N. Aristov, and V. Y. Kachorovskii, “Coherent spin transport through helical edge states of topological insulator,” *npj Comput Mater*, vol. 6, no. 174, 2020.
- [17] I. Yahniuk, S. S. Krishtopenko, G. Grabecki, and et al., “Magneto-transport in inverted hgte quantum wells,” *npj Quantum Mater*, vol. 4, no. 13, 2019.
- [18] J. T. Cheung, G. Niizawa, J. Moyle, N. P. Ong, B. M. Paine, and T. Vreeland, “Hgte and cdte epitaxial layers and hgte–cdte superlattices grown by laser molecular beam epitaxy,” *Journal of Vacuum Science & Technology A*, vol. 4, no. 4, pp. 2086–2090, 1986.
- [19] B. A. Volkov and O. A. Pankratov, “Безмассовые двумерные электроны в инверсном контакте,” *Письма в ЖЭТФ*, vol. 42, no. 4, pp. 145–148, 1985.
- [20] O. E. Raichev, “Effective hamiltonian, energy spectrum, and phase transition induced by in-plane magnetic field in symmetric hgte quantum wells,” *Phys. Rev. B*, vol. 85, p. 045310, Jan 2012.

- [21] M. Z. Hasan and C. L. Kane, “Colloquium: Topological insulators,” *Rev. Mod. Phys.*, vol. 82, pp. 3045–3067, Nov 2010.
- [22] K. Nowack, E. Spanton, M. Baenninger, and et al., “Imaging currents in hgte quantum wells in the quantum spin hall regime,” *Nature Mater*, vol. 12, p. 787–791, 2013.
- [23] Z. Kvon, K. Dantscher, M. T. Scherr, and et al., “Terahertz resistive response of a two-dimensional topological insulator in a quasiballistic transport regime,” *Jetp Lett.*, vol. 104, p. 716–720, 2016.
- [24] A. Roth, C. Brüne, H. Buhmann, L. W. Molenkamp, J. Maciejko, X.-L. Qi, and S.-C. Zhang, “Nonlocal transport in the quantum spin hall state,” *Science*, vol. 325, no. 5938, pp. 294–297, 2009.
- [25] J. Strunz, J. Wiedenmann, C. Fleckenstein, and et al., “Interacting topological edge channels,” *Nat. Phys.*, vol. 16, p. 83–88, 2020.
- [26] NT-MDT, “Afm lithography scratching,” 2021.
- [27] Wikipedia, “Molecular beam epitaxy,” 2021.
- [28] Frast-M, “Литография,” 2021.
- [29] M. J. Mühlbauer, *Nanolithography on Mercury Telluride*. doctoralthesis, Universität Würzburg, 2015.
- [30] Frast-M, “Проявитель резиста,” 2021.
- [31] K. Bendias, S. Shamim, O. Herrmann, A. Budewitz, P. Shekhar, P. Leubner, J. Kleinlein, E. Bocquillon, H. Buhmann, and L. W. Molenkamp, “High mobility hgte microstructures for quantum spin hall studies,” *Nano Letters*, vol. 18, no. 8, pp. 4831–4836, 2018.
- [32] Microchemicals, “Aluminium etching,” 2021.
- [33] Protehnology, “Фоторезисты для обратной взрывной литографии,” 2021.
- [34] E. Tikhonov, D. Shovkun, V. Khrapai, and et al., “Shot noise of the edge transport in the inverted band hgte quantum wells,” *Jetp Lett.*, vol. 101, no. 708–713, 2015.

- [35] M. Vannikov and V. A. Prudkoglyad, *Выпускная квалификационная работа (бакалаврская работа). Транспортные свойства гетероструктур на основе HgTe*. Долгопрудный: Московский физико-технический институт, 2017.
- [36] V. Shirshova, “Технология влагозащиты и электроизоляции изделий РЭА полипараксилиленом,” *Компоненты и технологии*, vol. 2, 2002.