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, доцент факультета физики НИУ ВШЭ

Е.С. Тихонов

Руководитель
д.ф.-м.н., в.н.с. ФИАН, доцент 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 = 300K 51
6.1.2 4-точечные измерения при T = 300K 51
6.1.3 Подтверждения проводимости травленной области 52
6.1.4 Локальные измерения при T = 3K 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 зарядовой 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 свойств 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 WTe_2, и тонких плёнках 1T'-MoS_2, 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 длинна 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 спину 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 спину 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

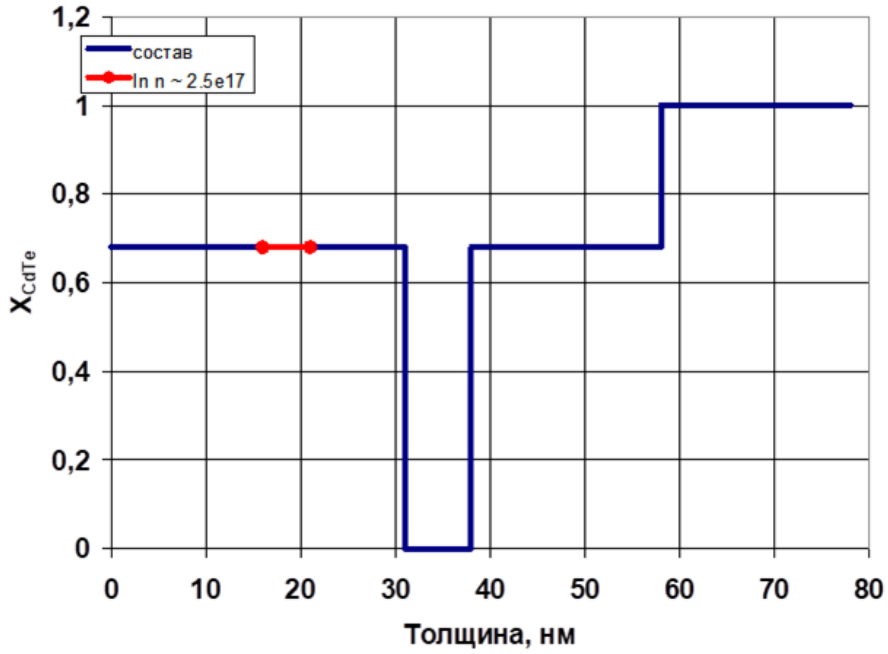

Рис. 2.1. (в цвете) Распределение состава образца квантовой ямы по толщине для используемого в работе типичного образца КРТ130403, выращенного в группе Н.Н. Михайлова в ИФП СО РАН.

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-

(a) (b) (c)

Ðèñ. 2.2. (â öâåòå) Ñðåçû êâàíòîâîé ÿìû. (a) ñõåìàòè÷íîå èçîáðàæåíèå; (b) èçîáðàæåíèå ñðåçà êâàíòîâîé ÿìû â ïðîñâå÷èâàþùèé ýëåêòðîííûé ìèêðîñêîï. Ñðåç ñòðóêòóðû áûë ïðîèçâåä¼í ïðè ïîìîùè ôîêóñèðîâàííîãî èîííîãî ïó÷êà Ga. Ðèñóíîê èç ñòàòüè [17]. (c) Ýëåêòðîííàÿ ôîòîãðàôèÿ êðàÿ ñòðàâåííé êâàíòîâîé ÿìû òîëùèíîé 8íì. ßìà âèäíà íà ôîòîãðàôèè â âèäå ãîðèçîíòàëüíîé áåëîé ïîëîñêè, íà êîòîðóþ óêàçûâàåò ñòðåëêà. Ðèñóíîê èç ñòàòüè [14]

ëó÷åâîé ýïèòàêñèè [18] â âûñîêîì âàêóóìå. Â ðàáîòå èñïîëüçîâàíû îáðàçöû, ïðîèçâåä¼íûå ãðóïïîé Í.Í. Ìèõàéëîâà â Íîâîñèáèðñêå [9].

Êâàíòîâàÿ ÿìà âûðàùèâàåòñÿ íà ïîäëîæêå GaAs äèàìåòðîì 2 äþéìà îðèåíòàöèåé (013) . Ïîâåðõíîñòü ÿìû èìååò ò¼ìíûé öâåò, çåðêàëüíûé áëåñê è ÿâëÿåòñÿ äîñòàòî÷íî ìÿãêîé: ïî÷òè ëþáîå ïðèêîñíîâåíèå ê íåé ïèíöåòîì îñòàâëÿåò âìÿòèíó èëè öàðàïèíó, ïðè òîì ÷òî GaAs ïîäëîæêà îñòà¼òñÿ íåïî-âðåæä¼íííé. Èçãîòîâëåííàÿ íà ïîâåðõíîñòè ïîäëîæêè ìåçà-ñòðóêòóðà áåç çàòâîðà âûãëÿäèò êàê ïîêàçàíî íà ðèñ. 2.3. Ïîäðîáíî ñòàäèè èçãîòîâëåíèÿ ñòðóêòóðû ïîñàíû íèæå â ãëàâå "Ýòàïû èçãîòîâëåíèÿ ñòðóêòóðû"

2.2. Ñïåêòð è êðàåâûå ñîñòîÿíèÿ

Ñóùåñòâîâàíèå áåçìàññîâûõ ñîñòîÿíèé íà ãðàíèöå äâóìåðíîé ñòðóêòóðû ñ âàêóóìîì (ñì ðèñ. 2.4) áûëî ÷àñòè÷íî ïðåäñêàçàíî åù¼ â ñòàòüå [19]. Äëÿ ñóùåñòâîâàíèÿ êðàåâûõ ñîñòîÿíèé íåîáõîäèì êîíòàêò ìåæäó ïîëóïðîâîäíèêàìè ñ ïðÿìûì è èíâåðñíûì ñïåêòðîì. Â ñëó÷àå êâàíòîâîé ÿìû òåëëóðèäà ðòóòè èíâåðñíûé ñïåêòð äîñòèãàåòñÿ çà ñ÷åò ñèëüíîãî ñïèí-îðáèòàëüíîãî âçàèìîäåéñòâèÿ â HgTe è ðàçìåðíîãî êâàíòîâàíèÿ, çàâèñÿùåãî îò òîëùèíû ÿìû

Ðèñ. 2.3. (â öâåòå) Ôîòîãðàôèÿ îáðàçöà ïîñëå èçãîòîâëåíèÿ ñòðóêòóðû è íàíåñåíèÿ ïîäçàòâîðíîãî äèýëåêòðèêà. Îáðàçåö òåëëóðèäà ðòóòè îáâåä¼í êðàñíûì öâåòîì; îí ïðèêëååí äâóñòîðîííèì ñêîò÷åì ê êðåìíèåâîé ïîäëîæêå äëÿ óäîáñòâà îáðàùåíèÿ ñ îáðàçöîì. Ðàçìåð èçîáðàæ¼ííé íà ðèñóíêå ñòðóêòóðû ïîðÿäêà ïÿòè ìèëëèìåòðîâ, òîëùèíà âñåé ïëàñòèíû òåëëóðèäà ðòóòè ïîðÿäêà ìèëëèìåòðà.

(ñì ðèñ. 2.5); ïðÿìûì ñïåêòðîì â ýòîì ñëó÷àå ìîæíî ñ÷èòàòü ñïåêòð âàêóóìà $E(p) = p\sqrt{p^2c^2 + m^2c^4}$.

Ðèñ. 2.4. (â öâåòå) Îáú¼ìíûå è êðàåâûå òîêè, òåêóùèå ïî îáðàçöó èç êîíòàêòà 2 â êîíòàêò 1. Äëèíà îáðàçöà L ìíîãî áîëüøå åãî øèðèíû W. Îðàíæåâûì îáîçíà÷åíû êðàåâûå òîêè, òåêóùèå ïî îáîèì êðàÿì îáðàçöà: íàïðÿìóþ èç êîíòàêòà 2 â êîíòàêò 1 è èç êîíòàêòà 2 â êîíòàêò 1 ÷åðåç êîíòàêòû 3 è 4. Çåë¼íûì öâåòîì îáîçíà÷åíû ëèíèè òîêà, âûçâàííûå îáú¼ìíûìè ñîñòîÿíèÿìè â îáðàçöå. Íàïðÿæåíèå â äàííîé ñõåìå èçìåðÿåòñÿ íà êîíòàêòàõ 3 è 4.

Êâàíòîâàÿ ÿìà òåëëóðèäà ðòóòè èìåòò èíâåðòèðîâàííûé ñïåêòð, åñëè å¼ òîëùèíà ëåæèò â ïðåäåëå îò 6.2 ä 26.3 íì äî 15 ä 16 íì (ñì ðèñ. 2.5). Îðèåíòàöèÿ ïîäëîæêè (100) èëè (113) íà ñïåêòð ÿìû âëèÿåò ñëàáî [10], [20].

Ïîìèìî èíâåðñèè çîí äëÿ òîïîëîãè÷åñêîé çàùèù¼ííîñòè ýòèõ áåñùåëåâûõ êðàåâûõ ñîñòîÿíèé íåîáõîäèìî òàêæå íàëè÷èå ñèìåòðèè ïî îáðàùåíèþ

Ðèñ. 2.5. (â öâåòå) Êà÷åñòâåííûé âèä çàâèñèìîñòè ýíåðãèè äíà îñíîâíûõ ïîäçîí ðàçìåðíîãî êâàíòîâàíèÿ îò òîëùèíû ÿìû. E_1, E_2 ýíåðãèè äíà ýëåêòðîííûõ ïîäçîí, H_1, H_2, H_3 ýíåðãèè äíà äûðî÷íûõ ïîäçîí. Êàðòèíêà èç îáçîðà [10]

âðåìåíè è ðàñùåïëåíèå êðàâûõ ìîä ïî ñïèíó, ÷òî îáåñïå÷èâàåòñÿ ñèëüíûì ñïèí-îðáèòàëüíûì âçàèìîäåéñòâèåì â ñòðóêòóðå [21]. Òîïîëîãè÷åñêàÿ çàùèù¼ííîñòü ýòèõ ñîñòîÿíèé ãîâîðèò î íåâîçìîæíîñòè ðàçðóøèòü èõ íåìàãíèòíûìè âçàèìîäåéñòâèÿìè. Ìàãíèòíîå ïîëå ñïîñîáíî ðàçðóøèòü ýòè ñîñòîÿíèÿ, òàê êàê îíî íàðóøàåò ñèììåòðèþ ïî îðàùåíèþ âðåìåíè.

Ñëîâî èçîëÿòîð èñïîëüçóåòñÿ â òîì ñìûñëå, ÷òî ñïåêòð îáú¼íûõ ñîñòîÿíèé èìååò ùåëü (ñì. ðèñ. 2.6), òàê ÷òî óïðàâëÿÿ óðîâíåì Ôåðìè â ñèñòåìå ïðè ïîìùè çàòâîðíîãî íàïðÿæåíèÿ âîçìîæíî ïåðåâåñòè ñèñòåìó â ñîñòîÿíèå ñ íèçêîé ïðîâîäèìîñòüþ ïî îáú¼ì, â êîòîðîì òðàíçèñòîðíûé òîê áóäåò ïðåäïîëîæèòåëüíî ðàñïðîñòðàíÿòüñÿ ïî êðàþ.

2.3. Îïèñàíèå êðàåâûõ ñîñòîÿíèé

2.3.1. Äåòåêòèðîâàíèå êðàåâûõ ñîñòîÿíèé

Äëÿ äåòåêòèðîâàíèÿ êðàåâûõ êàíàëîâ ñóùåñòâóåò íåñêîëüêî ñïîñîáîâ. Íàèáîëåå ðàñïðîñòðàíåíî èçìåðåíèå íåëîêàëüíîãî òðàíñïîðòà. Â ýêñïåðèìåíòå ñ ãåîìåòðèåé, èçîáðàæ¼ííîé íà ðèñ. 2.4, òîê ìîæåò ðàñïðîñòðàíÿòüñÿ ìåæäó êîíòàêòàìè 1 è 2 äâóìÿ ñïîñîáàìè: ÷åðåç îáúåìíûå ñîñòîÿíèÿ, è ÷åðåç êðàåâûå. Åñëè óðîâåíü Ôåðìè ñèñòåìû íàõîäèòñÿ â çîíå ïðîâîäèìîñòè, òî ïî÷òè âåñü òîê ïîòå÷¼ò ïî îáú¼ìó è ëèøü ýêñïîíåíöèàëüíî ìàëàÿ (ïî ïðàìåòðó L=W) äîëÿ íàïðÿæåíèÿ óïàä¼ò ìåæäó êîíòàêòàìè 3 è 4. Â

Ðèñ. 2.6. (â öâåòå) Ðàññ÷èòàííûé p ìåòîäîì ñïåêòð êâàíòîâîé ÿìû òåëëóðèäà ðòóòè øèðèíîé 8.5 íì. Êðàñíûìè ïóíêòèðíûìè ëèíèÿìè îáîçíà÷åí äèðàêîâñêèé ñïåêòð êðàåâûõ ñîñòîÿíèé, ñïëîøíûìè ëèíèÿìè îáîçíà÷åí ñïåêòð îáú¼ìíûõ ñîñòîÿíèé. Ðèñóíîê âçÿò èç îáçîðà [10] è ñòàòüè [20]

ñëó÷àå æå, êîãäà óðîâåíü Ôåðìè íàõîäèòñÿ â îáú¼ìíîé ùåëè, ïðîõîä òîêà îñóùåñòâëÿþò ñîñòîÿíèÿ íà ëåâîì è ïðàâîì êðàå ñòðóêòóðû. Âåëè÷èíà òîêà íà ëåâîì è íà ïðàâîì êðàþ áóäåò ïðîïîðöèîíàëüíà îòíîøåíèþ ñîïðîòèâëå-íèé ñîîòâåòñòâóþùèõ êðàåâûõ êàíàëîâ. Â ïðåäïîëîæåíèè áàëëèñòè÷åñêîãî òðàíçèñòîðà (áåç ðàññåÿíèÿ) ìåæäó êîíòàêòàìè, â ñîîòâåòñòâèè ñ ïðåäñêàçà-íèåì òîïîëîãè÷åñêîé òåîðèè, âåëè÷èíà òîêà ÷åðåç ëåâûé êðàé áóäåò ïîðÿäêà âåëè÷èíû òîêà ÷åðåç ïðàâûé êðàé. Â òàêîì ñëó÷àå ïàäåíèå íàïðÿæåíèÿ íà êîíòàêòàõ 3 è 4 áóäåò âåëèêî. Òàê äåòåêòèðóþò êðàåâûå ñîñòîÿíèÿ â áîëüøèíñòâå ýêñïåðèìåíòîâ ñ äâóìåðíûìè òîïîëîãè÷åñêèìè èçîëÿòîðàìè.

Äðóãîå ñâèäåòåëüñòâî ñóùåñòâîâàíèÿ êðàåâûõ êàíàëîâ ïðîâîäèìîñòè ýòî âèçóàëèçàöèÿ òîêà, òåêóùåãî ïî ñòðóêòóðå, ïðè ïîìùè âû÷èñëåíèÿ åãî ïî èçìåðåíîìó ñêàíèðóþùèì ÑÊÂÈÄîì [22] ìàãíèòíîìó ïîëþ. Â ñõåìå, èçîáðàæ¼íííé íà ðèñóíêå 2.7, ÑÊÂÈÄ èçìåðÿë ðàñïðåäåëåíèå ìàãíèòíîãî ïî-ëÿ âáëèçè îáðàçöà, ïî êîòîðîìó ò¼ê òîê â ðåæèìå ïðîâîäèìîñòè è îòñóòñòâèÿ ïðîâîäèìîñòè ïî îáú¼ìó. Äàëåå èçìåðåííîå ìàãíèòíîå ïîëå ïåðåñ÷èòûâà-ëîñü â òîê, òåêóùèé ïî îáðàçöó, è ïîëó÷àëàñü êàðòèíêà, ñâèäåòåëüñòâóþùàÿ î òîì, ÷òî îñíîâíàÿ ìàññà òîêà â ðåæèìå îáú¼ìíîãî èçîëÿòîðà òå÷¼ò ïî êðàþ.

Åù¼ îäèí èíòåðåñíûé ïðèìåð ïðîÿâëåíèÿ êðàåâûõ êàíàëîâ ñ äèðàêîâ-ñêèì ñïåêòðîì ýòî îáíàðóæåíèå ýôôåêòà ôîòîñîïðîòèâëåíèÿ íà äëèíàõ

Ðèñ. 2.7. (â öâåòå) (a) èëëþñòðàöèÿ èçìåðåíèÿ ìàãíèòíîãî ïîëÿ (êðàñíûé öâåò), ñîçäàâàåìîãî êðàåâûì òîêîì (ñèíèé öâåò) êâàíòîâîé ÿìû (áåëûé öâåò) ïðè ïîìîùè ÑÊÂÈÄà (áåëàÿ ïåòëÿ); (b) ñõåìà èçìåðåíèÿ è ðåçóëüòàò ò¼õòî÷å÷íîãî èçìåðåíèÿ ñîïðîòèâëåíèÿ. ðèñóíêè e, g, i (òðè ïðàâûõ ðèñóíêà) ñíèìàëèñü â ðåæèìå îáú¼ìíîãî èçîëÿòîðà, d, f, h (òðè ëåâûõ ðèñóíêà) ñíèìàëèñü ñ èçîëÿòîðíûì îá¼ìîì; d è e ðàñïðåäåëåíèå ìàãíèòíîãî ïîòîêà ïî îáðàçöó; f, g x-êîìïîíåíòà òîêà â îáðàçöå; h, i y-êîìïîíåíòà òîêà. Êàðòèíêà èç ñòàòüè [22].

âîëí, ìåíüøèõ øèðèíû îáú¼ìíîé ùåëè. Â ýêñïåðèìåíòå [23] èçìåðÿëñÿ ýô-
îåêò îò îáëó÷åíèÿ êâàíòîâîé ÿìû, íàõîäÿùåéñÿ ïîä ïðîçðà÷íûì çàòâîðîì,
íà ñîïðîòèâëåíèå ñòðóêòóðû. Îêàçàëîñü, ÷òî ñîïðîòèâëåíèå ñòðóêòóðû ïîä
ëàçåðíûì ïó÷êîì ñ äëèíîé âîëíû, ñîîòâåòñòâóþùåé ïî ýíåðãèè ïðèìåðíî 1/3
îò âåëè÷èíû ùåëè íà 3 ïîðÿäêà óìåíüøàëîñü êàê â ëîêàëüíîì, òàê è â íåëî-
êàëüíîì ðåæèìå ïî ñðàâíåíèþ ñî ñòðóêòóðîé, íå ïîäâåðæåííîé îáëó÷åíèþ
(ñì. ðèñ 2.8). Îäíî èç âîçìîæíûõ îáúÿñíåíèé ýòîãî ýôôåêòà çàêëþ÷àåòñÿ
â âîçìîæíîñòè ôîòîíäóöèðîâàííîãî äèïîëüíîãî ïåðåõîäà ìåæäó êðàâûìè
ñîñòîÿíèÿìè.

Ðèñ. 2.8. (â öâåòå) çàâèñèìîñòü ((a)) ëîêàëüíîãî, (b) íåëîêàëüíîãî ñîïðîòèâëåíèÿ è ôîòîñîïðîòèâëåíèÿ îò ýôôåêòèâíîãî çàòâîðíãî íàïðÿæåíèÿ; êðàñíûå êðèâûå îáû÷íîå ñîïðîòèâëåíèå, ÷¼ðíûå ôîòîñîïðîòèâëåíèå. Êàðòèíêà èç ñòàòüè [23].

Ñâÿçü íàïðàâëåíèÿ òîêà è ñïèíà íà ìàêðîñêîïè÷åñêèõ ðàññòîÿíèÿõ ïðî-
ÿâëÿåòñÿ, íàïðèìåð, â ýêñïåðèìåíòå ñ ôåððîìàãíèòíûìè êîíòàêòàìè [13].

2.3.2. Îïèñàíèå ñîïðîòèâëåíèÿ êðàâûõ ñîñòîÿíèé

Òåîðåòè÷åñêè îæèäàåòñÿ, ÷òî â ñèñòåìå áåç ìàãíèòíûõ ïðèìåñåé ðàññå-
ÿíèå íàçàä ïîäâåëåíî, òàê êàê îíî ïðîèñõîäèò ñ ïåðâîðîòîì ñïèíà, à çíà÷èò
êðàâûå êàíàëû äîëæíû èìåòü áàëëèñòè÷åñêèé òðàíñïîðò ìåæäó êîíòàêòà-
ìè. Êàæäûé êðàâîé êàíàë âûðîæäåí ïî ñïèíó, ñì. ðèñ. 2.9. Íàïðàâëåíèþ
ñïèíà ñòðîãî ñîîòâåòñòâóåò íàïðàâëåíèå èìïóëüñà, ïîýòîìó íà ýòîì ðèñóíêå
êàæäîìó êðàþ, âåðõíåìó è íèæíåìó, ñîîòâåòñòâóåò äâà îäíîìåðíûõ êàíàëà

ïðîâîäèìîñòè: ñî ñïèíîì ââåðõ è ñî ñïèíîì âíèç, ïðè ýòîì òîêè â íèõ èìåþò ðàçëè÷íûå íàïðàâëåíèÿ è â ðàâíîâåñèè êîìïåíñèðóþò äðóã äðóãà.

Ðèñ. 2.9. (â öâåòå) Ñîîòâåòñòâåíà íàïðàâëåíèÿ èìïóëüñà è íàïðàâëåíèÿ ñïèíà â êðàåâîì òîêå. Ðèñóíîê èç îáçîðà [10]

Èìåííî òàêîé áàëëèñòè÷åñêèé òðàíçèñòîð è íàáëþäàåòñÿ íà îáðàçöàõ ìàëîãî ðàçìåðà [24]. Íà ðèñóíêå 2.10 (a) íàðèñîâàíà ñõåìà ìèêðîíîíîãî ìîñòèêà, â êîòîðîé èçìåðÿåòñÿ íåëîêàëüíîå ñîïðîòèâëåíèå. Òîê ïóñêàåòñÿ ÷åðåç êîíòàêòû 1-4, íàïðÿæåíèå èçìåðÿåòñÿ íà êîíòàêòàõ 2-3. Ïî ôîðìóëå Ëàíäàóýðà-Áþòèêåðà ñîïðîòèâëåíèå îäíîìåðíîãî êàíàëà ðàâíî êâàíòó ïðîâîäèìîñòè $R_q = h=e^2$, ïîýòîìó ýëåêòðè÷åñêóþ ñõåìó îáðàçöà (îáú¼ì êîòîðîãî íàõîäèòñÿ â ùåëè) ìîæíî ïåðåðèñîâàòü êàê íà ðèñ. 2.10 (b). Íåñëîæíûé ðàñ÷åò ïðèâîäèò ê ñîïðîòèâëåíèþ $R_{14;23} = U_{23}=I_{12} = Rq=4$. Ýòîò ýêñïåðèìåíò íåïëîõî ñîãëàñóåòñÿ ñ ïîëæåíèåì î áàëëèñòè÷åñêîì òðàíçèñòåå ìåæäó êîíòàêòàìè. Êîíå÷íî, äëÿ áîëåå òî÷íîãî ðàññìîòðåíèÿ ýëåêòðè÷åñêîé ñõåìû íåîáõîäèìî ó÷èòûâàòü ìåõàíèçì, ïî êîòîðîìó îäèí êðàåâîé êàíàë ñîåäèíÿåòñÿ ñî âòîðûì, åñëè èõ ðàçúåäèíÿåò êîíòàêò. Îäíàêî ñîïðîòèâëåíèåì ìåæäó äâóìÿ òàêèìè ïîñëåäîâàòåëüíûìè êðàåâûìè êàíàëàìè (îðàíæåâûé r íà ðèñ. 2.10 (b)) ïî ñðàâíåíèþ ñ èõ ñîïðîòèâëåíèåì R_q ìîæíî ïðåíåáðå÷ü.

Ïîëîæåíèå î áàëëèñòè÷íîñòè êðàåâîãî òðàíçèñòîðà â òîïîëîãè÷åñêîì èçîëÿòîðå íà îñíîâå òåëëóðèäà ðòóòè õîðîøî âûïîëíÿåòñÿ äëÿ ìèêðîñêî-ïè÷åñêèõ îáðàçöîâ. Îäíàêî äëÿ îáðàçöîâ ñ ðàññòîÿíèåì ìåæäó êîíòàêòàìè, áîëüøèì íåêîòîðîé âåëè÷èíû, êîòîðàÿ â ýêñïåðèìåíòàõ ðàçíûõ ãðóïï ñîñòàâëÿåò îò 2 äî 10 ìèêðîí, ðàñ÷¼ò ýôôåêòèâíîé ýëåêòðè÷åñêîé ñõåìû êðàåâûõ

(a) (b)

Ðèñ. 2.10. (â öâåòå) Èçìåðåíèå ìèêðîííîãî ìîñòèêà. (a) ðåçóëüòàò èçìåðåíèé, (b) ýêâèâàëåíòíàÿ ñõåìà äëÿ òîêà êðàåâûõ ñîñòîÿíèé ïðè íåïðîâîäÿùåì îáú¼ìå.

êàíàëîâ íåîáõîäèìî ïðîâîäèòü äóãèì îáðàçîì. Ýôôåêòèâíàÿ ýëåêòðè÷åñêàÿ ñõåìà äëÿ îáðàçöà ñ áîëüøèì ðàññòîÿíèåì ìåæäó êîíòàêòàìè èçîáðàæåíà íà ðèñ. 2.11.

Ðèñ. 2.11. (â öâåòå) Ýôôåêòèâíàÿ ýëåêòðè÷åñêàÿ ñõåìà äëÿ êðàåâûõ êàíàëîâ èç îáçîðà [10]. Ñîïðîòèâëåíèå êðàåâîãî êàíàëà ìåæäó äâóìÿ êîíòàêòàìè $R_k = U_k/I_k = R_q L_k/l$, ãäå L_k ðàññòîÿíèå ìåæäó êîíòàêòàìè, l äëèíà ñâîáîäíîãî ïðîáåãà ýëåêòðîíîâ â ýòîì êàíàëå

Åñòåñòâåííî, íåîáõîäèìî ïîíèìàòü ãðàíèöû ïðèìåíèìîñòè ñõåìû 2.11. Âî-ïåðâûõ, ïðè áîëüøèõ çíà÷åíèÿõ òîêà áóäåò ïðîèñõîäèòü øóíòèðîâàíèå

êðàåâûõ êàíàëîâ îñòàòî÷íûìè îáú¼ìíûìè [14]. Âî-âòîðûõ, åñëè äâà êðàåâûõ êàíàëà ðàñïîëîæåíû íà ìàëîì ðàññòîÿíèè äðóã îò äðóãà, òî ìåæäó íèìè ñóùåñòâóåò âçàèìîäåéñòâèå, ïðèâîäÿùåå ê óâåëè÷åíèþ ñîïðîòèâëåíèÿ [25]. Ïåðâîå ÿâëåíèå ëåãêî ïîíÿòü èç ïðîñòûõ êëàññè÷åñêèõ ñîîáðàæåíèé î ïîâåäåíèè òîêà. Âòîðîå ïîëîæåíèå âûçûâàåò èíòåðåñ.

2.3.3. Âçàèìîäåéñòâèå êðàåâûõ ñîñòîÿíèé

Íà ðèñ. 2.12 èçîáðàæåíà 4-òî÷å÷íàÿ ñõåìà èçìåðåíèÿ ñîïðîòèâëåíèÿ òîíêîãî ïåðåøåéêà èç êâàíòîâîé ÿìû. Èç ðèñóíêà âèäíî, ÷òî ïðè íåêîòîðîé øèðèíå ïåðåøåéêà êðàåâûå êàíàëû, òåêóùèå ïî âåðõó è íèçó ïåðåøåéêà, âçàèìîäåéñòâóþò òàêèì îáðàçîì, ÷òî âìåñòî îæèäàåìîãî äëÿ áîëüøèõ ïåðåøåéêîâ ñîïðîòèâëåíèÿ R_q=2 íàáëþäàåòñÿ ñîïðîòèâëåíèå R_q. Îäíà èç âîçìîæíûõ èíòåðïðåòàöèé òàêîâà: èç-çà âçàèìîäåéñòâèÿ äâóõ êàíàëîâ ïðîâîäèìîñòü ïî îäíîìó èç íèõ ïðåêðàùàåòñÿ.

Ðèñ. 2.12. (â öâåòå) 4-òî÷å÷íàÿ ñõåìà èçìåðåíèÿ ñîïðîòèâëåíèÿ òîíêîãî ïåðåøåéêà êâàíòîâîé ÿìû. Øèðèíà ïåðåøåéêà â ýêñïåðèìåíòå âàðüèðîâàëàñü â ïðåäåëàõ îò 25íì äî 250íì. Øèðèíà ïåðåøåéêà â èçìåðåíèÿõ (c) ðàâíÿëàñü 150íì. Èç ñòàòüè [25].

Ãëàâà 3. Ïîñòàíîâêà çàäà÷è

Â ðàáîòå ïîñòàâëåíû ñëåäóþùèå çàäà÷è:

1. Íàó÷èòüñÿ ñîçäàâàòü óñòðîéñòâà íà îñíîâå êâàíòîâîé ÿìû òåëåóðèäà ðòóòè è ïðîíàáëþäàòü êðàåâîé òðàíçèñòîð.
2. Èçãîòîâèòü è èññëåäîâàòü ýëåêòðîííûé òðàíçèñòîð â ñòðóêòóðå ñ äâóìÿ êðàÿìè ïðåäåëüíî ðàçíûõ ðàçìåðîâ: îäèí êîðîòêèé (ðàçìåðà ïîðÿäêà èëè íà ïîðÿäîê áîëüøå äëèíû ðàññåÿíèÿ â êðàåâîì êàíàëå) è îäèí äëèííûé (äëèíà êîòîðîãî ìîãî áîëüøå äëèíû êîðîòêîãî).
3. Îñâîèòü èçãîòîâëåíèå íàíîñòðóêòóð èç òåëëóðèäà ðòóòè ïîñðåäñòâîì ëèòîãðàôèè àòîìíî-ñëîéâûì (ÀÑÌ) ìèêðîñêîïîì è ôîêóñèðîâàííûì èîííîì ïó÷êîì è èçãîòîâëåíèå ìàññèâîâ ìåëêèõ îòâåðñòèé, ïëîòíî ðàñïîëîæåííûõ âáëèçè îäíîãî èç êðà¼â äëÿ äàëüíåéøåãî èññëåäîâàíèÿ âîçäåéñòâèÿ íà ðàññåÿíèå êðàåâûõ ñîñòîÿíèé.

3.1. Èçãîòîâëåíèå ñòðóêòóð è èññëåäîâàíèå èõ òðàíñïîðòíûõ ñâîéñòâ

Ïåðâàÿ çàäà÷à ýòîé ðàáîòû íàó÷èòüñÿ èçãîòàâëèâàòü ïîëåâûå ñòðóêòóðû íà îñíîâå òåëëóðèäà ðòóòè è èçìåðÿòü ýëåêòðîííûå ñâîéñòâà óñòðîéñòâ íà èõ îñíîâå. Ôîëüêî ñïóñòÿ ãîäû ïîñëå ïåðâîãî íàáëþäåíèÿ çíà÷åíèÿ ñîïðîòèâëåíèÿ, áëèçêîãî ê êâàíòîâàííîìó â êðàåâûõ ñîñòîÿíèÿõ HgTe ãðóïïîé Ìîëåíêàìïà, ýòîò âèä òðàíñïîðòà áûë èçìåðåí â äðóãîé ëàáîðàòîðèè , ñì. îáçîð [10], ÷òî ïîêàçûâàâàò òåõíîëîãè÷åñêóþ ñëîæíîñòü çàäà÷è.

3.2. Ïîäàâëåíèå êðàåâûõ êàíàëîâ ãåîìåòðèåé

Âòîðàÿ çàäà÷à ýòî ñîçäàíèå óñòðîéñòâà, â êîòîðîì ïðèñóòñòâîâàë áû ìèêðîñêîïè÷åñêèé è ìàêðîñêîïè÷åñêèé êðàé. Äëèííûé (ìàêðîñêîïè÷åñêèé) êðàé ìîæåò áûòü ðåàëèçîâàí ïóòåì ñîçäàíèÿ îòâåòâëåíèÿ îò ñòðóêòóðû ñóììàðíûì ïåðèìåòðîì ïîðÿäêà 50ìì, ò.í. ðîãà , íàõîäÿùååñÿ ïîä îáùèì çàòâîðîì. Åñëè ñîïðîòèâëåíèå êðàÿ ïðîïîðöèîíàëüíî åãî äëèíå, òî äëèííûé êðàé áóäåò îáëàäàòü î÷åíü ìàëûì êîíäàêòàíñîì3.1. Äîñòóïíàÿ ïëîùàäü

(a)

(b)

Ðèñ. 3.1. (â öâåòå) Ñõåìà ñòðóêòóðû ñ äèèííûì êðàåì. Êðàííûì öâåòîì îáîçíà÷åí ñëîé êâàíòîâîé ÿìû, ñèíèì ñëîé çàòâîðà. (a) âèä ìîñòèêà, (b) âèä âñåé ñòðóêòóðû

ýòèõ ðîãîâ îïðåäåëÿëàñü äîñòóïíîé äëÿ èñïîëüçîâàíèÿ ïëîùàäüþ îáðàçöà, êîòîðàÿ îãðàíè÷èâàëàñü æåëàíèåì ñýêîíîìèòü ìàòåðèàë êâàíòîâîé ÿìû, à òàêæå ðàçìåðîì äåðæàòåëÿ îáðàçöà èçìåðèòåëüíîé óñòàíîâêè. Ìèíèìàëü-íûé ðàçìåð ýëåìåíòà ðîãîâ îïðåäåëÿëñÿ âîçìîæíîñòÿìè ëèòîãðàôèè. Ïðè

ôèêñèðîâàííîé äîñòóïíîé ïëîùàäè è ôèêñèðîâàííì ìèíèìàëüíì ðàçìåðå ëèòîãðàôèè ïðîñòåéøèì âàðèàíòì ÿâëÿåòñÿ ãðåá¼íêà, èçîáðàæ¼íàÿ íà ðèñóíêå. Äëÿ óìåíüøåíèÿ øóíòèðîâàíèÿ îáú¼ìîì êðàÿ, âñå ïîäâîäÿùèå ê ìàëåíüêèì ýëåìåíòàì ïëîùàäè èçãîòàâëèâàëèñü â ìàêñèìàëüíî âîçìîæíîì ðàçìåðå. Ýòîò ðàçìåð îãðàíè÷èâàëñÿ òîëüêî ìàñøòàáîì ìîñòèêà è íåîáõîäè-ìîñòüþ ðàçâåäåíèÿ îáëàñòåé ïîäâîäà êîíòàêòîâ.
Äî íàñòîÿùåãî ìîìåíòà â ëèòåðàòóðå íå áûëà îïèñàíà ñòðóêòóðà òàêîãî òèïà. Â ðàáîòå ñòàâèòñÿ çàäà÷à èçó÷èòü ýëåêòðîííûé òðàíçèñòîð â íåé ïðè îïèñàííîé âûøå ãåîìåòðèè îáðàçöà.

Ïðè ïðîïóñêàíèè òîêà ÷åðåç êîíòàêòû $i;j$ è èçìåðåíèè íàïðÿæåíèÿ íà êîíòàêòàõ $k;l$ ñõåìû 3.2, îæèäàåòñÿ óâèäåòü ñëåäóþùåå ñîîòíîøåíèÿ íà ñõåìå $R_{ij;kl} = U_{kl}=I_{ij}$ â ðåæèìå òîíîëîãè÷åñêîãî èçîëÿòîðà:

a $R_{15;76}$ & R_q Ðàññòîÿíèå ìåæäó ïîåíöèàëüíûìè êîíòàêòàìè ðàâíî ïðèìåðíî 10 ìèêðîíàì, ïîýòîìó ëîêàëüíîå ñîïðîòèâëåíèå íà êîíòàêòàõ 7, 6 äîëæíî ðàâíÿòüñÿ èëè áûòü íåìíîãèì áîëüøå êàíòà ñîïðîòèâëåíèÿ, ïîòîì ÷òî â ýòîì ñëó÷àå êðàé, ïðîõîäÿùèé ÷åðåç ýòè äâà êîíòàêòà, áóäåò ïåðåíîñèòü âåñü òîê èç êîíòàêòà 1 â 5.

b $R_{15;34}$ R_q Òàê êàê ÷åðåç êîíòàêòû 3, 4 èä¼ò î÷åíü ìàëî òîêà èç-çà äëèíû ñîîòâåòñòâóþùåãî êðàÿ, íàïðÿæåíèå ìåæäó êîíòàêòàìè 3,4 áóäåò ñèëüíî ìåíüøå íàïðÿæåíèÿ íà êîíòàêòàõ 1, 5 â ýòîé æå ãåîìåòðèè òîêà.

c $R_{18;76}$ R_q Òàê êàê êîíòàêòû 7, 6 ëåæàò íà äëèííîì êðàþ â äàííîé ãåîìåòðèè, òîê ÷åðåç íèõ áóäåò êðàéíå ìàë.

d $R_{73;64}$ $R_{23;18}$ & R_q Òàê êàê âñå ïîåíöèàëüíûå êîíòàêòû íàõîäÿò-ñÿ íà êîðîòêîì êðàþ, ñîîòâåòñòâóþùèå ñîïðîòèâëåíèÿ äîëæíû áûòü â íåñêîëüêî ðàç áîëüøå êàíòà ñîïðîòèâëåíèÿ èëè ðàâíÿòüñÿ åìó.

Òàêîé ýêñïåðèìåíò ïîêàæåò, êàêèì îáðàçîì âîçìîæíî ýôôåêòèâíîå îòêëþ-÷åíèå ïðîâîäèìîñòè îäíîãî èç äâóõ êðà¼â ñòðóêòóðû. Òàê êàê ñïèí ÷àñòèö êðàåâîãî òîêà ñâÿçàí ñ èõ èìïóëüñîì, òî âïóùåíîé â êîíòàêò 1 òîê áóäåò âûõîäèòü èç êîíòàêòà 5 ïîëÿðèçîâàííûì ïî ñïèíó. Èäåÿ èñïîëüçîâàíèå ïîë-

íîé ïîëÿðèçàöèè ïî ñïèíó èíæåêòèðóåìîãî òîêà áóäåò ðàçâèòà â äàëüíåéøåé ðàáîòå.

Ðèñ. 3.2. (â öâåòå) Ñõåìà èçìåðåíèÿ ñ äëèííûì êðàåì. Âåñü ìîñòèê, âêëþ÷àÿ ðîãà, ïîêðûò çàòâîðîì. Ñòðóêòóðà èçîáðàæåíà íå â ìàñøòàáå

3.3. Íàíîïàòòåðíèðîâàíèå îáðàçöà ïðè ïîìîùè ÀÑÌ è ãàëëèåâîãî èîííîãî ïó÷êà

3.3.1. Ëèòîãðàôèÿ

Â ðàáîòå ñòàâèòñÿ çàäà÷à îñâîèòü ìåòîäèêó ëèòîãðàôèè îáðàçöà ñ ñóáìèêðîííûì ðàçðåøåíèåì. Òàêæå îäíîé èç çàäà÷ ÿâëÿåòñÿ ñîçäàíèå äûðîê äèàìåòðà ïîðÿäêà 50íì ñ àñïåêòíûì îòíîøåíèåì ãëóáèíà/äèàìåòð, ðàâíûì íåñêîëüêèì åäèíèöàì.

Êâàíòîâàÿ ÿìà ðàñïîëàãàåòñÿ íà ãëóáèíå îêîëî 100íì îò ïîâåðõíîñòè, ïîýòî-

ìó òðåáóåòñÿ ïðîèçâîäèòü äåôîðìàöèþ ÿìû ïðè ëèòîãðàôèè íà ãëóáèíó íå ìåíåå ýòîé.

Ïîâåðõíîñòü îáðàçöà âåñüìà ìÿãêàÿ, ïîýòîìó âîçìîæíî âûïîëíåíèå ëèòîãðàôèè îáðàçöà ïðè ïîìîùè èãëû àòîìíî-ñèëîâîãî ìèêðîñêîïà.

Çîíä àòîìíî-ñèëîâîãî ìèêðîñêîïà, íåñìîòðÿ íà ñâîé ìàëûé ðàçìåð, ñïîñîáåí ïðîâîäèòü äåôîðìàöèþ âåðõíèõ ñëî¼â ìÿãêèõ âåùåñòâ [26]. Ñèñòåìà åãî îáðàòíîé ñâÿçè ìîæåò ðàáîòàòü íà îòêëîíåíèè êàíòèëåâåðà, äåðæàòåëÿ èãëû, îò ñâîåãî ñâîáîäíîãî ïîëîæåíèÿ, ïîýòîìó ìåòîä ëèòîãðàôèè ïðè ïîìîùè ÀÑÌ-çîíäà íå òðåáóåò ïðîâîäÿùèõ ñâîéñòâ ïîâåðõíîñòè äåôîðìèðóåìîãî ìàòåðèàëà.

Ïîäîáíûå ìåòîäû èçãîòîâëåíèÿ ñòðóêòóðû íå áûëè ðàíåå ïîèñàíû â ëèòåðàòóðå, è îíè ìîãóò ïîìî÷ü èçãîòîâèòü ñòðóêòóðó ñ íàíî-ýëåìåíòàìè äëÿ âîçäåéñòâèÿ íà ðàññåÿíèå â êðàâûõ êàíàëàõ.

3.3.2. Èçãîòîâëåíèå ìàññèâà îòâåðñòèé íà êðàþ

Íà ðèñ. 3.3 èçîáðàæåíà ãåîìåòðèÿ êðàÿ ñ ðàñïîëîæåííûì âîçëå íåãî îòâåðñòèåì. Ðàçìåð îòâåðñòèÿ è ðàññòîÿíèå îò íåãî äî êðàÿ ïîðåäåëÿåòñÿ øèðèíîé âîëíîâîé ôóíêöèè êðàâîãî ñîñòîÿíèÿ, êîòîðîå, ïî ÷èñëåííûì ðàñ÷¼òàì è ýêñïåðèìåíòàì, ëåæèò â ïðåäåëå îò 5íì äî 100íì [25]. Åñëè ïðîèçâåñòè ìàññèâ îòâåðñòèé íà êðàþ ñòðóêòóðû, òî âîçìîæíî áóäåò ïðîíàáëþäàòü âçàèìîäåéñòâèå ñîñòîÿíèé íà êðàþ ñòðóêòóðû è íà êðàþ îòâåðñòèé. Ìåñòî êîíòàêòà îòâåðñòèÿ è êðàÿ ñòðóêòóðû áóäåò âûñòóïàòü äîïîëíèòåëüíûì ðàññåèâàþùèì öåíòðîì, òàê ÷òî ñîïðîòèâëåíèå êðàÿ, âîçëå êîòîðîãî ðàñïîëîæåí òàêîé ìàññèâ, äîëæíî âîçðàñòè. Åñëè ïîìåñòèòü ñèñòåìó â ñëàáîå ìàãíèòíîå ïîëå, òî ñèñòåìà ¾îòâåðñòèå + êðàé¿ áóäåò âûñòóïàòü â ðîëè èíòåðôåðîìåòðà Àäîíîâà-Áîìà, è ìîæíî áóäåò ïðîíàáëþäàòü ïåðèîäè÷åñêîå âëèÿíèå ìàãíèòíãî ïîëÿ íà ñîïðîòèâëåíèå òàêîãî êðàÿ. Ïðîèçâîäèòü ìåëêèå îòâåðñòèÿ ñ ãëóáèíîé áîëüøå øèðèíû òðóáíåå, ÷åì íåãëóáîêèå îòâåðñòèÿ. Æèäêîñòíîå òðàâëåíèå óáèðàåò ìàòåðèàë ÿìû íå òîëüêî âãëóáü, íî è âáîê. Ñóõîå òðàâëåíèå ïðèâîäèò ê ïåðåñàæäåíèþ ìàòåðèàëà ÿìû íà ñòåíêè îòâåðñòèÿ, ÷òî òàêæå çàòðóäíÿåò ïðîèçâîäñòâî îòâåðñòèé òàêîé ãëóáèíû è øèðèíû.

(a) (b)

Ðèñ. 3.3. (â öâåòå) (à) ñðåç ñòðóêòóðû ñ èçãîòîâëåííûì îòâåðñòèåì ó êðàÿ. (b) âèä íà ñòðóêòóðó ñ îòâåðñòèåì íà êðàþ ñâåðõó; êðàñíûì îáîçíà÷åíû ñòðåëî÷êè êðàåâûõ ñîñòîÿíèÿ ñòðóêòóðû, ñèíèì êðàåâûå ñîñòîÿíèÿ êðàÿ îòâåðñòèÿ

Â ðàáîòå ñòàâèòñÿ çàäà÷à îñâîèòü ïðîèçâîäñòâî òàêèõ îòâåðñòèé äâóìÿ ìåòîäàìè: ïðè ïîìîùè ÀÑÌ è ôîêóñèðîâàííîãî èîííîãî ïó÷êà íà îñíîâå ãàëëèÿ.

Ãëàâà 4. Ýòàïû èçãîòîâëåíèÿ ñòðóêòóðû

4.1. Ìîëåêóëÿðíî-ëó÷åâàÿ ýïèòàêñèÿ êâàíòîâîé ÿìû

Ðèñ. 4.1. (â öâåòå) Òèïè÷íàÿ ñõåìà óñòàíîâêè ìîëåêóëÿðíî-ëó÷åâîé ýïèòàêñèè. Èçîáðàæåíèå ñ ñàéòà [27]

Ìîëåêóëÿðíî-ëó÷åâàÿ ýïèòàêñèÿ èçâåñòíûé ìåòîä âûðàùèâàíèÿ ãåòåðîñòðóêòóðû çàäàííîé òîëùèíû ñ àòîìíî ãëàäêèìè ãåòåðîãðàíèöàìè. Ïðîèçâîäñòâîì êâàíòîâûõ ÿì òåëëóðèäà ðòóòè ðàçíûå ãðóïïû çàíèìàþòñÿ åù¼ ñ ïðîøëîãî âåêà. Íî òîëüêî îòíñèòåëüíî íåäàâíî, â ñåðåäèíå 2000-õ ãîäîâ, â ãðóïïå Ìîëåíêàìïà â Âþòñáóðãå è â ãðóïïå Ìèõàéëîâà â Íîâîñèáèðñêå

óäàëîñü âûðàñòèòü ÿìû ñ äîñòàòî÷íîé ÷èñòîòîé äëÿ èçó÷åíèÿ òîïîëîãè÷åñêèõ ýôôåêòîâ.

Ïðîöåññ ìîëåêóëÿðíî-ëó÷åâîé ýïèòàêñèè ïðåäñòàâëÿåò ñîáîé ïîñëîéíûé ðîñò ñòðóêòóðû íà àòîìàðíî-ãëàäêèõ ïîäëîæêàõ. Íàðàùèâàíèå ñòðóêòóð ýòèì ìåòîäîì îòëè÷àåòñÿ îò îáû÷íîãî îòíîñèòåëüíî äåø¼âîãî òåðìè÷åñêîãî èëè ìàãíåòðîííîãî íàïûëåíèÿ ìàòåðèàëà íà ïîäëîæêó ïî íåñêîëüêèì ïàðàìåòðàì. Âî-ïåðâûõ, â óñòàíîâêå ïîääåðæèâàåòñÿ âûñîêàÿ ÷èñòîòà âñåãî: ïîäëîæêè, âàêóóìà, íàïûëÿåìîãî ìàòåðèàëà è ò.ä. Âî-âòîðûõ, îòëè÷àåòñÿ ïðèíöèï íàïûëåíèÿ: ïðè ìîëåêóëÿðíî-ëó÷åâîé ýïèòàêñèè òåìïåðàòóðà ïîäëîæêè êîíòðîëèðóåòñÿ òàêèì îáðàçîì, ÷òîáû îñàæäàåìûå íà å¼ ïîâåðõíîñòü àòîìû äèôôóíäèðîâàëè âäîëü ïîâåðõíîñòè äî òåõ ïîð, ïîêà íå âñòàíóò â ÿ÷åéêó êðèñòàëëè÷åñêîé ðåø¼òêè.

Âûðàùèâàþñÿ ïëàñòèíû êâàíòîâîé ÿìû òåëëóðèäà ðòóòè ñ ðàçëè÷íûìè òîëùèíàìè (èìåþñÿ ñòðóêòóðû êàê ñ èíâåðòèðîâàííûì, òàê è ñ íåèíâåðòèðîâàííûì ñïåêòðîì, à òàêæå ñòðóêòóðû ñ ïîëóìåòàëëè÷åñêèì ñïåêòðîì), ðàçíûì óðîâíåì äîïèðîâàíèÿ èîíàìè è ðàçíûìè òîëùèíàìè äðóãèõ ñëî¼â.

Êâàíòîâàÿ ÿìà íå äåãðàäèðóåò íà âîçäóõå è, íåñìîòðÿ íà ñâîþ ìÿãêîñòü, ìîæåò áåç ïðîáëåì âûäåðæàòü òðàíñïîðòèðîâêó è õðàíåíèå â îáû÷íûõ çèïïàêåòàõ áåç äîïîëíèòåëüíîé çàùèòû èíðòíîé àòìîñôåðîé.

4.2. Ñîçäàíèå ìèêðîñòðóêòóðû

4.2.1. Îáðàùåíèå ñî ñòðóêòóðîé

Ñëîè, íàíåñ¼íîûå íà ïîäëîæêó âåñüìà ìÿãêèå, à ñàìà ïîäëîæêà îòíîñèòåëüíî ðóïêàÿ (ìîæåò ðàçáèòüñÿ îò ïàäåíèÿ íà ïîë ñ ìåòðîâîé âûñîòû), ïîýòîìó îáðàùàòüñÿ ñ íåé ñëåäóåò àêêóðàòíî. Ðàáîòó ñ íåé òàêæå íåìîãîó óñëîæíÿåò îðèåíòàöèÿ ïîäëîæêè (013), â êîòîðîé áîêîâûå ñòîðîíû ñòðóêòóðû ïðè ñêîëå íå ïåðïåíäèêóëÿðíû ïëîñêîñòè îñíîâàíèÿ. Èç-çà ýòîãî îíà ñîñêàëüçûâàåò ñ ïèíöåòà, åñëè âçÿòü èì ñòðóêòóðó çà ïðîòèâîïîëîæíûå áîêîâûå ñòîðîíû (â îòëè÷èå, íàïðèìåð, îò êðåìíèåâîé ïîäëîæêè îðèåíòàöèè (100)).

Äëÿ áîëüøèíñòâà òåõíîëîãè÷åñêèõ îïåðàöèé è ðàñêàëûâàíèÿ ñòðóêòóðà ïîêðûâàåòñÿ ñëîåì ðåçèñòà äëÿ äîïîëíèòåëüíîé çàùèòû õðàíèìîãî êóñêà êâàíòîâîé ÿìû îò ìåõàíè÷åñêèõ è èíûõ ïîâðåæäåíèé. Åñëè ýòîãî íå ñäåëàòü,

òî ïîñëå ðåçêè áîëüøîé ñòðóêòóðû íà áîëåå ìåëêèå, ñòðóêòóðà ïîêðûâàåòñÿ ìåõàíè÷åñêèìè äåôåêòàìè, êîòîðûå ìîãóò ïðèâåñòè ê íåíóæíûì ýôôåêòàì â äàëüíåéøåì.

4.2.2. Ðåçêà ñòðóêòóðû

Äëÿ ýêîíîìèè ìàòåðèàëà áîëüøèå ïîäëîæêè ñ íàíåñ¼íîûìè íà íèõ êâàíòîâûìè ÿìàìè íàðåçàþòñÿ íà áîëåå ìåëêèå. Äëÿ ýòîãî èñïîëüçóåòñÿ ñêðàéáåð â âèäå ðó÷êè ñ òâ¼ðäûì îñòðè¼ì. Äëÿ íàðåçêè ïëàñòèíû íåîáõîäèìî ïðîâåñòè ïðèöåëüíóþ öàðàïèíó îò îäíîãî äî äðóãîãî êðàÿ, à çàòåì ìåäëåíí ñ ïîñòåïåííî óñèëèâàþùèìñÿ ïåðïåíäèêóëÿðíûì äàâëåíèåì öàðàïàòü âñ¼ áîëüøóþ è áîëüøóþ ëèíèþ. Â êàêîé-òî ìîìåíò èç-çà óñèëèâøåãîñÿ äàâëåíèÿ è íàëè÷èÿ ãëóáîêîé öàðàïèíû ïîäëîæêà òðåñíåò âäîëü öàðàïèíû ñàìà. Â ïðîöåññå òàêîãî öàðàïàíüÿ îáðàçóåòñÿ ìîíãî êðîøêè èç ïîäëîæêè, òàê ÷òî èíîãäà ñëåäóåò î÷èùàòü ðàâî÷óþ ïîâåðõíîñòü ñòðó¼é ñæàòîãî âîçäóõà; ñòðóÿ âîçäóõà è óíîñèìàÿ åé ìåëêàÿ êðîøêà íå íàíîñèò çàìåòíûõ ïîâðåæäåíèé ñòðóêòóðå. Îáû÷íî äîñòàòî÷íî ïðîâåñòè 10-20 ðàç ñêðàéáåðîì ïî îäíîìó è òîìó æå ìåñòó, ïîñëå ÷åãî ïîäëîæêà òðåñêàåòñÿ ïî ¾ëèíèè ïåðôîðàöèè¿. Èíîãäà äëÿ ýòîãî òðåáóåòñÿ çàìåòíî ìåíüøå èëè íàîáîðîò áîëüøå èòåðàöèé â ñèëó, âåðîÿòíî, ïåðåìåí÷èâîãî íàñòðîåíèÿ ýêñïåðèìåíòàòîðà. Ïîëó÷åìàÿ òàêèì îáðàçîì øèðèíà èñïîð÷åííé ñêðàéáåðîì îáëàñòè ñòðóêòóðû ñîñòàâëÿåò ïîðÿäêà 200-300 ìèêðîí íà êàæäîé ïîëîâèíå ðàñêîëîòé ïîäëîæêè.

4.2.3. Ïðèêëåèâàíèå ê êðàíèåâîé ïîäëîæêå

Äëÿ îáëåã÷åíèÿ ðàáîòû ñ òåëëóðèäîì ðòóòè ñðàçó ïîñëå îòêàëûâàíèÿ êóñî÷êà ïëàñòèíû íóæíîãî ðàçìåðà íåîáõîäèìî ïðèêëåèâàòü åãî ê áîëüøåé ïî ðàçìåðó êðåìíèåâîé ïîäëîæêå (ñì ðèñ. 2.3). Ïåðåä ïðèêëåèâàíèåì ê êðåìíèåâîé ïîäëîæêå ïðåäâàðèòåëüíî ÷èñòèòñÿ äíî ïîäëîæêè ÿìû îò ìóñîðà âî èçáåæàíèå íåïàðàëëåëüíîñòè ïîäëîæåê. ×èñòêà ïðîâîäèòñÿ ñòðó¼é ñæàòîãî âîçäóõà, ïî íåîáõîäèìîñòè ïåðåä ýòèì ïîâåðõíîñòü îáçæèðèâàåòñÿ àöåòîíîì, èçîïðîïàíîëîì è âîäîé. Òàêàÿ î÷èñòêà íåîáõîäèìà äëÿ òîãî, ÷òîáû âûäåðæàòü ïàðàëëåëüíîñòü íèçà êðåìíèåâîé ïîäëîæêè è âåðõà ïîäëîæêè ÿìû äëÿ êà÷åñòâåííîãî ïðîöåññà ëèòîãðàôèè â äàëüíåéøåì (íà èñïîëüçóåìîì ëàçåðíîì ëèòîãðàôå âûñîòà îáúåêòèâà ôèêñèðóåòñÿ îòíîñèòåëüíî äåðæàòåëÿ ïëàñòèíû äî íà÷àëà ëèòîãðàôèè, ïîýòîìó âàæíî ÷òîáû âåðõ ÿìû áûë åìó

ïðîöåññ ëèòîãðàôèè òîëüêî óáåäèâøèñü â ÷èñòîòå íèçà êðåìíèåâîé ïîäëîæêè, òàê êàê íà íåãî ìîæåò íàëèïóòü êëåé, ðåçèñò èëè äðóãîé ìóñîð.

Íàêëåèâàíèå îáðàçöà íà ïîäëîæêó-íîñèòåëü çàìåòíî óïðîùàåò îáðàùåíèå ñ íèì: ïîçâîëÿåò áðàòüñÿ ïèíöåòîì çà ëþáîé óäîáíûé ó÷àñòîê êðåìíèåâîé ïîäëîæêè, íå áîÿñü ïîâðåäèòü êâàíòîâóþ ÿìó, ïîçâîëÿåò áåç îïàñåíèÿ ïîëîìêè ïîäëîæêè êâàíòîâîé ÿìû îòêëåèâàòü ñòðóêòóðó îò äâóñòîðîííåãî ñêîò÷à, ïîçâîëÿåò ïðîèçâîäèòü íàíåñåíèå ðåçèñòà íà êâàíòîâóþ ÿìó ëþáîãî ðàçìåðà, äàæå åñëè ýòîò ðàçìåð ìåíüøå äèàìåòðà îòâåðñòèÿ ïðèñîñêè öåíòðèôóãè, ïðè ïîìîùè êîòîðîé íàíîñèòñÿ ôîòîðåçèñò.

Îòêëåèâàíèå êâàíòîâîé ÿìû îò ïîäëîæêè ïðîèñõîäèò â êîíöå âñåõ òåõíîëîãè÷åñêèõ ïðîöåññîâ è ïåðåä ìîíòèðîâàíèåì îáðàçöà â èçìåðèòåëüíóþ óñòàíîâêó. Êâàíòîâàÿ ÿìà, ïðèêëååíàÿ ê êðåìíèåâîé ïîäëîæêå, ïîìåùàåòñÿ â íàãðåòûé àöåòîí è ïèíöåòîì ïîñòåïåíî ðàñêà÷èâàåòñÿ çà êðàÿ â ïëîñêîñòè ñòðóêòóðû, òàêèì îáðàçîì îòêëåèâàÿñü îò êðåìíèÿ. Ïðè òàêîì îòêëåèâàíèè ñëåäóåò èçáåãàòü ÷ðåçìåðíûõ óñèëèé, à òàêæå óñèëèé, íàïðàâëåíûõ íå â ïëîñêîñòè îáðàçöà, òàê êàê åñëè ïîïûòàòüñÿ îòêëåèòü ñòðóêòóðó ñèëîé, íàïðàâëåíîé ïåðïåíäèêóëÿðíî ïëîñêîñòè ïîäëîæêè, âåëèê øàíñ ñëîìàòü êâàíòîâóþ ÿìó. Ïîñëå îòêëåèâàíèÿ îò îáðàçöà ïðè íåîáõîäèìîñòè îòêàëûâàþòñÿ íåíóæíûå êóñî÷êè, çàòåì îáðàçåö ìîíòèðóåòñÿ â LCC äåðæàòåëü.

Ðàçìåð äâóñòîðîííåãî ñêîò÷à, íà êîòîðûé ïðèêëåèâàåòñÿ êâàíòîâàÿ ÿìà ê êðåìíèåâîé ïîäëîæêå, ìîæåò áûòü êàê ìåíüøå, òàê è áîëüøå ðàçìåðà ÿìû. Â ñëó÷àå, êîãäà ñêîò÷ íå âûëåçàåò èç-ïîä ÿìû, çàòðóäíÿåòñÿ ðàáîòà ñ êâàíòîâûìè ÿìàìè ìàëûõ ðàçìåðîâ, ïîñêîëüêó òðóäíî îòðåçàòü òàêîé êóñî÷êê ñêîò÷à, ÷òîáû ÿìà ëåæàëà íà í¼ì ïàðàëëåëüíî ïëîñêîñòè êðåìíèÿ. Ïîýòîìó â ðàáîòå èñïîëüçóþòñÿ êóñî÷êè ñêîò÷à, ïî ðàçìåðó ÷óòü ïðåâîñõîäÿùèå ðàçìåðû ïðèêëåèâàåìîé ÿìû. Ïðè òàêîì ïîäõîäå ìîæíî áðàòüñÿ ïèíöåòîì çà òîò êóñî÷êê ñêîò÷à, êîòîðûé áóäåò ëåæàòü íà êðåìíèè íå ïîä ÿìîé, èç-çà ÷åãî äåôîðìàöèÿ ñêîò÷à âñëåäñòâèå äàâëåíèÿ ïèíöåòà íå ñêàæåòñÿ íà ïàðàëëåëüíîñòè ïîäëîæåê. Îäíàêî íåïîëíîå ïîêðûòèå ÿìîé ñêîò÷à âûçûâàåò íåêîòîðûå äîïîëíèòåëüíûå îñîáåííîñòè ðàáîòû ñ òàêîé êîíñòðóêöèåé: ïðè ðàáîòå ñ ðàñòâîðèòåëÿìè (â ÷àñòíîñòè, ñ àöåòîíîì) íåîáõîäèìî êàêèì-òî îáðàçîì ìèíèìèçèðîâàòü âåðîÿòíîñòü ïîïàäàíèÿ ðàñòâîð¼íîãî êëåÿ íà ïîâåðõíîñòü ÿìû. Åñëè êëåé âñ¼ æå ïîïàë íà ïîâåðõíîñòü ÿìû, å¼ ñëåäóåò ïðîìûòü ïîä ñèëüíîé ïðÿìîé ñòðó¼é àöåòîíà â áîëüøèíñòâå ñëó÷àåâ ýòî ïîëíîñòüþ óáè-

ðàåò ñêîò÷ ñ ïîâåðõíîñòè ÿìû. Âåðîÿòíîñòü îòêëåêàíèÿ ÿìû îò ñêîò÷à èëè ñêîò÷à îò êðåìíèÿ ïðè âîçäåéñòâèè àöåòîíà êðàéíå ìàëà, òàê êàê îí íå çàòåêàåò â îáëàñòü ïîä ñòðóêòóðîé.

4.2.4. Ëèòîãðàôèÿ

Äëÿ ñîçäàíèÿ ñòðóêòóðû íåîáõîäèìî êàêèì-ëèáî îðàçîì óäàëèòü òó ïëîùàäü êâàíòîâîé ÿìû, êîòîðàÿ íå äîëæíà îêàçàòüñÿ â èòîãîâîé ñòðóêòóðå, ñì. ðèñ. 4.2. Ïîä óäàëåíèåì ïëîùàäè ÿìû ïîäðàçóìåâàåòñÿ óäàëåíèå ñëîÿ ÿìû, âêëþ÷àÿ ïðîâîäÿùèé ñëîé HgTe. Äëÿ íåêîòîðûõ ýêñïåðèìåíòîâ âîçìîæíî óäàëåíèå ñëîÿ ÿìû âïëîòü äî GaAs ïîäëîæêè, îäíàêî óäàëåíèå òàêîãî áîëüøîãî ñëîÿ ïðèâîäèò ê ñëîæíîñòè ñîçäàíèÿ ñòðóêòóð ñ ìèêðîíûì ðàçðåøåíèåì èç-çà ïåðåïàäà âûñîò (ñì. äàëåå).

Ðèñ. 4.2. (â öâåòå) (a) ñðåç ñòðóêòóðû ïîñëå íàíåñåíèÿ ôîòîðåçèñòà è ïîñëå òðàâëåíèÿ; (b) âèä íà ñòðóêòóðó ñâåðõó. êðàé ñòðóêòóðû îáîçíà÷åí ÷¼ðíîé ëèíèåé, êðàñíûìè ñòðåëî÷êàìè îáîçíà÷åíû êðàââûå ñîñòîÿíèÿ

Äëÿ óäàëåíèÿ âûáðàííîé îáëàñòè ÿìû îáû÷íî èñïîëüçóåòñÿ òðàâëåíèå ñóõîå (ïëàçìîé, íàïðàâëåííûì ïó÷êîì èîíîâ) èëè ìîêðîå (ïðè ïîìîùè æèäêèõ òðàâèòåëåé). Â îáîèõ ñëó÷àÿõ íåîáõîäèìî îáåñïå÷èòü èçáèðàòåëüíîñòü òðàâëåíèÿ, ñ ÷åì îòëè÷íî ñïðàâëÿåòñÿ ëèòîãðàôèÿ.

Â îñíîâå ïðîöåññà ëèòîãðàôèè ëåæèò ðåçèñò íåêîòîðîå âåùåñòâî, îáû÷íî ïîëèìåð, êîòîðîé èçìåíÿåò ñâîè ñâîéñòâà ïîä äåéñòâèåì ñâåòà, ýëåêòðîíîâ èëè èîíîâ. Ïîñëå èçáèðàòåëüíîãî âîçäåéñòâèÿ íà íåãî âîçìîæíî óäà-

ëåíèå çàñâå÷åííé (ôîòîíàìè, ýëåêòðîíàìè èëè èîíàìè) ÷àñòè ïðè ïîìîùè ïðîÿâèòåëÿ ðåçèñòà. Òàêèì îáðàçîì ïîëó÷àåòñÿ ñëîé ðåçèñòà, êîòîðûé ïî-êðûâàåò âûáðàííóþ ÷àñòü ïîäëîæêè, â òî âðåìÿ êàê äóãàÿ ÷àñòü ïîäëîæêè îêàçûâàåòñÿ íå ïîêðûòà íè÷åì.

Â äàííîé ðàáîòå èñïîëüçóåòñÿ ôîòîëèòîãðàôèÿ.

Îïòè÷åñêàÿ ëèòîãðàôèÿ ìîæåò îñóùåñòâëÿòüñÿ ëàçåðíûì è ìàñî÷íûì ìåòîäîì. Â ïåðâîì ìåòîäå çàñâåòêó îñóùåñòâëÿåò ñôîêóñèðîâàííûé ëó÷ ëàçåðà, âî âòîðîì íà ïîäëîæêó ñ íàíåñ¼ííûì ôîòîðåçèñòîì íàïðàâëÿåòñÿ ïàðàëëåëüíûé ïó÷îê ñâåòà (äëÿ îäíîðîäíîé çàñâåòêè âñåõ ÷àñòåé ðåçèñòà), à äëÿ èçáèðàòåëüíîé çàñâåòêè ìåæäó èñòî÷íèêîì ñâåòà è ïîäëîæêîé ïîìåùàåòñÿ ïðåãðàäà äëÿ ñâåòà ìàñêà, çàðàíåå èçãîòîâëåííàÿ ïðè ïîìîùè ëó÷åâîé ëèòîãðàôèè. Âûñîêîãî ðàçðåøåíèÿ ïðè ïîìîùè ìàñî÷íîé ëèòîãðàôèè êàê ïðàâèëî äîáèâàþòñÿ ïðè ïðèâåäåíèè â êîíòàêò ìàñêè è ïîäëîæêè, îäíàêî â ñèëó òîãî, ÷òî êâàíòîâàÿ ÿìà âåñüìà ìÿãêàÿ, ñîïðèêîñíîâåíèå òâ¼ðäîé ìàñêè ñ ÿìîé íà âñåé å¼ ïëîùàäè ìîæåò ïðèâåñòè ê äåôîðìàöèè òåëëóðèäà ðòóòè. Âûñîêîãî ðàçðåøåíèÿ ëàçåðíîé ëèòîãðàôèè äîñòèãàþò çà ñ÷åò ôîêóñèðîâêè êà÷åñòâåííîãî ïó÷êà ìèêðîáóåêòèâîì. Â ðàáîòå èñïîëüçóåòñÿ ìåäëåííàÿ (ïðîöåññ ëó÷åâîé ëèòîãðàôèè ìîæåò çàíèìàòü ïîðÿäêà ÷àñà, â îòëè÷èå îò ìàñî÷íîé, êîòîðàÿ çàíèìàåò îêîëî ìèíóòû), íî íää¼æíàÿ òåõíîëîãèÿ ëó÷åâîé ëèòîãðàôèè.

Ïðîöåññ ëèòîãðàôèè ïðîèñõîäèò â ÷åòûðå ýòàïà [28].

1. Ñíà÷àëà íà ïîäëîæêó íàíîñèòñÿ òîíêèé (200íì-4000íì) ñëîé ðåçèñòà. Òîëùèíà íàíîñèìîãî ðåçèñòà çàâèñèò îò öåëåé: äëÿ ïîâûøåíèÿ, íàïðèìåð, ðàçðåøåíèÿ ëèòîãðàôèè, òîëùèíà ðåçèñòà îáû÷íî áåð¼òñÿ êàê ìîæíî ìåíüøå; äëÿ ïðîöåññà ëèôò-îôôà, î êîòîðîì ðå÷ü ïîéä¼ò íèæå (â ïîäñåêöèè î íàíåñåíèè çàòâîðà), íàíîñèòñÿ òîëñòûé ñëîé ðåçèñòà äëÿ òîãî, ÷òîáû ðàñòâîðèòåëü ìîã ýôôåêòèâíî óäàëèòü ñëîé ðåçèñòà èç-ïîä ñëîÿ çàòâîðà. Ðåçèñò íàíîñèòñÿ ïðè ïîìîùè ñïèíåðà óñòðîéñòâà, ðàñêðó÷èâàþùåãî ïîäëîæêó äî çàäàííûõ óãëîâûõ ñêîðîñòåé âîêðóã îñè, ïðîõîäÿùåé ÷åðåç ïîäëîæêó. Ðåãóëèðóÿ ñêîðîñòü, óñêîðåíèå è âðåìÿ ðàñêðóòêè ïîäëîæêè ñ íàíåñ¼ííé íà íå¼ äî ðàñêðóòêè ïèïåòêîé êàï-

ëåé ðåçèñòà, âîçìîæíî ðåãóëèðîâàòü ïàðàìåòðû ïîëó÷èâøåéñÿ ïë¼íêè ðåçèñòà: ÷åì áîëüøå ñêîðîñòü âðàùåíèÿ, òåì òîíüøå ïîëó÷àåòñÿ ïë¼íêà.

Äëÿ íàíåñåíèÿ ðåçèñòà íåîáÿçàòåëüíî èñïîëüçîâàòü ñïåöèàëèçèðîâàííûå äîðîãîñòîÿùèå óñòàíîâêè. Åñëè òðåáîâàíèÿ ê ðàçðåøåíèþ ëèòîãðàôèè íå ñëèøêîì âûñîêè, ìîæåò èñïîëüçîâàòüñÿ íåäîðîãîé ìåäèöèíñêèé ñïèíåð äëÿ ðàçäåëåíèÿ êðîâè ñ ïðèêëååííé íà ñêîò÷ ó îñè âðàùåíèÿ ïîäëîæêîé.

2. Ïîñëå íàíåñåíèÿ ñëîÿ ðåçèñòà åãî íåîáõîäèìî âûñóøèòü, òàê êàê íåâûñóøåííûé îí îáëàäàåò ìàëîé âÿçêîñòüþ, ïîçâîëÿþùåé åìó ïðè íàíåñåíèè ñïèíåðîì ïîêðûòü ïîäëîæêó òîíêèì ñëîåì. Ñóøêà ìîæåò ïðîèñõîäèòü ïðè ðàçíûõ òåìïåðàòóðàõ: ÷åì ìåíüøå òåìïåðàòóðà, òåì áîëüøå âðåìåíè çàíèìàåò ïðîöåññ. Òàê, ïðè êîìíàòíîé òåìïåðàòóðå íà ñóøêó ðåçèñòà óõîäèò ïîðÿäêà ñóòîê. Áîëüøèíñòâî òåðìîóñòîé÷èâûõ ïîäëîæåê ñóøàòñÿ 1 èíóòó ïðè òåìïåðàòóðå 100C íà ëàáîðàòîðíîé ïå÷è, îäíàêî êâàíòîâàÿ ÿìà î÷åíü ÷óâñòâèòåëüíà ê òåìïåðàòóðàì âûøå 80 C [29], ïîýòîìó âñå ïðîöåññû, âêëþ÷àÿ ñóøêó, íå äîëæíû ïðîõîäèòü ïðè ñëèøêîì âûñîêèõ òåìïåðàòóðàõ. Âñå èñïîëüçóåìûå ðåçèñòû 10 èíóò ñóøàòñÿ íà ïå÷êå ïðè òåìïåðàòóðå 80C. Åñëè íà÷àòü ëèòîãðàôèþ íå îñóøèâ ðåçèñò, ýòî êðàéíå íåãàòèâíî ñêàæåòñÿ íà å¼ êà÷åñòâå.

3. Ïîñëå ñóøêè ðåçèñòà íàñòóïàåò ïîðà äåëàòü ëèòîãðàôèþ. Â ðàáîòå èñïîëüçóåòñÿ ëó÷åâîé ëèòîãðàô Heidelberg uPG 101, íà êîòîðîì îòðàáîòàíî ðàçðåøåíèå îêîëî 1.5-2 ìèêðîí. Ëèòîãðàô îñóùåñòâëÿåò çàñâåòêó ïðè ïîìîùè 405íì ëàçåðà, ïîýòîìó ôóíäàìåíòàëüíîå îãðàíè÷åíèå íà ðàçðåøåíèå ëèòîãðàôà ðàâîí ïî ïîðÿäêó äëèíå âîëíû ýòîãî ëàçåðà. Äëÿ öåëåé ðàáîòû, îäíàêî, ýòîãî ðàçðåøåíèÿ õâàòàåò.

Îáðàçåö êðåïèòñÿ ê âàêóóìíîé ïðèñîñêå ëèòîãðàôà, â ïðîãðàììå íà êîìïüþòåðå çàäà¼òñÿ íåîáõîäèìûé ðèñóíîê ëèòîãðàôèè, øàãîâûìè äâèãàòåëÿìè ñ òî÷íîñòüþ 100 íì ìèêðîí ïðîèçâîäèòñÿ XYZ-ïîçèöèîíèðîâàíèÿ ïîäëîæêè îòíîñèòåëüíî îáúåêòèâà, ÷åðåç êîòîðûé îñóùåñòâëÿåòñÿ çàñâåòêà ëàçåðîì, à ïðè ïîìîùè Z-ïüåçîïîäâèæêè òî÷-íî íàñòðàèâàåòñÿ ôîêóñ îáúåêòèâà. Ïîñëå ýòîãî íà÷èíàåòñÿ ïðîöåññ ëèòîãðàôèè. Äàííûé ëèòîãðàô îáëàäàåò êàìåðîé, êîòîðàÿ ïîçâîëÿåò ñîâìåùàòü øàáëîí ñî ñòðóêòóðîé íà ïîäëîæêå. Ýòî íåîáõîäèìî äëÿ ëèòî-

ãðàôèè çàòâîðà, êîòîðûé ðàñïîëàãàåòñÿ â çàäàíîì ìåñòå îòíîñèòåëüíî ñòðóêòóðû êâàíòîâîé ÿìû.

4. Ïîñëå çàñâåòêè íåîáõîäèìîé îáëàñòè ëàçåðîì, ðåçèñò íåîáõîäèìî ïðîÿâèòü. Äëÿ ýòîãî â ðàáîòå èñïîëüçóåòñÿ ÓÏÔ-1Á ôèðìû Ôðàñò-Ì [30], ïðåäíàçíà÷åííûé äëÿ ïðîÿâëåíèÿ ïîçèòèâíûõ ðåçèñòîâ (ïîçèòèâíûé ðåçèñò óäàëÿåòñÿ ïðîÿâèòåëåì â çàñâå÷åííîé îáëàñòè). Îáðàçåö ïîìåùàåòñÿ â íåáîëüøóþ ¼ìêîñòü ñ íàëèòûì ïðîÿâèòåëåì è äåðæèòñÿ òàì 30-50 ñåêóíä ñ ïåðåìåííûì ïîìåøèâàíèåì ïðîÿâèòåëÿ ïîäëîæêîé, ïîñëå ÷åãî îñòàòêè ïðîÿâèòåëÿ ñìûâàþòñÿ âîäîé. Ïîñëå âñåõ íåîáõîäèìûõ ìàíèïóëÿöèé, ïðîâåä¼íííûõ ñ ëèòîãðàôèåé íà ñòðóêòóðå, îñòàòêè ðåçèñòà óäàëÿþòñÿ àöåòîííì. Âðåìÿ ïðîÿâëåíèÿ ðåçèñòà îïðåäåëÿåòñÿ íà ãëàç: åñëè ñòðàâëèâàòü áîëüøóþ îáëàñòü (õîòÿ áû 400 íà 400 ìèêðîí), òî ñòàíîâèòñÿ âèäíî, êàê çàñâå÷åííûé îïçèòèâíûé ðåçèñò ðàñòâîðÿåòñÿ. Åñëè ïåðåäåðæàòü ðåçèñò íà íåñêîëüêî ëèøíèõ ìèíóò â ïðîÿâèòåëå, íè ê êàêèì íåãàòèâíûì ýôôåêòàì ýòî íå ïðèâîäèò. Åñëè íåäîäåðæàòü, òî ïðîÿâèòñÿ íå âåñü ðåçèñò, ÷òî ìîæåò ñêàçàòüñÿ íà êà÷åñòâå ïîñëåäóþùèõ ðàáîò ñ íèì.

Ðåçóëüòàò ëèòîãðàôèè èçîáðàæ¼í íà ðèñ. 4.3

Ðèñ. 4.3. (â öâåòå) Ôîòîãðàôèÿ ëèòîãðàôèè íà ïîâåðõíîñòè êâàíòîâîé ÿìû. Øèðèíà ìîñòèêà ðàâíà 4 ìêì. Æ¼ëòàÿ îáëàñòü ïîâåðõíîñòü ÿìû, áîëåå çåë¼íàÿ îáëàñòü ôîòîðåçèñò

Äëÿ èñïîëüçîâàíîãî ðåçèñòà íà îñíîâå ìåòîêñèðîïèëàöåòàòà áûëî âû-ÿâëåíî, ÷òî åñëè ñäåëàòü ëèòîãðàôèþ, ñìûòü ðåçèñò àöåòîíîì, ñäåëàòü ëèòî-ãðàôèþ åù¼ ðàç, à çàòåì ïðîòðàâèòü ñòðóêòóðó, òî îñòàíóòñÿ ñëåäû ïåðâîé ëèòîãðàôèè, ñì. ðèñ. 4.4 Äàæå åñëè ñìûâàòü ñëîé ïåðâîãî ðåçèñòà â ¼ìêîñòè ñ íàãðåòûì àöåòîíîì â óëüòðàçâóêîâîé âàííå, ýôôåêò èñòîðèè ëèòîãðàôèè ïðè òðàâëåíèè âñ¼ ðàâíî îñòà¼òñÿ. Âîçìîæíî, ñìûâàåòñÿ òàêèì îáðàçîì íå âåñü ðåçèñò èëè æå îí âñòóïàåò â êàêóþ-òî ðåàêöèþ ñ âåðõíèì ñëîÿìè ÿìû. Ïðè òðàâëåíèè îáëàñòü, íà êîòîðîé äî ýòîãî ðàñïîëàãàëàñü ïåðâàÿ ëèòîãðà-ôèÿ, òðàâèòñÿ, íî òðàâèòñÿ ÷óòü ìåäëåííåå íåòðîíóòîé ïåðâîé ëèòîãðàôèåé îáëàñòè.

Ðèñ. 4.4. (â öâåòå) Ôîòîãðàôèÿ ñòðóêòóðû ïîñëå òðàâëåíèÿ. Îáëàñòü ïîñëåäíåé ëèòîãðàôèè, ïî êîòîðîé ïðîèçâîäèëîñü òðàâëåíèå, îò÷¼òëèâî âèäíî ïî öâåòó è ò¼ìíîìó êîíòóðó. Èñòîðèÿ ïåðâîé ëèòîãðàôèè íà èçîáðàæåíèè âèäíà â âèäå ìåíåå êîíòðàñòíîãî ò¼ìíîãî êîíòóðà.

4.2.5. Òðàâëåíèå ñòðóêòóðû

Òðàâëåíèå HgTe îñóùåñòâëÿëîñü ïðè ïîìîùè âîäíîãî ðàñòâîðà KI, I_2, HBr , ÷òî äàâàëî ãëàäêèé ïðîôèëü òðàâëåíèÿ [31]. Â ðàáîòå èñïîëüçóåòñÿ ñëåäóþùèé ðåöåïò òðàâèòåëÿ: 1.0ã KI ñìåøèâàåòñÿ ñ 0.025ã I_2 è 3.1ml ðàñòâîðà HBr, çàòåì äàííàÿ ñìåñü ðàçáàâëÿåòñÿ âîäîé äî îáú¼ìà 100 ìë. Äëÿ áûñòðîãî ðàñòâîðåíèÿ âñåõ ýëåìåíòîâ â ðàñòâîðå áàíî÷êà ñ òðàâèòåëåì íà íåêîòîðîå

âðåìÿ ïîìåùàåòñÿ â óëüòðàçâóê. Ñêîðîñòü òðàâëåíèÿ äàííîãî ðàñòâîðà îïðåäåëÿåòñÿ â òîì ÷èñëå òåì, áûëà ëè ðàçìåøàíà áàíî÷êà ñ òðàâèòåëåì ïåðåä òåì, êàê òðàâèòåëü áûë íàëèò â ¼ìêîñòü äëÿ ðàçîâîãî òðàâëåíèÿ ñòðóêòóðû. Ïî ýòîé ïðè÷èíå è ïî ïðè÷èíå íåîäíîðîäíé ñêîðîñòè òðàâëåíèÿ ðàçíûõ ñëî¼â ÿìû âðåìÿ òðàâëåíèÿ ïîäáèðàåòñÿ ýêñïåðèìåíòàëüíî. Ïðè ñëèøêîì áîëüøîé ñêîðîñòè òðàâëåíèÿ ðàñòâîð ìîæíî ðàçáàâèòü âîäîé äëÿ óìåíüøåíèÿ ýòîé ñêîðîñòè.

Ãëóáèíó òðàâëåíèÿ (è âûñîòû äóãèõ ýëåìåíòîâ, íàïðèìåð, âûñîòû íàíåñ¼íîãî ðåçèñòà) ãðóáî ìîæíî îïðåäåëèòü ïðè ïîìîùè ôîêóñèðîâàíèÿ ìèêðîñêîïà ñ ìàêñèìàëüíûì óâåëè÷åíèåì ïîî÷åð¼äîí íà ñòðàâëåíîóþ è íåñòðàâëåíîóþ îáëàñòü ñ äàëüíåéøèì ïåðåñ÷¼òîì òðåáóåìîãî äëÿ ýòîãî ïîâîðîòà ðó÷êè Z-ïîçèöèîíèðîâàíèÿ ìèêðîñêîïà â âûñîóò òðàâëåíèÿ. Òàêèì îáðàçîì óäàâàëîñü îïðåäåëèòü ãëóáèíó òðàâëåíèÿ ñ òî÷íîñòüþ ïîðÿäêà 30%. Äëÿ áîëåå òî÷íîãî êîíòðîëÿ ãëóáèíû òðàâëåíèÿ èñïîëüçóåòñÿ àòîìíî-ñèëîâîé ìèêðîñêîï.

Ïðè òðàâëåíèè íåîáõîäèìî óáåäèòüñÿ, ÷òî ÷òî âî âñåé íåîáõîäèìîé îáëàñòè îáðàçöà êâàíòîâàÿ ÿìà ñòðàâëàñü íèæå ñëîÿ HgTe. Äëÿ ýòîãî ìîæíî êàê èñïîëüçîâàòü àòîìíî-ñèëîâîé ìèêðîñêîï (ñì. ðèñ. 4.5), òàê è ïðîíàáëþäàòü ñëîé HgTe ÿâíî â ýëåêòðîííûé ìèêðîñêîï (ñì ðèñ. 2.2 (b)). Â äàííîé ðàáîòå äëÿ ýòèõ öåëåé èñïîëüçóåòñÿ ÀÑÌ â ñèëó ïðîñòîòû ìåòîäà. Ïðè àíàëèçå ãëóáèíû ÿìû íåîáõîäèìî óáåäèòüñÿ, ÷òî îíà ñòðàâëàñü äî íóæíîé ãëóáèíû íà ðàçíûõ îáëàñòÿõ ÿìû, òàê êàê ñêîðîñòü òðàâëåíèÿ çàâèñèò â òîì ÷èñëå è îò ïëîùàäè òðàâëåíèÿ. Òàê, ãëóáèíà òðàâëåíèÿ ó áîëüøèõ êîíòàêòîâ ìîæåò îöëè÷àòüñÿ îò ãëóáèíû òðàâëåíèÿ ó ìèêðîííîé ñòðóêòóðû, ñì. ðèñ. 4.5. Ïðè ðàáîòå ñ àòîìíî-ñèëîâûì ìèêðîñêîïîì íåîáõîäèìî áûòü àêêóðàòíûì, òàê êàê èãëà ìèêðîñêîïà ñïîñîáíà ïîöàðàïàòü ñòðóêòóðó.

Ôîòîãðàôèÿ ñòðóêòóðû ïîñëå òðàâëåíèÿ è óäàëåíèÿ îñòàòêîâ ðåçèñòà äöåòîííì èçîáðàæåíà íà ðèñ. 4.6. Òðàâèòü ñòðóêòóðó ñ ìåêêèì ýëåìåíòàìè äî ïîäëîæêè æèäêèì òðàâèòåëåì òðóäíî, ò.ê. òðàâëåíèå ïðîèñõîäèò íå òîëüêî âãëóáü ñòðóêòóðû, íî è â å¼ áîêà, ïîýòîìó ôîðìà æåëàåìîé ñòðóêòóðû äåôîðìèðóåòñÿ. Ïðè ëèòîãðàôèè ðèñóíêà ñòðóêòóðû èñïîëüçóåòñÿ ôîòîðåçèñò ÔÏ-2506 ôèðìû ÔÐÀÑÒ-Ì. Îí íàíîñèòñÿ íà ïîäëîæêó íà ñïèíåðå, ðàñêðó÷åííì äî ñêîðîñòè 6 òûñÿ÷ îáîðîòîâ â ìèíóòó, â òå÷åíèå 1 ìèíóòû. Çàòåì ñóøèòñÿ íà ïå÷êå ïðè òåìïåðàòóðå 80C 10 ìèíóò. Ïðè ëèòîãðàôèè

Ðèñ. 4.5. ÀÔÌ èçîáðàæåíèå è ïðîôèëü ïîâåðõíîñòè (a) îáëàñòè ó êîíòàêòà øèðèíîé 400 ìèêðîí è (b) îáëàñòè ñ ïîëîñêàìè, êàæäàÿ øèðèíîé 4 ìèêðîíà. Äåòàëèçèðîâàííîñòü êàðòèíêè ìîæíî óâåëè÷èòü, óâåëè÷êâ âðåìÿ ñêàíèðîâàíèÿ. Òàê, îáëàñòü ìåæäó ïîëîñêàìè íà ðèñóíêå (b) íà ñàìîì äåëå èìåòò áîëåå óãëîâàòóþ ôîðìó.

èñïîëüçóþòñÿ ìîùíîñòü èçëó÷åíèÿ ëàçåðà â 10 ìÂò. Òàêèå ïàðàìåòðû ëèòîãðàôèè ïîäáèðàëèñü ýêñïåðèìåíòàëüíî äëÿ äàííîé ìàðêè ðåçèñòà è äëÿ äàííîé ïîâåðõíîñòè ïîäëîæêè. Åñëè èñïîëüçîâàòü äóãîé ðåçèñò èëè äóãóþ ïîäëîæêó, òî ïàðàìåòðû ëèòîãðàôèè äîëæíû áûòü äóãèè.

4.2.6. Íàïûëåíèå äèýëåêòðèêà

Â êà÷åñòâå äèýëåêòðèêà èñïîëüçóåòñÿ ïàðèëåí (ïîëè-ïàðà-êñèëèëåí). Ýòîò ìàòåðèàë óäîáåí òåì, ÷òî îí íàíîñèòñÿ ïðè êîìíàòíîé òåìïåðàòóðå, ÷òî âàæíî äëÿ ðàáîòû ñ ëåãêîïëàâêèì ìàòåðèàëàìè, èíåðòåí êî ìîãèì õèìè-÷åñêèì âåùåñòâàì, â òîì ÷èñëå ê àöåòîíó, íåêîòîðûì êèñëîòàì è ùåëî÷àì.