

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А.Ф. ИОФФЕ**

На правах рукописи

Березовец Вячеслав Анатольевич

**КВАНТОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ В 2D НАНОСТРУКТУРАХ ПОНИЖЕННОЙ
СИММЕТРИИ (2D-ДЫРКИ НА ПОВЕРХНОСТЯХ КРИСТАЛЛА ТЕЛЛУРА)**

(специальность 01.04.10 физика полупроводников)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург
2006

Работа выполнена в **Физико-техническом институте имени А.Ф. Иоффе**
Российской академии наук

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор
А.С. Андреевко.
доктор физико-математических наук, профессор
Е.Л. Ивченко
доктор физико-математических наук, профессор
С.А. Немов

Ведущая организация:

Физический Институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва

Защита состоится “15” марта 2007 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 002.205.02 при Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН по адресу:

194021, Санкт-Петербург, Политехническая, д.26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технического института им. А.Ф.Иоффе РАН.

Автореферат разослан “12” февраля 2007 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.205.02

доктор физико-математических наук

Л.М. Сорокин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Уникальные физические свойства теллура – одного из четырех элементарных полупроводников (Si, Ge, Se, Te) привлекают внимание физиков из-за анизотропии структуры и сложного энергетического спектра носителей заряда в нем. К числу таких свойств относятся: дихроизм межзонного и внутризонного поглощения, расположение края полосы фундаментального поглощения в области ближнего инфракрасного диапазона, наличие пика поглощения в области среднего инфракрасного диапазона (11 мкм пик межзонного поглощения), высокая пьезоактивность этого полупроводника. Перечисленные выше свойства чувствительны к внешним воздействиям, например, температуре, излучению в разных диапазонах длин волн, магнитному полю, изменению уровня легирования, всесторонней и одноосной механической деформации. Возможность реализации перечисленных выше качеств в технических устройствах поддерживают интерес к этому материалу.

Основные характеристики объемного монокристаллического Te и законы дисперсии для разрешенных зон этого полупроводника были установлены [1] к 1969 году в результате исследований легированных образцов Te. Анализ экспериментальных и теоретических работ по исследованию теллура, выполненных за последние 2-3 десятилетия, показывает возрастающий интерес к изучению низкотемпературных физических свойств монокристаллов теллура предельной чистоты, в которых проявляются уникальные свойства, связанные с образованием слоя, обогащенного дырками, на поверхности монокристаллов. Одной из целей таких исследований является выяснение механизмов, приводящих к появлению необычных электрофизических свойств этого материала. Примером таких свойств может служить отсутствие вымораживания свободных носителей заряда при низких, вплоть до 0,05 К, температурах в невырожденных, т.е. чистых кристаллах, которое противоречит сегодняшним представлениям о свойствах полупроводников.

Знание свойств сверхчистого теллура очень важно и для совершенствования технологии создания полупроводниковых соединений (HgTe , CdTe , $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$, $\text{Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$ и т.д.), имеющих широкое практическое применение при производстве оптоэлектронных приборов. Теллур в таких соединениях является одной из компонент. Для прогнозирования характеристик чувствительных элементов приборов исходные химические компоненты, входящие в состав, должны быть максимально чистыми, иначе примеси, в том числе и в Te , могут оказывать решающее влияние на конечные результаты.

Большой интерес представляют исследования края полосы фундаментального поглощения (ближний инфракрасный диапазон – ширина запрещенной зоны теллура составляет приблизительно 0,34 эВ), исследование кинетических свойств носителей тока в Te при размерном квантовании энергетического спектра этих носителей, а также исследование пьезоэффекта. Часто, по результатам таких исследований, появляются возможности дать физическую интерпретацию экспериментальным фактам, ранее не нашедшим надежного объяснения.

Особо следует отметить интерес к исследованию этого материала со стороны теоретиков. Причина такого внимания обусловлена уникальным строением монокристаллов Te , когда при его гексагональной внешней форме кристалл имеет более низкую, тригональную, симметрию из-за расположения атомов вдоль винтовой оси в элементарной ячейке. Кристаллы Te не имеют центра инверсии, а спиновое вырождение верхней валентной зоны снято сильным спин-орбитальным взаимодействием. Эти особенности строения кристаллов теллура привлекают к нему внимание, как к модельному материалу при теоретических исследованиях. Так при анализе особенностей межзонного поглощения в Te была предложена [3] идея циркулярного фотогальванического эффекта, который был впоследствии экспериментально обнаружен именно на этом материале.

К настоящему времени остается необъясненным целый ряд необычных свойств Те. Это, прежде всего, дырочный тип проводимости теллура при низких температурах, отсутствие температурного вымораживания свободных носителей заряда [2] в невырожденных кристаллах Те, аномальная зависимость электросопротивления от магнитного поля при низких температурах [4], сильная зависимость электрических свойств от способа обработки поверхности образцов [5], и существование необычных состояний носителей заряда в узком приповерхностном слое кристаллов Те, маскирующих реальные характеристики носителей тока в объеме [6].

Целью работы являлось изучение свойств особых состояний носителей тока в Те, расположенных вблизи естественной поверхности монокристаллов, путем исследования участия этих состояний в гальваномагнитных эффектах. Задача состояла в исследовании вклада таких носителей в полную проводимость образцов, изучение энергетического спектра, выявление особенностей размерного квантования их энергетического спектра, исследование механизма образования этих особых поверхностных состояний естественного происхождения, прогнозирование и наблюдение новых эффектов в Те. Результаты исследований размерно-квантованных состояний на естественной поверхности теллура, полученные в ходе диссертационной работы, позволили сделать существенный шаг в понимании интегральных физических свойств монокристаллического теллура и прогнозировании свойств нанокластерных материалов на основе Те..

Объекты и методы исследования. Объектом исследования были образцы, приготовленные из сверхчистых монокристаллов теллура ($p_{77\text{K}} \cong 10^{13} \text{ см}^{-3}$), выращенных на монокристаллической затравке методом вытягивания из расплава (метод Чохральского). Монокристаллы выращивались в лаборатории кинетических явлений в твердых телах при низких температурах ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. Критерием отбора монокристаллов для изготовления из них образцов были: минимальная величина концентрации носителей заряда

(при $T=77\text{K}$), определенная экспериментально из эффекта Холла $\rho_{R77} \sim (4\div 6)\times 10^{13}\text{cm}^{-3}$ и максимальная величина холловской подвижности носителей тока $R\sigma \cong (5\div 7)\times 10^3\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{с}$. Специально разработанной технологией, исключая механические способы обработки, из таких монокристаллов приготавливались образцы в форме прямоугольных призм, широкая грань которых имела по отношению к оси третьего порядка (винтовая ось C_3) две взаимных ориентации: перпендикулярно оси C_3 - ориентация (0001) и параллельно оси C_3 - ориентация $(10\bar{1}0)$ (плоскость естественного скола). Широкая грань образцов тщательно обрабатывалась до зеркального блеска химическими полирующими травителями разных составов. Толщина образцов была меньше миллиметра, а ширина составляла несколько миллиметров. К узким боковым граням приваривались методом искровой сварки измерительные электроды (золотая проволока диаметром $20\div 50\ \mu\text{m}$).

На приготовленных описанным выше способом образцах проводились измерения гальваномагнитных эффектов (эффекта Холла и магнетосопротивления). Измерения гальваномагнитных эффектов проводились при низких ($1,5\div 4\ \text{K}$) и сверхнизких (до $74\ \text{mK}$) температурах с использованием разных источников магнитных полей: магнитные поля до 15T создавались сверхпроводящим соленоидом, а до 30T - в установке импульсного поля. В качестве дополнительного фактора влияния на гальваномагнитные эффекты к широкой плоскости образцов прикладывалось сильное (до $10^6\ \text{V/cm}$) электростатическое поле (эффект поля), гидростатическое сжатие образцов (до $12\ \text{кбар}$) в автономных немагнитных камерах высокого давления. В ходе измерений ориентация широкой грани образцов относительно вектора индукции магнитного поля \mathbf{B} могла плавно изменяться в пределах от перпендикулярной $\mathbf{B} \perp (0001)$ до параллельной $\mathbf{B} // (10\bar{1}0)$. Для регистрации результатов измерений применялась автономная запись и обработка сигналов.

Научная новизна работы, ее практическая значимость состоит в следующем:

1. В результате измерений гальваномагнитных коэффициентов на образцах с высокой концентрацией двумерных дырок в аккумулярующем слое (АС) были обнаружены наряду с осцилляциями магнетосопротивления осцилляции эффекта Холла. Осцилляции оказались осцилляциями Шубникова-де Газа (ШГ), возникающими вследствие квантования по Ландау энергетического спектра размерно-квантованных дырок ($2D$ -дырок) в АС на поверхностях Те разной ориентации.

2. Обнаружен эффект магнитного пробоя для $2D$ -дырок в АС на поверхности $(10\bar{1}0)$ Те, происходящий при определенных значениях энергии Ферми для размерно-квантованных подзон.

3. Обнаружен эффект существования квантовых поправок к проводимости двумерных дырок в АС на разных поверхностях образцов теллура.

4. В сильных магнитных полях обнаружена необычная зависимость от гидростатического сжатия осцилляций ШГ гальваномагнитных коэффициентов размерно-квантованных носителей заряда в АС, ориентированном в плоскости (0001) , связанная с ростом числа размерно-квантованных подзон в АС, ростом концентрации и подвижности $2D$ -дырок в АС с давлением.

5. Впервые получены и проанализированы экспериментальные данные о влиянии давления на электропроводность в классически слабых магнитных полях, позволившие определить барические зависимости коэффициента тригонального искажения энергетического спектра дырок в Те и величины спинового расщепления верхней валентной зоны.

6. Развитие микроскопической теории квантовых поправок к проводимости на случай трехмерных носителей тока [12] предложило новую трактовку природы эффекта отрицательно магнетосопротивления (ОМС) в Те при трехмерном характере проводимости: эффект обусловлен существованием

квантовых поправок к проводимости объемных носителей тока. Такая трактовка предполагает необычную зависимость эффекта ОМС в Те от температуры. Экспериментально подтверждено для случая объемной проводимости дырок в сильно легированном Те предсказание теории квантовых поправок о смене знака эффекта магнетосопротивления в слабых магнитных полях с ОМС на АПМС при понижении температуры.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

1) в ходе исследований доказано, что на поверхности теллура всегда образуется естественный окисел TeO_2 (толщиной $\approx 20\div 30\text{\AA}$) с переходным слоем не более 5\AA ;

2) результаты экспериментов в слабых магнитных полях стимулировали развитие теории [8-10] эффекта квантовых поправок к проводимости $2D$ -дырок в Те, разработанной с учетом особенностей строения этого полупроводника (отсутствие центра инверсии, снятое сильным спин-орбитальным взаимодействием спиновое вырождение, тригональное искажение энергетического спектра). Установлены различия в интерпретации эффектов в зависимости от ориентации АС относительно кристаллографических плоскостей Те. Для случая ориентации слоя с АС в плоскости (0001) эффект квантовой поправки был объяснен в рамках теории интерференционных поправок к проводимости взаимодействующих носителей заряда. Определены характерные параметры теории и оценен коэффициент тригонального искажения энергетического спектра дырок. Доказано, что для объяснения эффекта квантовой поправки к проводимости по АС в плоскости $(10\bar{1}0)$, необходим учет межэлектронного взаимодействия и сильного внутривозонного рассеяния.

В результате проведенного исследования развито новое **научное направление** в физике полупроводников – квантовые гальваномагнитные явления в гиротропных полупроводниках и двумерных слоях на их основе.

Основные научные положения, выносимые на защиту.

1. Обнаружены в ходе исследований чистых образцов Те осцилляции диссипативной и недиссипативной компонент тензора проводимости в магнитном поле являются осцилляциями типа Шубникова-де Газа, обусловленные квантованием по Ландау энергетического спектра вырожденных дырочных носителей тока в приповерхностном аккмулирующем слое теллура.

2. Установлено, что АС на кристаллографических поверхностях теллура расположен в узкой (~10 нм) одномерной потенциальной яме, размеры которой соизмеримы с длиной волны де Бройля носителей тока в теллуре. Вследствие этого энергетический спектр дырок в АС размерно квантован в направлении перпендикулярно поверхности образца с АС. Установлено, что закон дисперсии дырок в АС соответствует закону дисперсии в трехмерном случае без учета членов, описывающих зависимость энергию дырок в направлении размерного квантования.

3. Предложена модель механизма формирования АС на поверхностях Те. Разработан метод определения параметров дырок (концентрации, подвижности, эффективной массы) в АС на основании компьютерного анализа результатов измерений гальваномагнитных эффектов в квантующих магнитных полях при температурах жидкого гелия.

4. Показано, что 2D-дырки в АС на различных кристаллографических плоскостях теллура имеют повышенную, по сравнению с объемными носителями тока, концентрацию и подвижность. При оценке электропроводности по АС методом эффекта поля установлен нижний оценочный предел вклада от АС в полную проводимость образца. Показано, что электропроводность АС соизмерима или превосходит электропроводность объемных носителей тока относительно тонких образцов.

5. Обнаружен эффект внутриволнового магнитного пробоя для двумерных дырок, возникающий из-за гантелеобразной формы поверхности Фер-

ми $2D$ -дырок в Те на поверхности $(10\bar{1}0)$. Показано, что обнаруженный эффект влияет на осцилляционную картину и должен учитываться при идентификации $2D$ -подзон на поверхности $(10\bar{1}0)$.

6. Установлено, что подвижности носителей заряда в каждой из заполненных подзон в АС превосходят значения подвижности для объемных носителей заряда и заметно превышают значения подвижности дырок в легированных образцах теллура, что связано с различием механизмов рассеяния вырожденных $2D$ - и $3D$ -дырок..

7. Обнаружен эффект аномального магнетосопротивления на образцах Те с АС, ориентированном в разных кристаллографических плоскостях и выявлены зависимости этого эффекта от концентрации двумерных дырок, температуры эксперимента и кристаллографической ориентации поверхности с АС. Сделан вывод, что обнаруженный эффект является следствием существования квантовой поправки к проводимости $2D$ -дырок в Те.

8. Численный анализ обнаруженного эффекта квантовой поправки выполнен с учетом особенностей кристаллического строения Те: низкой симметрии, со снятым спиновым вырождением и особой ролью t -симметрии. В результате анализа поправка к проводимости АС на плоскости (0001) объяснена в представлении об интерференции волновых функций невзаимодействующих носителей тока, в то время как для ориентации $(10\bar{1}0)$ доказано, что необходим учет электрон-электронного взаимодействия и сильного межподзонного рассеяния $2D$ -дырок в Те.

9. Обнаружено влияние гидростатического давления на гальваномагнитные эффекты образцов теллура с АС на кристаллографической плоскости (0001) . Установлено, что концентрация дырок в АС и электропроводность слоя с $2D$ -дырками растут экспоненциально с давлением. Более быстрый рост электропроводности объяснен уменьшением эффективной массы $2D$ -дырок с давлением.

10. Обнаружена зависимость знака квантовой поправки к проводимости АС и ее величины от давления (поверхность (0001)). На основании выводов микроскопической теории квантовой поправки к двумерной проводимости в Те определены зависимости коэффициента тригонального искажения энергетического спектра и величины спинового расщепления валентной зоны теллура от давления.

11. Впервые созданы и исследованы гальваномагнитные эффекты в композитных образцах: кластерный кристалл Те разного уровня легирования в диэлектрической матрице опала и обнаружен эффект АПМС. Установлено, что в кластерном кристалле, приготовленном из исходно чистого Те основной вклад в проводимость вносит АС на границе Те-SiO₂, а эффект АПМС является следствием существования квантовой поправки к проводимости такого АС. На кластерных кристаллах, приготовленных из сильно легированного исходного теллура, электропроводность определяется параметрами объемных носителей заряда и АПМС является следствием существования квантовой поправки к проводимости 3D-дырок.

12. Обнаружен эффект квантовой поправки к объемной проводимости сильно легированного монокристаллического Те. Установлено, что, с понижением температуры эффект ОМС растет до определенных значений температуры. Дальнейшее понижение температуры приводит, к уменьшению эффекта ОМС и последующей сменой знака эффекта магнетосопротивления на АПМС. Столь необычное поведение эффекта квантовых поправок обусловлено слабым по сравнению с 2D случаем внутримолекулярным и междолинным рассеянием в объеме кристаллов.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на: XXII Всесоюзной конференции по физике полупроводников, Кишинев 1982, Всесоюзной конференции по физике полупроводников, Баку 1982, 1-ой Российской конференции по физике полупроводников, Н.Новгород 1993, 30-ом совещании по физике низких температур, Дубна 1994, 2-ой Российской конфе-

рениции по физике полупроводников, Зеленогорск 1996, XXXI Совещании по физике низких температур, Москва 1998, IV Российской конференции по физике полупроводников, Новосибирск 1999, НТ-32 Казань, 2000. XXI Международной конференции стран СЭВ по физике и технике низких температур, г. Берлин 1985, VI Международной конференции МАРИВД, Киев 1987, 5 международном симпозиуме "Неоднородные электронные состояния". Новосибирск 1995, 2nd International Conference "Physics of low-dimensional structures-2". Dubna, Russia 1995, International Symposium: Nanostructures, St.-Petersburg 1997, , International Conf. Physics at the turn of the 21st century. St.Petersburg 1998, 11th International Symposium "NANOSTRUCTURES: PHYSICS AND TECHNOLOGY" St. Petersburg 2003, 14th International Symposium "NANOSTRUCTURES: PHYSICS AND TECHNOLOGY" St. Petersburg 2006, 28th International Conference on the Physics of Semiconductors, Vienna 2006.

Результаты работы как в целом, так и отдельные ее части докладывались также на физических семинарах в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, в Техническом университете г. Брауншвайг, Германия, Техническом университете г. Дрезден, Германия, Международной лаборатории сильных магнитных полей и низких температур г. Вроцлав, Польша.

Публикации. По теме диссертации имеется 39 публикаций в научных журналах и трудах российских и международных конференций, которые приведены в конце автореферата.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержит 235 страниц, 73 рисунка, 7 таблиц. Список литературы состоит из 39 наименований авторских публикаций и списка цитируемой литературы, включающего 181 наименование.

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, ее научная новизна, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведены основные сведения о теллуре, данные о структуре и зонном спектре теллура, полученные из анализа результатов экспериментальных исследований сильно легированных монокристаллических образцов. Рассмотрены основные свойства и параметры энергетического спектра валентной зоны теллура, зоны проводимости, установленные, к моменту начала данных исследований. Особо подчеркнута наличие седловой точки в энергетическом спектре верхней валентной зоны Te , изменение фактора долиного вырождения с 4 до 2 при переходе уровня Ферми выше седловой точки, неэквивалентность по спину соседних точек H и H' в зоне Бриллюэна и тригональное искажение поверхности Ферми при относительно больших концентрациях дырок в верхней валентной зоне. Приведены сведения о гальваномагнитных свойствах легированных и предельно чистых кристаллов теллура и их особенностях. Сделан обзор публикаций о роли поверхностной проводимости в теллуре.

Во второй главе представлено описание способов бездефектной обработки поверхности монокристаллического теллура при изготовлении образцов для исследований объемной проводимости и проводимости приповерхностного слоя. В основе разработанной технологии лежит принцип исключения механических способов обработки (от резки монокристаллов до полировки поверхности образцов). Для реализации этого принципа все операции проводятся с использованием химических травителей разных составов, указанных в тексте. В этой же главе дано описание оригинальных методик (например, методика измерения сигнала, пропорционального второй производной от измеряемых магнетопольных зависимостей) и приведены основные параметры измерительных установок и схем, которые использовались в ходе исследований.

В третьей главе диссертации описаны результаты исследований низкотемпературных гальваномагнитных эффектов в сильных квантующих магнитных полях, проведенных на образцах Те, приготовленных из монокристаллов с наивысшим на сегодняшний день классом чистоты по электрически активным примесям (0,999999999). Оказалось, что на макроскопических образцах со значениями концентраций дырочных носителей тока, соответствующих невырожденной статистике, наблюдается хорошо различимая немонотонная зависимость сигнала магнетосопротивления и эффекта Холла от величины напряженности магнитного поля (рис.1 – правая часть). Было установлено, что обнаруженные особенности являются осцилляциями Шубникова-де Газа (ШГ). Они периодичны на шкале обратных магнитных полей и обусловлены квантованием по Ландау энергетического спектра дырок, концентрация которых должна подчиняться вырожденной статистике. При

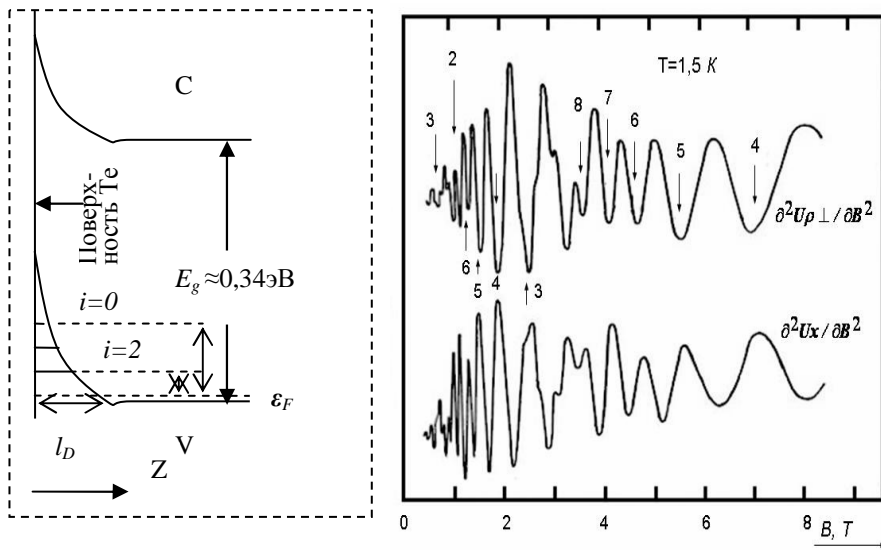


Рис. 1. Схематическое изображение энергетической структуры зон Те (левая часть) вблизи поверхности кристалла при формировании АС. $\epsilon_F - E_i$ - энергетическое положение размерно-квантованных подзон (i) в АС по отношению к уровню Ферми. В правой части рисунка – выделенные дифференци-

альным методом осцилляции ШГ холловского напряжения (нижняя кривая) и магнетосопротивления для размерно-квантованных дырок (2D-дырки в АС). Стрелки с цифрами соответствуют положению в магнитном поле и номеру уровня Ландау, соответственно, в размерно-квантованных подзонах. Концентрация дырок в i -той подзоне: $p_i = (e/h)g_s g_v [\Delta(1/B_i)]^{-1}$, где $g_s g_v$ - факторы спинного и долинного вырождения соответственно, $\Delta(1/B_i)$ - период осцилляций ШГ.

измерениях угловой зависимости и влияния эффекта поля на положение осцилляционных экстремумов установлено, что обнаруженные осцилляции являются следствием квантования по Ландау энергетического спектра дырок, которые находятся в узкой, одномерной потенциальной яме вблизи поверхности образцов (схематично энергетическая структура показана на рис. 2. – левая часть). Этот слой вблизи поверхности образцов получил название аккумуляющего (АС).

В данной главе отмечено, что ранее осцилляции холловского напряжения большой амплитуды в Те не наблюдались. Анализ экспериментальных зависимостей выявил несколько периодов осцилляций ШГ для разных поверхностей монокристаллов (для ориентации АС в плоскости (0001) – три периода, для ориентации $(10\bar{1}0)$ - два периода). Такое количество периодов противоречит данным, полученным ранее при исследовании осцилляций ШГ в случае легированного Те и объясняется образованием размерно-квантованных подзон (i), которые возникают из непрерывного спектра дырок в АС вследствие размерного квантования, поскольку ширина ямы с дырками в АС (150 \AA) оказывается соизмерима с длиной волны де Бройля (l_D), рассчитанной с использованием параметров для дырочных носителей тока в Те и схематично показанной стрелкой на левой части рисунка 1.

В этой же главе описана методика компьютерной обработки данных при определении параметров двумерных дырок в АС на разных кристаллографических плоскостях, а в таблицах - параметры носителей заряда, определенные из количественного анализа (концентрации размерно-квантованных носителей

заряда в подзонах, подвижности и эффективные массы). Предлагается модель спектра потенциальной ямы на поверхностях теллура (см. левую часть рис.1) и проводится сравнение с результатами гальваномагнитных исследований, полученными в разных научных центрах (Вюртсбургский университет в Германии и Высшая Школа Николь Нормаль во Франции). Результаты идентификации осцилляционных экстремумов, выделенных в импульсных магнитных полях (до 30 Т) и в квазистационарных магнитных полях сверхпроводящего соленоида (до 12 Т), были сопоставлены с результатами, полученными в других лабораториях. Оказалось, что периоды, определенные для ориентации АС в плоскости (0001), хорошо совпадают с литературными данными, в то время как для плоскости $(10\bar{1}0)$ наши результаты выявили особенности строения энергетического спектра теллура при разном заполнении верхней подзоны. Благодаря совершенной технологии обработки поверхности образцов и более чувствительной (модуляционной) методике выделения осцилляций удалось обнаружить особенности в поведении осцилляционных экстремумов при росте концентрации 2D-дырок в АС. В результате количественного анализа был идентифицирован эффект внутривозонного магнитного пробоя для двумерных носителей заряда на плоскости $(10\bar{1}0)$, ранее наблюдавшегося только для трехмерного случая при ориентации $\mathbf{V} \perp \mathbf{C}_3$. Внутривозонный магнитный пробой представляет собой эффект замыкания туннельным образом квазиклассических циклотронных траекторий на энергетической поверхности в окрестностях особых точек в \mathbf{k} -пространстве, вблизи которых такое движение запрещено (пунктир на вставке рис.2). Эффект в Те возникает, когда энергия Ферми носителей тока оказывается близкой к значению энергии седловой точки спектра дырок. Этот эффект проявляется в осцилляциях ШГ в виде дополнительных экстремумов и ошибочно может быть интерпретирован, как результат появления новой размерно-квантованной подзоны в АС при возрастании концентрации дырок в приповерхностном слое (рис.2). Учитывая обна-

руженный эффект внутриподзонного магнитного пробоя удалось исправить уже предложенную в литературе картину эволюции двумерных подзон с ростом полной концентрации носителей заряда в приповерхностной потенциальной яме и объяснить особенности формирования разрешенных подзон по мере роста концентрации дырок в АС.

В этой же главе выполнен расчет компонент тензора удельной проводимости на основе измеряемых компонент тензора удельного сопротивления (АС в плоскости (0001)) и показано, что амплитуда осцилляции ШГ недиссипативной (холловской) компоненты тензора проводимости при $\mathbf{V}_\perp(0001)$ превышает амплитуду осцилляций диссипативной компоненты и эта разница заметно превышает оценки, сделанные по теоретическим формулам из [7]. В качестве модели, улучшающей согласие эксперимента с результатами расчета, предложен механизм межподзонного рассеяния дырок в АС, учет которого усиливает холловскую компоненту по сравнению с диссипативной (σ_{xx}).

Четвертая глава диссертации посвящена исследованию эффекта аномального магнетосопротивления $2D$ -дырок в АС, обнаруженного в ходе низкотемпературных измерений. Эффект состоит в аномальном поведении магнетосопротивления в классически слабых ($\omega \tau \ll 1$, где ω -циклотронная частота, а $\omega \tau$ - холловский угол) магнитных полях, причем, оказалось, что величина и знак эффекта зависит как от концентрации так и от температуры эксперимента, а магнетополевая зависимость в широком диапазоне температур линейна от логарифма значения магнитного поля. При анализе температурной зависимости проводимости образцов с АС в нулевом магнитном поле было установлено, что она тоже зависит от логарифма температуры линейно, а знак наклона определяется величиной проводимости, рассчитанной на квадрат поверхности с АС. Все эти признаки однозначно указывают на проявление эффекта квантовых поправок к проводимости носителей тока АС на по-

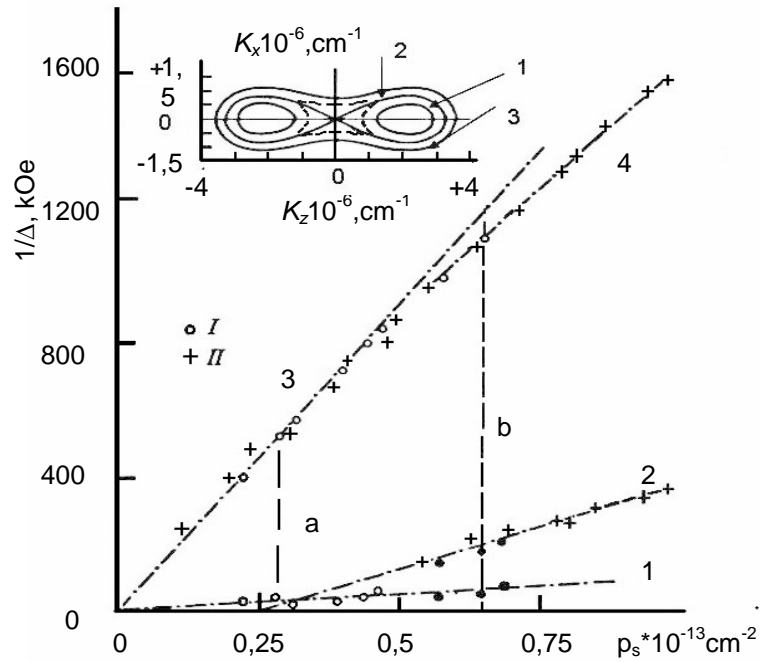


Рис. 2. Зависимость обратной величины периода ШГ ($1/\Delta$), как функция полной концентрации 2D-дырок на поверхности $(10\bar{1}0)$ Те. Крестики - экспериментальные точки - литературные данные. Кружки - наши результаты. Прямые 1, 2, 3, и 4 - линейная аппроксимация положения экспериментальных точек, a и b соответствуют кривым a и b на рис.35.Ш (в тексте диссертации).

На вставке: Ферми поверхности, рассчитанные для разных значений Ферми энергий. 1, 2 и 3 соответствуют $\varepsilon_F = 1meV$, $\varepsilon_F = 2,3meV$,

$\varepsilon_F = 4meV$ соответственно. Штриховыми линиями обозначены пути замыкания квазиклассических траекторий при магнитном пробое.

верхности Те. Обнаружение эффекта совпало с появлением обобщающей теоретической статьи [13] о природе квантовых поправок к проводимости в полупроводниках. Для интерпретации всей совокупности обнаруженных зависимостей, рассмотренные ранее в [13] случаи, были дополнены анализом особых механизмов сбоя фазы в Те - полупроводнике низкой симметрии. Так,

упругий механизм рассеяния (например - зеркальное отражение от границы), который не сбивает фазу волновой функции в высоко симметричных кристаллах, превращается в теллуре в неупругий, поскольку из закона дисперсии для этого материала следует, что $\varepsilon(k) \neq \varepsilon(-k)$. Кроме того, теория квантовых поправок к проводимости, когда усредняются вклады в проводимость от диффузного движения носителей заряда по траекториям без сбоя фазы, существенным образом использует инвариантность уравнения движения относительно операции обращения времени (замены t на $-t$). В Те с этой операцией связаны переходы в k -пространстве между долинами в углах зоны Бриллюэна, причем состояния в этих долинах неэквивалентны по спине (см. рис.1), а изменение спинового состояния влияет на знак поправки к проводимости. В результате теоретического анализа всех механизмов сбоя фазы в Те [8-10] были получены выражения для квантовой поправки к проводимости в АС, в которых одно из характерных времен сбоя фазы (τ_{ϕ}) оказалось связано с коэффициентом из закона дисперсии Те (коэффициент тригонального искажения энергетического спектра - γ).

Проведен количественный анализ эффекта квантовых поправок к двумерной проводимости АС на поверхности монокристаллов Те для двух кристаллографических ориентаций этого слоя. Определены параметры теории эффекта квантовых поправок и коэффициент тригонального искажения спектра дырок в Те. Установлено, что квантовые поправки к проводимости АС на поверхности (0001) хорошо объясняются в рамках представлений об интерференции волновых функций невзаимодействующих носителей тока, а для случая АС в плоскости $(10\bar{1}0)$ необходимо учитывать электрон-электронное взаимодействие. Причина такого различия связана с преобладающей ролью ковалентных связей в плоскостях $(10\bar{1}0)$ между атомами Те в винтовых цепочках и ван-дер-ваальсовского взаимодействия в плоскости (0001) между атомами из соседних цепочек.

На основании выводов микроскопической теории слабой локализации размерно-квантованных носителей тока в Те [9] проведено сравнение величины расщепления верхней валентной зоны из-за сильного спин-орбитального взаимодействия и коэффициента тригонального искажения спектра в законе дисперсии Те, определенного при анализе эффекта слабой локализации. Получено удовлетворительное согласие рассчитанной величины расщепления с данными по оптическим исследованиям.

В пятой главе диссертации приведены результаты экспериментальных исследований влияния всестороннего сжатия на гальваномагнитные свойства, как объемных носителей тока в образцах теллура, так и на свойства размерно-квантованных дырок в АС поверхности (0001). Выбор именно такой ориентации АС в этих экспериментах был связан с предполагаемым уменьшением расстояний между цепочками атомов в кристалле Те с ростом давления, что должно привести к более симметричной структуре упаковки атомов Те в кристалле (симметризация кристалла). В пределе, переход к более высокой группе симметрии должен повлиять на величину коэффициента тригонального искажения спектра (коэффициент γ в 76.IV (см. диссер.) должен уменьшаться) и вызвать, уменьшение обратной величины характерного времени сбоя фазы (80.IV) при учете механизма внутривалентного рассеяния. Эти изменения должны создать условие для наблюдения перехода от АПМС к ОМС.

По результатам измерений в сильных, квантовых, магнитных полях и последующей математической обработки установлено, что с давлением происходит: а) увеличение концентрации $2D$ -дырок в АС на поверхности (0001), б) увеличение подвижности носителей тока в АС и объеме образца, в) увеличение числа заполненных размерно-квантованных подзон в АС. Эмпирически полученная формула зависимости концентрации дырок в АС от внешнего сжатия, хорошо соответствует представлению о зависимости величины стационарной диэлектрической проницаемости от давления, полученной

в [14] для теллура, и находится в хорошем согласии с результатами экспериментов по исследованию эффекта фотоупругости на Те [15].

Обнаруженный эффект роста концентрации $2D$ -дырок в АС с давлением важен, поскольку предполагает усиление влияния тригонального искажения на характерное время сбоя фазы (τ_γ) при внутривыгодном рассеянии. Таким образом, в эффекте квантовых поправок к проводимости при росте давления можно ожидать как усиление эффекта АПМС из-за роста концентрации $2D$ -дырок в АС так и ослабление эффекта АПМС из-за уменьшения коэффициента тригонального искажения γ .

Из результатов измерений и обработки данных сделан вывод о более сильном влиянии всестороннего сжатия на коэффициент тригонального искажения и соответствующее время сбоя фазы, чем влияние роста концентрации $2D$ -дырок в АС на этот же параметр сбоя фазы при внутривыгодном рассеянии. Используя полученную эмпирическую зависимость коэффициента γ от давления и формулу из [12], связывающую величину спинового расщепления Δ_1 верхней валентной зоны с величиной γ , удалось вывести зависимость величины спин-орбитального расщепления от давления верхних валентных зон и нижней вырожденной по спину: $\Delta_1(P) \cong \Delta_1(0) \exp[0,15P(\text{kbar})]$. Такая зависимость означает, что всестороннее сжатие приводит к увеличению спин-орбитального расщепления валентной зоны.

В шестой главе приводятся результаты исследования гальваномагнитных эффектов на искусственно структурированных объектах: теллур - диэлектрическая матрица опала (кластерные кристаллы теллура с разным уровнем легирования Те акцепторной примесью в диэлектрической матрице опала) [15]. Исследования были инициированы выводами микроскопической теории квантовых поправок в теллуре [12]. Согласно этой теории эффект отрицательного магнетосопротивления и аномального положительного магнетосопротивления должен существовать как для случая двумерной (АС на поверхности невыро-

жденных образцов теллура), так и для случая трехмерной, т.е. объемной, проводимости сильно легированного монокристалла теллура. Поэтому, обнаруженный более 50 лет назад эффект отрицательного магнетосопротивления [4], может быть результатом проявления квантовых поправок к проводимости, а, следовательно, в соответствии с микроскопической теорией, знак эффекта может быть изменен, как это было установлено для случая двумерной проводимости. Создание кластерной структуры стало первым шагом в попытке изменить механизм рассеяния (рассеяние на границах SiO_2 -Te), который, как и в двумерном случае, должен был привести к усилению роли междолинных переходов. Сбой фазы волновой функции при таком рассеянии может вызывать смену знака магнетосопротивления в слабом магнитном поле (подробней ниже). Выбор объекта определялся еще тем фактом, что в результате исследований [15] атомной структуры такой системы (опал - Te) было установлено, что Te в матрице опала после кристаллизации образует кристаллическую решетку полностью соответствующую решетке объемных монокристаллов Te.

Предсказанное изменение ОМС на АПМС было наблюден экспериментально на образцах опал -Te, при внедрении сильно легированного теллура, и это было первым подтверждением идеи, что природа аномального отрицательного магнетосопротивления в легированном Te связана, с эффектом квантовых поправок. Кроме того, исследования кластерных кристаллов теллура в диэлектрической матрице опала привели к обнаружению нового класса двумерных систем: 2D-слои на внутренних интерфейсах: кластеры Te – диэлектрическая матрица (опал). Оказалось, что при внедрении из расплава в опал нелегированного Te, на границе диэлектрической матрицы с полупроводником (SiO_2 -Te) образуется аккумулирующий слой, дающий основной вклад в измеряемые при низких температурах гальваномагнитные коэффициенты. Такие выводы были сделаны на основании сравнения температурной

зависимости сопротивления и эффекта Холла для случая легированного и не-легированного исходного Те, внедренного в полости опала.

Согласно выводам теории [12] другим параметром, который мог бы повлиять на знак эффекта магнетосопротивления в объемном кристалле является температура. Ранее было известно, что при понижении температуры образцов, приготовленных из монокристаллов теллура с вырожденным трехмерным электронным газом, наблюдается рост абсолютной величины ОМС с понижением температуры. Выводы теории [12] связывают знак эффекта и такую температурную зависимость с хорошим качеством кристаллов, в которых практически нет центров рассеяния, приводящих к внутриволновым и междолинным переходам, вызывающим сбой фазы, как отмечалось выше. Значительное понижение температуры увеличивает время τ_φ - характерное время сбоя фазы из-за неупругого рассеяния, т.е. уменьшается частота рассеяния на фононах и она становится соизмеримой с частотой рассеяния при внутриволновых и междолинных переходах, которая в монокристаллах достаточно мала. Тогда в формуле для квантовой поправки при трехмерной проводимости

$$\Delta\sigma(\hat{A}) = \sigma_0(\hat{A}B/\eta)^{0,5} \left\{ f_3 \left[\frac{\hat{A}}{\hat{A}_\varphi + \hat{A}_v + \hat{A}_\gamma} \right] + \frac{1}{2} f_3 \left[\frac{\hat{A}}{\hat{A}_\varphi + 2\hat{A}_v} \right] - \frac{1}{2} f_3 \left[\frac{\hat{A}}{\hat{A}_\varphi} \right] \right\}$$

необходимо будет учитывать все члены, т.е. появится слагаемое, описывающее АПМС (последнее слагаемое в фигурных скобках). Это приведет сначала к прекращению роста ОМС с дальнейшим понижением температуры, а потом и к возможной смене знака эффекта магнетосопротивления в слабых магнитных полях, т.е. дальнейшее понижение температуры должно превратить эффект ОМС в эффект АПМС. Последнее слагаемое в скобках нарастает с понижением температуры, и такая смена знака магнетосопротивления наблюдалась нами для случая $2D$ -проводимости теллура.

Экспериментальные результаты по измерению магнетосопротивления сильно легированного ($p_{77\text{K}} \sim 10^{17} \text{cm}^{-3}$) образца Те до сверхнизких (74 мК) температур подтвердили выводы теории квантовых поправок к проводимости Те. При температуре ниже 500 мК наблюдался переход от ОМС к эффекту аномального положительного магнетосопротивления, а при исследовании еще более легированного образца ($p_{77\text{K}} \sim 10^{18} \text{cm}^{-3}$) в интервале температур 500÷74 мК впервые экспериментально наблюдалось сосуществование эффект положительного и отрицательного магнетосопротивления одновременно (Т=500 мК, график №1), аналогично случаю двумерной проводимости. Понижение температуры до 74 мК привело к полному исчезновению отрицательной составляющей поправки к объемной проводимости образца (график №4).

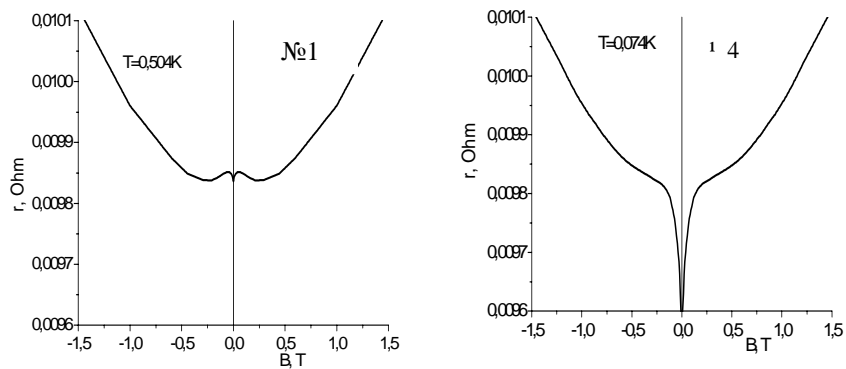


Рис. 3. Изменение знака эффекта магнетосопротивления на образце сильно легированного Те ($p_{77\text{K}} \sim 10^{18} \text{cm}^{-3}$) при сверхнизких температурах. Обе части рисунка(№1 и №4) выполнены в одном масштабе для двух крайних значений температуры. Эффект ОМС и АПМС (Т=504 мК) и АПМС (Т=74 мК).

Подводя итог, необходимо отметить, что в результате исследований в слабых магнитных полях сначала был обнаружен эффект квантовых поправок к двумерной проводимости на теллуре. Особенности проявления этого эффек-

та стимулировали развитие теории квантовых поправок для полупроводников низкой симметрии (без центра инверсии со снятым спиновым вырождением). Распространение теории квантовых поправок к проводимости на трехмерный случай предсказало аналогичный эффект для объемной проводимости в теллуре, причем выводы теории указали направление исследований, при которых эффект ОМС, известный на теллуре с 1948 года, должен превратиться с понижением температуры в АПМС, что и было обнаружено на эксперименте.

Основные результаты и выводы работы.

1. В квантующих магнитных полях на образцах, приготовленных из сверхчистых монокристаллов Те с применением бездефектной технологии обработки кристаллов, были обнаружены осцилляции гальваномагнитных эффектов. Наблюдались осцилляции поперечного магнетосопротивления и эффекта Холла, причем обнаруженные осцилляции представляли собой суперпозицию нескольких серий осцилляций разных периодов. Доказано, что обнаруженные осцилляции являются осцилляциями типа Шубникова-де Гааза. Определено количество периодов, их значения и сделан вывод о невозможности наблюдения таких осцилляций от дырочных носителей тока в объеме образцов.

На основании исследования угловых зависимостей периодов осцилляций и влияния на эти периоды электростатического поля, приложенного к поверхности образца показано, что обнаруженный эффект является следствием квантования по Ландау энергетического спектра дырочных носителей тока, расположенных в узком приповерхностном слое Те (аккумулирующий слой АС) в одномерной потенциальной яме, размер которой соизмерим с длиной волны дырочных носителей и поэтому энергетический спектр таких дырок размерно квантован ($2D$ -дырки).

2. Установлено, что $2D$ -дырки в АС, ориентированном в различных кристаллографических плоскостях теллура, имеют повышенную, по сравнению с объемными носителями тока, концентрацию, подвижность и удельную электропроводность (на квадрат поверхности), а для образцов небольшой толщины ($d \leq 1$ nm) вклад АС в проводимость образца превосходит электропроводность носителей тока в объеме.

3. На основе компьютерного анализа результатов измерений гальваномагнитных коэффициентов в квантующих магнитных полях при низких температурах разработан метод определения параметров (концентрации, подвижности, эффективной массы) дырок в АС при разной его ориентации относительно кристаллографических осей. Установлено, что закон дисперсии и эффективная масса дырочных носителей заряда в АС соответствуют закону дисперсии в трехмерном случае без учета членов, соответствующих направлению размерного квантования.

5. При измерении гальваномагнитных коэффициентов для АС, ориентированного в плоскости $(10\bar{1}0)$ для двумерных дырок обнаружен эффект внутриволнового магнитного пробоя. Эффект состоит в топологическом переходе в k -пространстве от одной формы поверхности Ферми к другой и является следствием замыкания квазиклассических траекторий методом туннелирования через области, в которых сложный закон дисперсии не позволяет существование замкнутых квазиклассических траекторий при циклотронном движении в магнитном поле. В Те эффект магнитного пробоя возникает из-за сложной конфигурации изоэнергетической поверхности (гантелеобразная поверхность Ферми), при значениях энергии Ферми дырок близких к энергии седловой точки.

6. В классически слабых магнитных полях для проводимости по АС, ориентированному в различных направлениях относительно кристаллографических осей, обнаружен эффект аномального магнетосопротивления, величина

на и знак которого зависит от температуры, концентрации двумерных дырок и ориентации АС относительно кристаллографических осей Те. Установлено, что магнетополовая зависимость в широком диапазоне изменений магнитных полей имеет логарифмический вид при всех значениях температуры в эксперименте, а удельная проводимость в нулевом поле зависит от логарифма температуры тоже линейно и знак наклона определяется величиной проводимости, рассчитанной на квадрат поверхности образца с АС, что указывает на существование эффекта квантовой поправки к двумерной проводимости в АС.

7. На основании анализа всей совокупности экспериментальных данных, полученных при исследовании эффекта квантовой поправки к проводимости дырок в АС, установлено, что для случая ориентации АС в плоскости (0001) все особенности проявления квантовой поправки хорошо описываются теорией слабой локализации невзаимодействующих частиц с учетом особенностей проявления низкой симметрии кристалла теллура (отсутствие центра инверсии, снятое спиновое вырождение, тригональное искажение энергетического спектра). Определен коэффициент тригонального искажения спектра дырок.

Установлено, что при ориентации АС в $(10\bar{1}0)$ плоскости образца для интерпретации наблюдаемого эффекта необходимо учитывать электрон-электронное взаимодействие $2D$ -дырок, тогда как тригональное искажение спектра слабо влияет на механизм сдвоя фаз волновых функций дырок в АС.

8. Исследовано влияние всестороннего сжатия на гальваномагнитные эффекты образцов теллура с АС в плоскости (0001). Обнаружен рост концентрации дырок в АС, увеличение числа заполненных подзон и электропроводности $2D$ -дырок в них с ростом давления. На основании численного анализа экспериментальных данных установлена эмпирическая барическая зависимость суммарной концентрации $2D$ -дырок в АС, которая оказалась экспонен-

циальной, что согласуется с моделью, учитывающей влияние давления на показатель диэлектрической проницаемости теллура.

9. Проведено исследование влияния давления на величину и знак квантовой поправки к проводимости АС на поверхности (0001) Те и установлена барическая зависимость величины и знака квантовой поправки к проводимости $2D$ -дырок в АС. Полученный результат находится в согласии с выводами микроскопической теории квантовой поправки к проводимости в Те. Установлена барическая зависимость коэффициента тригонального искажения энергетического спектра дырок в теллуре, получена эмпирическая формула зависимости величины спинового расщепления валентной зоны теллура от давления, которая согласуется с данными по оптическим исследованиям.

10. Исследованы нанокластерные кристаллы Те в диэлектрической матрице опала и обнаружен эффект АПМС при всех уровнях легирования исходного Те. Установлено, уровень легирования Те в матрице опала практически не отличается от исходного. Доказано, что электропроводность нелегированного нанокластерного Те при низких температурах определяется электропроводностью $2D$ -дырок в АС на интерфейсе Те-SiO₂, а для случая легированного Те носит объемный характер. Сделан вывод, что впервые для легированного теллура экспериментально наблюдался эффект АПМС.

Результаты исследования эффекта ОМС для монокристаллов сильно легированного Те показали, что, эффект ОМС с понижением температуры растет, достигая максимальной величины при сверхнизких температурах. Дальнейшее понижение температуры приводит к уменьшению эффекта ОМС с последующей сменой знака эффекта (переходом к АПМС). Экспериментально установлено, что такой переход наблюдается в области $T \leq 300$ мК, а характер зависимости полностью соответствует АПМС при двумерной проводимости. Причина необычного поведения магнетосопротивления легированного Те объяснена тем, что, при относительно высоких температурах (частое рассеяние на фононах, зависящее от температуры) и в пренебрежении вкладов

от междолинного и внутридолинного рассеяния (малая частота рассеяния с такими переходами, независимая от температуры), характерное время сдвиг фазы при рассеянии на фонах растет (рост ОМС), а частота рассеяния падает. При достижении сверхнизких температур частота неупругого рассеяния сравнивается с частотой междолинного и внутридолинного рассеяния. Выравнивание частот рассеяния приводит сначала к снижению амплитуды эффекта ОМС с дальнейшим понижением температуры (вклад в выражение для квантовой поправки к проводимости от междолинного и внутридолинного рассеяния другого знака по сравнению с фоннным), а затем и к смене знака эффекта (переход к АПМС) при дальнейшем снижении температуры.

Список публикаций по теме диссертации:

1. В.А. Березовец, А.Д. Галецкая И.И. Фарбштейн, “Обнаружение квантовых осцилляций эффекта Холла в обогащенном слое на поверхности теллура” Сборник тезисов докладов на XXII Всесоюзной конференции по физике полупроводников Кишинев, т.2, с. 58-59 (1982).
2. В.А. Березовец, А.Д. Галецкая И.И. Фарбштейн, А. Л. Шеланков, “Квантовые осцилляции эффекта Холла в размерно квантованном аккумулирующем слое на поверхности теллура” , Труды Всесоюзной конференции по физике полупроводников, Баку, т 2, с. 82-83 (1982).
3. В.А. Березовец, И.И. Фарбштейн, А. Л. Шеланков. Осцилляции холловской проводимости в 2D аккумулирующем слое на теллуре //ФТТ **25**, №5, 1526-1528 (1983).
4. В.А. Березовец, И.И.Фарбштейн, А.Л.Шеланков. //Квантовые кинетические явления в размерно-квантованном аккумулирующем слое на поверхности теллура”. ФТТ **25**, N5, 2988-2994 (1983).

5. В.А. Березовец, И.И. Фарбштейн, А.Л. Шеланков Слабая локализация в условиях снятого спинового вырождения (двумерный слой на поверхности теллура). //Письма в ЖЭТФ **39**, в.2, 64-66 (1984).
6. В.А. Березовец «Исследование электронных состояний на поверхности теллура при низких температурах», Кандидатская диссертация, с. 183 (1984).
7. В.А. Березовец, И.И. Фарбштейн, А.Л. Шеланков. Аномальное магнитосопротивление двумерных дырок на поверхности теллура при низких температурах. Тезисы докладов на XXIV Международной конференции стран СЭВ по физике и технике низких температур, г. Берлин, (1985).
8. В.А. Березовец, И.И. Фарбштейн, М.Л. Шубников. Проводимость размерно-квантованных дырок на поверхности теллура в условиях гидростатического сжатия. //ФТТ **28**, №5 1516-1518 (1986)
9. В.А. Березовец, В.В. Косарев, И.И. Фарбштейн. Влияние гидростатического давления на свойства 2D-дырок на поверхности теллура – полупроводника низкой симметрии. Тезисы доклада VI Международной конференции МАРИВД г. Киев, с.73 (1987).
10. В.А. Березовец, И.И. Фарбштейн, М.Л. Шубников. Влияние гидростатического давления на проводимость двумерных носителей заряда (2D-дырки на поверхности теллура). Физика и техника высоких давлений, **28**, 27-29 (1988).
11. В.А. Березовец, Д.В. Машовец, А.О. Смирнов, Д.В. Смирнов, И.И. Фарбштейн. Свойства размерно-квантованных дырок в аккумулирующем слое на поверхности $(10\bar{1}0)$ теллура. //ФТТ **33**, N12, 3502-3509 (1991).
12. В.А. Березовец, А.О. Смирнов, И.И. Фарбштейн. Обнаружение магнитного пробоя в двумерном слое на поверхности $(10\bar{1}0)$ теллура. //ФТТ **30**, №7, 2218-2221 (1988).
13. В.А. Березовец, Ю.Б. Лянда-Геллер, А.О. Смирнов, И.И. Фарбштейн. Особенности эффекта слабой локализации 2D-дырок на поверхности (1010)

- теллура (роль анизотропии энергетического спектра). //Письма в ЖЭТФ, **58**, в.10, с. 822-825 (1993).
14. В.А. Березовец, Ю.Б. Лянда-Геллер, А.О. Смирнов, И.И. Фарбштейн. Слабая локализация 2D дырок на поверхности $(10\bar{1}0)$ теллура при низких температурах. 1-я Российская конференция по физике полупроводников, Н.Новгород, Тезисы докладов. Т.1, с.95 (1993).
 15. В.А. Березовец, А.О. Смирнов, И.И. Фарбштейн, М.Л. Шубников. Слабая локализация 2-D дырок на поверхности (1010) теллура при низких температурах. 30-е совещание по физике низких температур Дубна, Тезисы докладов. Ч.2, с.203 (1994).
 16. В.А. Березовец, А.О. Смирнов, И.И. Фарбштейн, Д. Шнайдер. Спектроскопия размерно-квантованных подзон на поверхности $(10\bar{1}0)$ теллура в условиях магнитного пробоя. //ФТТ **37**, № 5, 1438-1444 (1995).
 17. В.А. Березовец, И.И. Фарбштейн. Энергетический спектр 3-х и 2-мерных дырок со снятым спиновым вырождением. (Исследование теллура). Обзор. //ФТП **29**. №. 5/6. 965-993 (1995). Semiconductors **1.29**,No.5, .500-513 (1995).
 18. V.A. Berezovets, A.O. Smirnov, I.I. Farbshtein, D. Schneider. Identification of 2D holes subbands on $(10\bar{1}0)$ Te surface. //Sol. Stat. Communs. **96**, No6, 349-352 (1995).
 19. В.А. Березовец, А.О. Смирнов, И.И. Фарбштейн. "Влияние гидростатического сжатия на анизотропию спектра двумерных дырок на поверхности (0001) теллура. (Исследование эффекта слабой локализации)". 5 международный симпозиум "Неоднородные электронные состояния". Новосибирск, Тезисы докладов, с.204-205 (1995).
 20. V.A. Berezovets, I.I. Farbshtein, A.O. Smirnov. The Weak Localization of 2D Carrier with Pronounced Anisotropy (2D Holes on Different Surfaces of Tellurium). 2nd International Conference "Physics of low-dimensional structures-2". Dubna, Russia, Abstracts, p. 73 (1995).

21. V.A. Berezovets, I.I. Farbshtein, A.O. Smirnov. The Weak Localization of 2D Carrier with Pronounced Anisotropy (2D Holes on Different Surfaces of Tellurium). //Phys. Low-Dim. Struct. **12**, 301-304 (1995).
22. В.А. Березовец, А.О. Смирнов, И.И. Фарбштейн, Д. Шнайдер Идентификация 2D-подзон на поверхности $(10\bar{1}0)$ теллура. 2-ая Российская конференция по физике полупроводников. Зеленогорск, Тезисы. т.2, с.38 (1996).
23. V.A. Berezovets, A.O. Smirnov, I.I. Farbshtein, D. Schneider. Das Energiespektrum des zweidimensionalen Systems von Lochern auf der $(10\bar{1}0)$ -Oberfläche von Tellur. Wiss. Ber.HMFA Braunschweig **12**, №55, s.55-57 (1991/92).
24. V.A. Berezovets, D. Schneider. Einfluß von hydrostatischem Druck auf die kinetischen Eigenschaften des zweidimensionalen Systems von Loch-Ladungen auf $(10\bar{1}0)$ -Oberfläche von Tellur. Wiss. Ber. HMFA Braunschweig **13**, № 63 (1993/94).
25. В.А. Березовец, А.О. Смирнов, И.И. Фарбштейн, М.Л. Шубников. Слабая локализация 2D-дырок на поверхности (0001) теллура в условиях гидростатического сжатия. //ФТТ, **39**, № 3, 568-572 (1997).
26. N.S. Averkiev, G.E. Pikus, V.A. Berezovets, I.I. Farbshtein. PECULIARITIES OF THE WEAK LOCALISATION OF THE 2D HOLES IN THE QUANTUM WELL ON $(10\bar{1}0)$ SURFACE OF TELLURIUM. Int. Simp.: Nanostructures, St.-Petersburg, Proceedings, p. 498, (1997).
27. Н.С. Аверкиев, В.А. Березовец, И.И. Фарбштейн, Г.Е. Пикус, Н.И. Саблина. Квантовые поправки к проводимости 2D дырок в квантовой яме на кристаллографической поверхности теллура $(10\bar{1}0)$. //ФТТ **40** № 8, 1554-1558 (1998).
28. N.S. Averkiev, V.A. Berezovets, I.A. Bepalov, I.I. Farbshtein, G.E. Pikus, N.I. Sablina. WEAK LOCALIZATION UNDER SPECIAL t-SYMMETRY

- CONDITION.(2D- AND 3D- HOLES IN TELLURIUM). Int. Conf. Physics at the turn of the 21st century. St. Petersburg , Summaries, p.53 (1998).
29. В. А. Березовец , И. И. Фарбштейн, Д. Шнайдер. Обнаружение комбинированных частот спектра осцилляций Шубникова -де Гааза в квазидвумерном аккумулярующем слое (2D дырки на поверхности скола теллура). XXXI Совещание по физике низких температур, Москва, Тезисы,с. 62 (1998).
 30. В.А. Березовец, В.Н. Богомолов, Р.В. Парфеньев, И.И. Фарбштейн. Низкотемпературные квантовые явления в пространственно модулированном кластерном теллуре. XXXI Совещание по физике низких температур. Москва, Тезисы, с.60 (1998).
 31. В. А. Березовец , И. И. Фарбштейн, Д. Шнайдер. Особенности спектрального состава осцилляций магнетопроводимости двумерного аккумулярующего слоя на поверхности теллура $(10\bar{1}0)$ //ФТТ **41**, № 3, 537-539 (1999).
 32. Н.С. Аверкиев, В.А. Березовец. Н.И. Саблина, И.И. Фарбштейн. Слабая локализация в условиях особой роли t-симметрии. (2D- и 3D-дырки в теллуре). //ФТТ, **41**, №. 5, 879- 881 (1999).
 33. Н.С. Аверкиев, В.А. Березовец, Л.Е. Голуб, С.А. Тарасенко, И.И. Фарбштейн. Д. Шнайдер. Эффект Шубникова -де Гааза в квазидвумерных системах в условиях сильного межподзонного рассеяния. IV Российская конференция по физике полупроводников, Новосибирск, Тезисы с.174 (1999).
 34. В. А. Березовец, В. Н. Богомолов, И. И. Фарбштейн. Низкотемпературные квантовые явления в пространственно модулированном кластерном кристалле теллура. IV Российская конференция по физике полупроводников, Новосибирск, Тезисы, с.180 (1999).
 35. В.А. Березовец , В.Н. Богомолов, И.И. Фарбштейн, В.И. Нижанковский. Низкотемпературная электропроводность пространственно модулирован-

ного кластерного кристалла теллура. НТ-32 Казань, Тезисы докладов секции NS, с. 63-64 (2000).

36. В.А. Березовец, В.Н. Богомолов, И.И. Фарбштейн, В.И. Нижанковский. Электрические свойства кластеров теллура в подрешетке пустот кристаллов опала. Роль интерфейса $\text{Te} - \text{SiO}_2$. //ФТТ **44**, №.9, 1695-1699 (2002).
37. V.A. Berezovets, V.N. Bogomolov, I.I. Farbstein, and Nizhankovskii. Interface phenomenon effect on the electrical properties of the Tellurium nanocluster crystals in the opal host. RUSSIA, St. PETERSBURG, PROCEEDINGS of 11th International Symposium NANOSTRUCTURES: PHYSICS AND TECHNOLOGY 396-397 (2003).
38. Н.С. Аверкиев, В.Н. Богомолов, Березовец В.А., Нижанковский В.И. Романов К.С., Фарбштейн И.И. Квантовый транспорт в новом нанобъекте: внутренний интерфейс теллур-матрица. //ФТТ **48**, №12, 2204-2207 (2006).
39. N.S. Averkiev, V.N. Bogomolov, V.A. Berezovets, K.S. Romanov and I.I. Farbstein. Spin-dependent phenomena in new nanoobject – 2d layer on the internal interface Te-SiO_2 . RUSSIA, St. PETERSBURG, PROCEEDINGS of 14th International Symposium NANOSTRUCTURES: PHYSICS AND TECHNOLOGY 53-54 (2006).

Список цитируемой литературы.

1. Цидильковский И.М. Зонная структура полупроводников. М., Наука, 141, (1978).
2. Носкин В.А., Фарбштейн И.И., Шалыт С.С., Гальваномагнитные свойства теллура при сверхнизких температурах. // ФТТ **10**, в.4, 1112-1117, (1968).
3. Е.Л. Ивченко, Г.Е. Пикус. НОВЫЙ ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ГИРОТРОПНЫХ КРИСТАЛЛАХ. //Письма в ЖЭТФ **27**, 640-643, (1978).
4. Р.А. Ченцов. Об изменении электрического сопротивления теллура в магнитном поле при низких температурах. //ЖЭТФ **18**, в.4, 374-385, (1948).
5. Парфеньев Р.В., Погарский А.М., Фарбштейн И.И., Шалыт С.С. Гальваномагнитные свойства теллура. Структура валентной зоны. //ФТТ **4**, в 12, 3596-3611, (1963).
6. von Klitzing K., Landwehr G. Surface quantum states in tellurium. //Sol. State Communs. **9**, No.24, 2201-2205 (1971).

7. Ando T. Theory of quantum transport in a two-dimensional electron system under magnetic fields. IV. Oscillatory conductivity. //Journ. Phys. Soc. Japan **37**, No5, 1233-1237 (1974).
8. В.А. Березовец, И. И. Фарбштейн, А.Л. Шеланков. Слабая локализация в условиях снятого спинового вырождения (двумерный слой на поверхности теллура). //Письма в ЖЭТФ **39**, №. 2, 64-66 (1984).
9. Н.С. Аверкиев, Г.Е. Пикус, Слабая локализация носителей тока на поверхности теллура и отрицательное магнетосопротивление. //ФТТ **38**, в.6 , 1748-1762 (1996).
10. Н.С. Аверкиев, Г.Е. Пикус, Слабая локализация носителей тока на поверхности $(10\bar{1}0)$ теллура. // ФТТ **39**, в.9, 1659-1664 (1997).
11. Н.С. Аверкиев, В.А. Березовец, И.И. Фарбштейн, Г.Е. Пикус, Н.И. Саблина. Квантовые поправки к проводимости 2D дырок в квантовой яме на кристаллографической поверхности теллура $(10\bar{1}0)$. //ФТТ **40** в.8, 1554-1558 (1998).
12. Н.С. Аверкиев, В.А. Березовец, Н.И. Саблина, И.И. Фарбштейн. Слабая локализация в условиях особой роли t -симметрии ($2D$ - и $3D$ - дырки в теллуре). //ФТТ **41**, в.5, 879-881 (1999).
13. Б.Л. Альтшулер, А.Г. Аронов, А.И. Ларкин, Д.Е. Хмельницкий. Об аномальном магнетосопротивлении в полупроводниках. //ЖТЭФ **81**, №.2(8), 768-783, (1981).
14. Becker W., Funs W., Stuke J. Influence of hydrostatic pressure on the electrical conductivity of tellurium single crystals. //Phys. Stat. sol. (b) **44**, No 1, 147-154 (1971).
15. Fukuda S, Karasaki T., Shiosaki T., Kawabata A. Photoelasticity and acousto-optic diffraction in piezoelectric semiconductors. //Phys. Rev. B **20**, No.10, 4109-4119 (1979).
16. В.Н. Богомолов, Л.М. Сорокин, Д.А. Курдюмов, Т.М. Павлова, Дж. Хатчисон. Сравнительное изучение с помощью просвечивающей электронной микроскопии трехмерной решетки из нанокластеров теллура, полученной различными способами в опаловой матрице. //ФТТ **39**, в.11, 2090-2095 (1997).