

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР
ИМ. Б. И. ВЕРКИНА

На правах рукописи

КОЛОДЕНКО Виктор Алексеевич

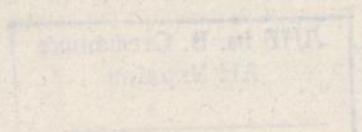
ПЕРЕНОС И ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ НАД
СВЕРХТЕКУЧИМ ГЕЛИЕМ

01.04.09 - Физика низких температур

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Харьков - 1994



7B 37.329

Диссертация является рукописью.

Работа выполнена в Физико-техническом институте низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины.

Научные руководители: доктор физико-математических наук, профессор
 В. Н. ГРИГОРЬЕВ,
 доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник
 Ю. Э. КОВДРЯ

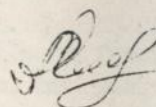
Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник
 Монарха Ю. П.
 кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник
 Карнацевич Л. В.

Ведущая организация: Харьковский государственный университет им. А. М. Горького

Защита состоится "13" декабря 1994 г. в 15⁰⁰ на заседании Ученого специализированного совета К 016.27.02 при Физико-техническом институте низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины (310164, г. Харьков, пр. Ленина, 47).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технического института низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины.

Ученый секретарь
 Специализированного
 ученого совета К 016.27.02
 кандидат технических наук

 (А. М. Кислов)

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00777243 (U)

Стефаніка
 Київ

Общая характеристика работы.

Актуальность проблемы. Поверхностные электроны (ПЭ) представляют собой слой электронов, локализованных на макроскопическом расстоянии от поверхности диэлектрика с малой диэлектрической проницаемостью (ϵ) и отрицательным сродством к электрону (гелий, водород и неон, а также твердые диэлектрики с относительно большой ϵ , покрытые сверхтекучей гелиевой пленкой). ПЭ над жидким гелием обладают уникальными свойствами, исследование которых впервые теоретически провел Шикин и независимо от него Коул и Коэн (1971г.). В плоскости поверхности гелия электроны формируют практически идеальную двумерную неразрушенную электронную систему, подчиняющуюся бoльцмановской статистике. В направлении, перпендикулярном поверхности, энергетический спектр электронов является водородоподобным с энергией в основном состоянии ~ 8 К. При определенном соотношении кулоновской энергии взаимодействия электронов и кинетической в системе ПЭ может иметь место инверсионная кристаллизация. Максимальная концентрация ПЭ ограничена величиной $2 \cdot 10^{10}$ см⁻², что связано с развитием нестабильности заряженной поверхности гелия. Перенос ПЭ над жидким гелием определяется взаимодействием электронов с атомами гелия в паре и с риплонами. Подвижность электронов достигает при низких температурах рекордного для двумерных электронных систем значения - до 10^7 см²/В·с. Чистота гелиевой подложки, возможность достаточно точного теоретического описания ПЭ, наряду с возможностью варьирования в широких пределах концентрации и параметров связи электронов с подложкой делают ПЭ практически идеальной моделью для исследования фундаментальных принципов теории электронного газа низкой плотности и физики низкоразмерных систем.

ПЭ над гелием во многом подобны инверсионным и аккумуляционным слоям и гетероструктурам, выполненным на полупроводниковой основе, и могут рассматриваться как подходящий физический объект, позволяющий моделировать подобные системы в условиях малой плотности носителей.

Привлекательными с точки зрения повышения предельной концентрации являются ПЭ над твердой подложкой, покрытой сверхтекучей гелиевой пленкой, поверхность которой стабилизируется силами Ван-дер-Ваальса. Представляет также интерес исследование переноса ПЭ в условиях различной степени локализации при варьировании параметров подложки и толщины гелиевой пленки на ней.

Всеобразие системе ПЭ над жидким гелием придает магнитное поле,

перпендикулярное поверхности. Уже в небольших полях электронный спектр в плоскости поверхности оказывается дискретным и реализуется, так называемый, ультраквантовый предел. Исследования магнитопереноса в области риплонного рассеяния привели к обнаружению немонотонных зависимостей от температуры продольного (ρ_{xx}) и поперечного (ρ_{xy}) сопротивления [1]. Строгое количественное сравнение теории и эксперимента затрудняется тем, что теоретически пока не получены прямые температурные зависимости ρ_{xx} и ρ_{xy} и отсутствует общепризнанная процедура получения абсолютных значений этих величин из непосредственно измеряемых параметров. В этой связи особый интерес представляют непосредственные измерения продольной магнитопроводимости (σ_{xx}). Магнитное поле может способствовать локализации ПЭ, что отражается на характере их переноса, и в этом смысле исследования σ_{xx} представляют дополнительный интерес.

Для физики низкоразмерных систем весьма существенным является возможность реализации одномерной ситуации на ПЭ.

Целью настоящей работы является экспериментальное изучение явления переноса и локализации ПЭ в следующих условиях: над сверхтекучей гелиевой пленкой, покрывающей поверхность твердого диэлектрика; в квантующих магнитных полях; в условиях одномерной электронной системы.

На защиту выносятся следующие основные положения.

Результаты измерений высокочастотной проводимости и подвижности поверхностных электронов над гелиевой пленкой, позволившие сделать вывод о локализации электронов над неоднородностями потенциала диэлектрической подложки, вызванными дефектами и шероховатостями.

Экспериментальное обнаружение новых связанных электронных состояний - диплонов: электронов на гелиевой пленке, локализованных над положительными ионами, сцепленными с подложкой.

Результаты измерений в квантующем магнитном поле продольной магнитопроводимости ПЭ над жидким гелием, включая и область электронного кристалла, позволившие установить аномальный характер поведения этой величины в риплонной области рассеяния.

Экспериментальная реализация квазиодномерной электронной системы над жидким гелием и результаты измерения проводимости системы.

Результаты и выводы работы могут оказаться важными как для интерпретации аналогичных исследований, так и для уточнения представления о классических и квантовых свойствах ПЭ при различных услови-

ях, приводящих к их локализации. Результаты могут быть использованы: в физике низких температур при исследовании объемных и поверхностных свойств квантовых жидкостей и кристаллов; в электронике для моделирования двумерных заряженных систем; в физике твердого тела при анализе поверхностей тел с целью выяснения структуры их потенциального рельефа. Вышеперечисленное обуславливает научную и практическую ценность диссертации.

Апробация результатов исследования по теме диссертации в форме докладов и обсуждения проводилась на: 22-м (Кишинев, 1982) и 29-м (Казань, 1992) Совещании по физике низких температур, 21-я Международной конференции стран - членов СЭВ по физике и технике низких температур (Варна, 1983), Советско-Германском симпозиуме "Физика сверхнизких температур" (Алушта, 1991).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 16 работ, основное содержание которых отражено в (5 - 9, 13).

Диссертационная работа изложена на 116 листах машинописного текста, включая 22 рисунка, и имеет следующую структуру.

В главе 1 приводится обзор исследования основных свойств ПЭ, близких к теме данной диссертации.

Глава 2 посвящена экспериментальному исследованию ПЭ над сверхтекучей гелиевой пленкой, покрывающей твердый диэлектрик с достаточно большой диэлектрической постоянной. Здесь также описываются исследования диплонной системы: электронов на гелиевой пленке, локализованных над положительными ионами, сцепленными с подложкой.

В главе 3 изложены материалы исследования транспортных свойств ПЭ над жидким гелием в квантующих магнитных полях, перпендикулярных поверхности. При этом анализируются возможные эффекты влияния локализации носителей в магнитном поле на кинетические свойства электронов.

Реализация и результаты исследования проводимости квазиодномерной электронной системы над жидким гелием описаны в главе 4.

Основные итоги работы и сделанные на их основании выводы приведены в "Заключении".

Основная часть.

В первой главе приводится обзор литературы по теме исследования. Как известно в потенциальной яме, образованной небольшим потенциалом сил изображения и относительно большим потенциальным барьером повер-

ности гелия, электрон локализуется на макроскопическом расстоянии от поверхности гелия и его состояние описывается уравнением Шредингера, аналогично уравнению для атома водорода. Среднее расстояние электрона от поверхности в основном состоянии составляет 114 Å, с энергией ~ 8 К, так что при температуре $T \leq 1$ К практически все электроны находятся на основном уровне.

При наличии прижимающего электрического поля E_{\perp} электроны деформируют поверхность жидкости, что приводит к деформационной локализации электрона с энергией локализованного состояния [2]:

$$\Delta E = - \frac{(e \cdot E_{\perp})^2}{4 \cdot \pi \cdot \sigma} \ln \left[\frac{1,06}{\alpha \cdot L_{\xi}} - 0,5 \right], \quad \text{где } L_{\xi}^2 = \frac{4 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot \hbar^2}{m (e \cdot E_{\perp})^2} \quad (1)$$

L_{ξ} - радиус локализации электрона, $\alpha = g^{1/2} \cdot (\rho/\sigma)^{1/2}$, (ρ - плотность гелия, σ - поверхностное натяжение гелия). Движение ПЭ вдоль поверхности является квазисвободным и подвижность электронов ограничивается их взаимодействием с атомами газообразного гелия (μ_g) и с риплонами (μ_r): $\mu^{-1} = \mu_g^{-1} + \mu_r^{-1}$, где

$$\mu_g = \frac{8 \cdot e}{3 \cdot \pi \cdot \hbar \cdot \sigma \cdot N \cdot \gamma}; \quad \mu_r = \frac{8 \cdot \sigma \cdot \hbar}{m \cdot e \cdot E_{\perp}^2} \quad (2)$$

σ_p - сечение рассеяния медленных электронов; N - число атомов в паре гелия на 1 см^3 ; γ - эффективный боровский радиус.

В постоянном магнитном поле H , нормальном к поверхности гелия, волновая функция электрона и длина локализации электрона есть:

$$\Psi^2(r) = \frac{1}{\pi \cdot L_H} \exp \left[- \frac{r^2}{L_H^2} \right], \quad L_H^2 = \frac{2 \cdot c \cdot \hbar}{e \cdot H} \quad (3)$$

где r - радиальная координата. В этом состоянии электрон локализуется в плоскости $z = 0$ и вырождение снимается сопутствующими деформационными явлениями. Спектр электронов представляет собой набор эквидистантных уровней (уровней Ландау), кратных циклотронной частоте $\omega_c = e \cdot H / (c \cdot m)$.

В случае ПЭ над сверхтекучей гелиевой пленкой толщиной d , покрывающей твердую подложку с диэлектрической проницаемостью ϵ_d , энергия связи электрона с поверхностью существенно увеличивается по сравнению со случаем массивного гелия. Электронный спектр при этом имеет

следующий вид [3]:

- 7 -

$$\Delta_1 = \frac{(\epsilon_d - 1) \epsilon^2}{4(\epsilon_d + 1) \cdot d} + \xi_1 \cdot \left[\frac{\hbar^2}{2 \cdot m} \right]^{1/3} (\epsilon \cdot \epsilon_d)^{2/3} \quad (4)$$

здесь ξ_1 - нули функции Эри. Поверхность стабилизируется ван-дер-ваальсовыми силами и предельно возможная концентрация ПЭ над пленкой гелия существенно выше, чем для случая массивного гелия. Связанные электронные состояния над пленкой впервые наблюдались в [4] и подвижность в этом случае оценивалась как весьма низкая.

Во второй главе описываются постановка экспериментов и результаты исследования ПЭ над пленкой гелия, смачивающей твердые диэлектрики [5 - 7]. Вследствие малой подвижности ПЭ в этом случае требовался более чувствительный метод исследования и качественно новый подход к измерениям. Эту задачу удалось решить путем применения СВЧ-резонансного метода с использованием в качестве ячейки высокодобротного сверхпроводящего резонатора (H_{011} мода колебаний) и прецизионных измерения его добротности. Диэлектрическая подложка в форме диска устанавливалась на дно резонатора или вблизи дна. Толщина гелиевой сверхтекучей пленки d задавалась разностью высот (h) между уровнями пленки на подложке и массивной жидкости ниже подложки и вычислялась по формуле $d = k \cdot h^{-1/3}$, ($k = 2,88 \cdot 10^{-6}$ см^{4/3}). Плотность электронов над пленкой определялась из условия полного насыщения заряда.

Использовался наиболее распространенный метод измерения высоких добротностей - метод декремента. Величина добротности (Q) варьировала от 10^6 до $2 \cdot 10^7$ и определялась путем измерения с помощью прецизионного куметра характерного времени переходного процесса в резонаторе. Измерения проводились на частоте 9,4 ГГц. Обработка результатов измерения основывалась на анализе СВЧ-резонансного метода исследования веществ и было получено выражение для эффективной проводимости электронного слоя в резонаторе:

$$\sigma = \Delta \left[\frac{1}{\sigma} \right] \cdot \frac{\omega \cdot l}{8 \cdot \pi \cdot \sin^2(\pi h/l)} ; \quad (5)$$

здесь h - толщина диэлектрика; l - высота резонатора. Выражение (5) не содержит подгоночных параметров и прямо связывает эффективную проводимость (подвижность) слоя ПЭ с величиной нагруженной

добротности резонатора.

Задача первой стадии экспериментальной работы заключалась в апробировании методики измерения и измерительной системы в условиях ПЭ над гелиевой пленкой и оценке по измеренным данным эффективного значения высокочастотной подвижности [5]. В качестве подложки был взят тефлон: диэлектрик, имеющий низкие диэлектрические потери, и относительно небольшую проницаемость. Источником электронов служил разряд около острия вольфрамовой иглы. Оценки с использованием выражения (1) показали, что для идеально гладкой подложки с $\epsilon_d \approx 2$ при $T \geq 1$ К электроны над насыщенными гелиевыми пленками не локализируются в плоскости поверхности и должны двигаться квазисвободно, а их подвижность должна определяться рассеянием электронов на атомах пара и риплонах. Однако, полученное в работе малое значение μ нельзя объяснить в рамках такой картины и это привело к предположению об относительно сильной локализации электронов над микроскопическими неоднородностями поверхности.

Подробные исследования переноса ПЭ на гелиевой пленке были проведены с использованием сапфировой подложки, известная микроструктура поверхности которой давала возможность точнее интерпретировать полученные результаты [6]. При толщине пленки ~ 300 Å энергия связи электрона на порядок превосходит энергию связи электрона над массивным гелием и составляет ~ 70 К. Эксперименты проводились в диапазоне температур 1,65 К - 2,14 К при концентрациях электронов до 10^{10} см $^{-2}$. Измеренные значения проводимости электронного слоя на пленке позволили получить данные об эффективной подвижности ПЭ, величина которой составила $(1-2) \cdot 10^3$ см 2 /В·с при $T = 1,7$ К, что существенно ниже значений μ для случая ПЭ над массивным гелием. Анализ значений приведенного сопротивления $\rho \Delta V$ слоя ПЭ в зависимости от плотности атомов гелия в паре N указывает на преобладающую роль атомов пара в процессах рассеяния СВЧ-энергии электронами. Объяснением малого значения μ является предположение, что из-за шероховатостей поверхности возникают вариации потенциала подложки, причем, в местах с наибольшей глубиной потенциальных ям происходит преимущественная локализация электронов. Локализация электронов сопровождается деформацией под ними жидкого гелия - образованием лунок, то есть дополнительной автолокализацией. Проводимость будет зависеть от соотношения собственной частоты колебания электрона в потенциальной яме ω_0 , частоты колебания лунки ω_α и частоты СВЧ поля ω . При $\omega_0 \gg \omega_\alpha \gg \omega$ под дейст-

нием ведущего поля будет двигаться комплекс электрон-лунка. В пределе сильной локализации электрона дополнительным диссипативным механизмом может стать взаимодействие электрона с тепловыми колебаниями массивного гелия. Анализ поверхности подложки показал, что в ее структуре имеют место выступающие кромки и пики с характерными размерами 200 - 700 Å, плотность которых составляет $\sim 10^{17}$ см $^{-2}$ и соизмерима с максимальной плотностью электронов, достигаемой в экспериментах. Величина потенциальной ямы для электрона над выступами крупных шероховатостей составляет десятки градусов, а потенциальная энергия электрона, находящегося между выступами, исходя из характерных прижимающих электрических полей E_d , составляет ~ 10 К. При небольшой концентрации электронов основная их часть расположена над выступами и характерная частота колебаний электронов поперек цепочек, соответствующая средней глубине потенциальной ямы, составляет 10^{12} Гц, что значительно выше ω_i и, следовательно, имеет место кинетический характер движения ПЭ.

В экспериментах по исследованию перехода ПЭ из локализованного в делокализованное состояние путем изменения d использовалась ситалловая подложка, имевшая

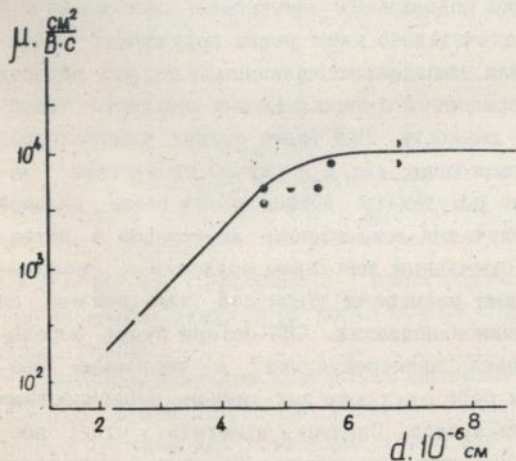


Рис. 1.

более гладкую поверхность ($\sim 1\%$). Зависимость подвижности ПЭ от толщины пленки, снятая при температуре 1,7 К и $\sigma = 2 \cdot 10^9$ см $^{-2}$ представлена на рис. 1. С ростом d от 250 Å до 800 Å величина μ изменяется от 250 до значения $\sim 1,5 \cdot 10^4$ см $^2/\text{В}\cdot\text{с}$, характерного для ПЭ над массивным гелием, выходя на насыщение при $d \approx 700$ Å. Протяженный участок зависимости при небольших d может быть аппроксимирован функцией $\mu \sim e^{\beta d}$, (β - параметр, не зависящий от d). Экспоненциальная зависимость в условиях $\omega_0 \gg \omega_i$ объяснена тем, что при увеличении толщины гелиевой пленки уменьшаются вариации

потенциала подложки, причем, при d меньших среднего расстояния между микровыступами глубина потенциальных ям уменьшается экспоненциально. Диссипация при относительно высоких температурах определяется столкновениями комплекса электрон-лунка с атомами гелия в паре. Подвижность лунки с электроном будет обратно пропорциональна N и размерам лунки, которые в свою очередь пропорциональны средней глубине потенциальной ямы. Представление дефекта на поверхности подложки в виде шара позволило получить выражение для потенциала взаимодействия электрона с дефектами в виде $\delta U \sim \exp(-\pi d/a)$. То есть β в вышеприведенном выражении есть величина π/a .

Интересной экспериментальной задачей явилось исследование свойств ПЭ над положительными ионами, сцепленными с подложкой (диплонов) [6]. Энергия связей ПЭ в поле иона и радиус локализации электрона на пленке толщиной 300 Å составляют ~ 100 К и 80 Å соответственно. Исследования проводились в диапазоне температур 1,65 К - 2,14 К при максимальных электронных и ионных концентрациях 10^{10} см^{-2} и при варьировании толщины гелиевой пленки от 200 Å до 700 Å. В качестве источника положительных ионов служил разряд около острия вольфрамовой иглы. Рассчитанная эффективная подвижность электронов составляет $\sim 70 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при 1,7 К, что значительно ниже ранее полученных значений подвижности. Температурная зависимость величины $\rho \cdot \Delta V$ в области температур 1,9 К - 2,1 К коррелирует с зависимостью плотности тепловых возбуждений сверхтекучей жидкости. При более низких температурах зависимость $\rho \cdot \Delta V$ от T менее выражена (как и в случае отсутствия заряда на подложке). Полученные результаты объясняются более сильной по сравнению с предыдущими случаями локализацией электронов в потенциальных ямах, образованных суммарным действием подложки и положительных ионов, а также большими размерами лунок под электронами по сравнению со случаем незаряженной подложки. СВЧ-потери будут определяться взаимодействием комплекса "электрон-лунка" с тепловыми возбуждениями жидкости, атомами пара, а также затуханием поверхностных волн, возбуждаемых движущейся лункой. Следует отметить, что, поскольку период колебания лунки под действием ВЧ поля составляет 10^{-10} с, процессы рассеяния носят кинетический характер.

В третьей главе рассматривается перенос поверхностных электронов над жидким гелием в магнитном поле H , перпендикулярном поверхности [а, 9]. Исследования продольной магнитопроводимости (σ_{xx}), проводились на частотах $f = 5 - 30$ кГц в области температур 0,5 К - 1,8 К и

магнитных полях до 2.5 Т. Концентрация электронов n составляла $(1-9) \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$. Исследования включают также и область существования вигнеровского кристалла.

Продольная магнитопроводимость определялась по измеренному сдвигу фазы сигнала, прошедшего через ячейку с ПЭ. Использовалась ячейка круговой геометрии. Поверхность жидкого гелия располагалась между верхним и нижним плоскими круговыми электродами. Последний представлял собой диск Corbino и являлся измерительным электродом. Для установления связи измеряемой величины $\Delta\varphi(0)$ с продольной проводимостью ПЭ в магнитном поле были проведены расчет измеряемого тока и калибровочные измерения. Для данной геометрии электродов

$$b \times 10^7 \text{ Ом}^{-1}$$

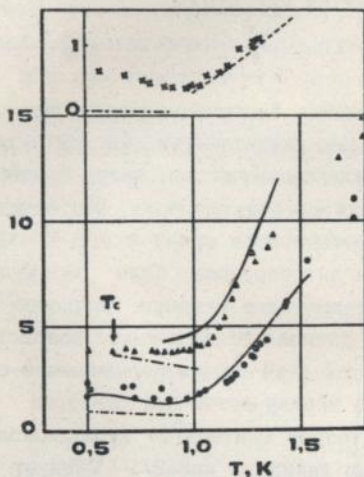


Рис. 2.

$n = 8,9 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ значения σ_{xx} практически не зависят от T . Температура минимума лежит в области 0,85 К - 1,05 К и слегка зависит от концентрации.

Экспериментальные результаты интерпретируются следующим образом. Известно, что в отсутствие магнитного поля время релаксации электронной системы при взаимодействии с атомами гелия в первом приближении не зависит от энергии, а в области риплонного рассеяния такая зависимость имеет место и, следовательно, влияние магнитного поля на величину σ_{xx} оказывается различным в этих двух областях. В области газового рассеяния в слабых магнитных полях, когда $\hbar\omega_c \ll kT$, измене

выполнялось соотношение $\tau_g(\Delta\varphi) \approx 1,7 \cdot f / \sigma_{xx}$. На рис. 2 приведена температурная зависимость σ_{xx} для различных концентраций ПЭ: 10^8 см^{-2} (обозначенная \times); $4 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ (обозначенная \bullet); и $8,9 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ (обозначенная Δ). $H = 4,26 \text{ кЭ}$. Характерное для газовой области рассеяния уменьшение σ_{xx} при понижении температуры сменяется в риплонной области слабым возрастанием, а для

ние характеристик переноса обусловлено в основном динамическими причинами: действием силы Лоренца, приводящей к новым особенностям в кинетических процессах. В этом случае продольная проводимость может быть представлена соотношением $\sigma_{xx} = \sigma_0 / (1 + \mu_0^2 H^2 / c^2)$, (здесь σ_0 и μ_0 - проводимость и подвижность электронов в нулевом магнитном поле). Следует отметить, что найденные значения μ_0 оказались ниже литературных данных приблизительно в 1,5 раза. При увеличении магнитного поля зависимости $\sigma_{xx}^{-1}(H)$ отклоняются от классического поведения и при $\hbar\omega_c \gg kT$ происходит переход к квантовому режиму переноса. В предположении, что электроны подчиняются бoльцмановской статистике и имеет место короткодействующий потенциал взаимодействия электронов с атомами гелия в паре, σ_{xx} определяется как [10]:

$$\sigma_{xx} = \frac{2 \cdot c \cdot \text{cth}(\hbar\omega_c / 2kT)}{\pi \cdot T \cdot I_1(\Gamma/kT)} [\text{ch}(\Gamma/kT) - \frac{kT}{T} \text{sh}(\Gamma/kT)] \frac{n \cdot e}{c \cdot H} \quad (7)$$

Здесь I_1 - модифицированная функция Бесселя первого порядка, $\Gamma = \hbar(2\omega_c / \pi\tau)^{1/2}$ - ширина уровня Ландау. Вычисленная по (7) подвижность оказалась на 20% ниже, чем в нулевом магнитном поле. В эксперименте отмечалось малое влияние электрон-электронного взаимодействия на кинетические свойства ПЭ в магнитном поле при $T \geq 1,5$ К. В области риплонного рассеяния теория магнитопереноса была развита Монарха [11], в которой установлено определяющее влияние риплонов с длиной волны, соизмеримой с магнитной длиной. Обнаруженное возрастание σ_{xx} с уменьшением температуры находится в качественном согласии с теорией, а при $n \geq 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ имеет место и количественное согласие (на рис. 2 сплошными линиями). Расчет по теории Сайто [12] хуже описывает полученные данные (штрих-пунктирные линии на рис. 2). Следует отметить, что рассмотренные двухриплонные процессы диссипации практически не сказываются на магнитопереносе ПЭ, а учет механизма влияния на электрон-риплонное рассеяние взаимодействия между электронами, обусловленного наличием флуктуирующего поля, дает вклад в величину σ_{xx} приблизительно в 8 раз меньшую, чем экспериментальные значения.

Полученные в работе экспериментальные данные по электронному кристаллу [9], как и данные других экспериментальных работ свидетельствуют об отсутствии большого различия между характеристиками магнитопереноса выше и ниже температуры плавления, что может быть связано с тем, что магнитное поле обеспечивает достаточно высокую степень локализации электронов, на фоне которой

дополнительная локализация в решетке мало сказывается на процессах переноса. Теоретически рассмотренные в теории Сайто эти зависимости отличаются существенно.

Использование ранее полученных экспериментальных данных о ρ_{xx} и ρ_{xy} для расчета σ_{xx} по соотношению $\sigma_{xx} = \rho_{xx}/\rho_{xy}^2$ даст значения σ_{xx} , совпадающие в пределах погрешностей измерений с найденными в настоящей работе. Исходя из этого можно говорить о самосогласованности данных, полученных в различных экспериментах.

В четвертой главе описаны опыты по реализации квазиодномерной электронной системы на ПЭ и приведены предварительные результаты этих опытов [13]. Для обеспечения одномерности использовались искривления поверхности жидкого гелия, затекающего под действием сил поверхностного натяжения на высоту h в каналы профилированной подложки и образующего желобки радиусом R . Эксперименты проводились на частоте 1,1 МГц при температуре 1,5 К и концентрациях электронов до $1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Использовался метод измерений и измерительная система, применявшаяся при исследованиях продольной магнитопроводимости. Фаза прошедшего через ячейку сигнала измерялась для двух случаев: либо когда электроны под действием ведущего электрического поля движутся вдоль желобков (φ_{\parallel}), либо в перпендикулярном желобкам направлении

(φ_{\perp}). Сдвиг фаз, обусловленный сопротивлением слоя электронов R_e , связанного емкостным образом (емкость C) с измерительными электродами, определялся как $\varphi = (\omega \cdot R_e \cdot C)^{-1}$. Зависимости сдвига фазы сигнала от прижимающего потенциала V_{\perp} приведены на рис. 3. (пары кривых 1, 2 и 3, 4 соответствуют φ_{\parallel} и φ_{\perp} при $h=0,4$ см и 0,5 см, а кривые 5 и 6 соответствуют зависимостям η_{\parallel} и φ_{\perp} при тонком слоем гелия на подложке).

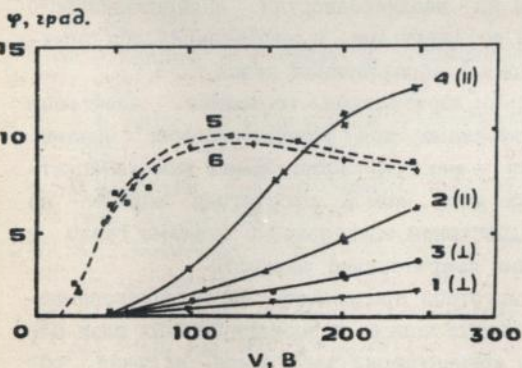


Рис. 3.

Как видно из рисунка, имеет место существенная

анизотропия проводимости электронного слоя вдоль и поперек бороздок.

Результаты объяснены следующим образом. Из-за шероховатостей подложки потенциальные ямы над гребнями решетки составляют до 10^2 К, а для электронов в центре желобка $\sim 4,5$ К с величиной $\hbar \cdot \omega_0 \sim 0,1$ К (ω_0 - характерная частота осцилляционного спектра). Однородность энергии связи электрона с подложкой вдоль желобка обеспечивается постоянством R . При малых плотностях электроны локализируются над выступами решетки, а при достаточно больших, когда кулоновское взаимодействие становится существенным, электроны появляются в желобках. Поскольку $\hbar \cdot \omega_0 \ll kT$, то электроны должны занимать достаточно высокие энергетические уровни, что не позволяет данную электронную систему считать строго одномерной. Перенос ПЭ в направлении бороздок определяется проводимостью электронов, находящихся над кромками решетки и являющейся относительно малой величиной, и проводимостью в желобках, дающей преобладающий вклад. По оценкам, отношение μ электронов для квазиодномерной и двумерной систем составило 0,42. Различие может быть обусловлено поляронным эффектом.

Основные результаты и выводы.

В области газового рассеяния исследованы зависимости подвижности ПЭ над твердым диэлектриком, покрытым сверхтекучей гелиевой пленкой. Малое значение μ и характер ее поведения объяснены относительно сильной локализацией электронов на неоднородностях поляризационного потенциала подложки, вызванных ее дефектами, и деформацией под электронами поверхности жидкого гелия - образованием лунок.

Обнаружен новый тип связанных электронных состояний: электроны на сверхтекучей пленке, локализованные над положительными ионами, сцепленными с твердой подложкой - диплоны. Эффективная высокочастотная подвижность электронов здесь ниже, чем в отсутствие заряда на подложке и определяется взаимодействием электронов с атомами гелия в паре и с тепловыми возбуждениями сверхтекучей жидкости.

Проведены измерения низкочастотной продольной магнитопроводимости ПЭ над жидким гелием в магнитных полях, перпендикулярных слою ПЭ, в широкой области температур и концентраций электронов, включая область электронного кристалла. В области газового рассеяния наблюдается хорошее согласие эксперимента с теорией магнитопереноса, однако при достаточно высоких температурах эффективное время релаксации электронной системы ниже аналогичной величины в нулевом магнитном

поле, что вызвано, по-видимому, образованием полярона.

Обнаруженное в области риплонного рассеяния возрастание продольной магнитопроводимости с уменьшением температуры (при $T \leq 1$ К) находится в согласии с теорией Монарха. Образование электронного кристалла не приводит к существенному изменению σ_{xx} , что объяснено дополнительной более сильной локализацией ПЭ в магнитном поле.

Реализована квазиодномерная электронная система для ПЭ путем заряжения электронами полосок жидкого гелия, затекающего под действием сил поверхностного натяжения в параллельные канавки профилированной диэлектрической подложки. Исследованы низкочастотные транспортные свойства ПЭ и наблюдается значительная анизотропия проводимости электронов вдоль и поперек каналов подложки. Значение подвижности ПЭ вдоль каналов несколько ниже, чем в двумерном случае ПЭ над жидким гелием и, возможно, обусловлена поляронным эффектом

Литература.

1. В. Н. Григорьев, О. И. Киричек, Ю. З. Ковдря, Ю. П. Монарха, ФНТ, 1990, 16, №3, 394.
2. Шикин В. Б., Монарха Ю. П., Двумерные заряженные системы в гелии. М. Наука. 159 с.
3. Ю. П. Монарха, В. Б. Шикин, ФНТ, 1982, 8, №6, 563-600.
4. А. С. Рыбалко, Ю. З. Ковдря, ФНТ, 1975, 1, №8, 1037-1043.
5. В. И. Карамушко, Ю. З. Ковдря, Ф. Ф. Менде, В. А. Николаенко, ФНТ, 1982, 8, №2, 219-222.
6. Ю. З. Ковдря, Ф. Ф. Менде, В. А. Николаенко, ФНТ, 1984, 10, №11, 1129-1140.
7. Ф. Ф. Менде, Ю. З. Ковдря, В. А. Николаенко, ФНТ, 1985, 11, №6, 646-650.
8. Ю. З. Ковдря, В. А. Николаенко, О. И. Киричек, В. Н. Григорьев, ФНТ, 1992, 18, №7, 673-678.
9. Yu. Z. Kovdrya, V. A. Nikolayenko, O. I. Kirichek, S. S. Sokolov, and V. N. Grigor'ev, J. Low Temp. Phys., 1993, 21, №5/6, 371-389.
10. R. W. van der Heijden, H. M. Gijssman, and F. M. Peeters, J. Phys. C, 1988, 21, №3, L1165-L1171.
11. Ю. П. Монарха, ФНТ, 1991, 17, №2, 146-151.
12. M. Saito, 1984, 52, №1, 63-65.
13. Ю. З. Ковдря, В. А. Николаенко, ФНТ, 1992, 18, №11, 1278-1280.
14. Ю. З. Ковдря, Ю. П. Монарха, ФНТ, 1985, 12, №10, 1011-1015.

Abstract. Nikolaenko Viktor Alekseevich.

surface electron over superliquid helium.

The thesis is presented for the degree in Physics and Mathematics on speciality 01.04.09. - Low temperature physics B.Verkin Institute for Low temperature physics and engineering. National academy of science of Ukraine, Kharkov, 1994.

12 scientific works a defended which contain the experimental dates of kinetic properties of surface electrons (SE) at different condition of localization. The mobility SE on helium film covering dielectric is few orders lower then that for bulk helium, due to strong localization of electrons both the roughnes of the substrate and implanted positive ions. The temperature dependence of conductivity SE in magnetic field is studied which in good agreement with theoretical calculation taking into account the quantum nature of electron-ripilon interaction. The significant anisotropy of conductivity SE is established in quasi-one-dimensional system realized by using the curved surface of helium flowing into grooves of on diffraction grating.

Анотация. Николаенко Виктор Алексеевич. "Перенос и локализация поверхностных электронов над сверхтекучим гелием"

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.09. - Физика низких температур, физико-технический институт низких температур им. Б.И.Веркина НАН Украины, Харьков, 1994.

Защищается 12 научных работ, содержащих экспериментальные данные о кинетических свойствах поверхностных электронов (ПЭ) в различных условиях их локализации. Установлено: подвижность ПЭ над гелиевой пленкой, покрывающей диэлектрик на несколько порядков меньше, чем над массивным гелием, вследствие сильной локализации ПЭ над неоднородностями подложки или положительными зарядами на ее поверхности; найденные особенности температурной зависимости проводимости ПЭ в магнитном поле хорошо согласуются с теоретическими расчетами, учитывающими квантовую природу электрон-риплонного взаимодействия; наличие существенной анизотропии проводимости ПЭ в квазиодномерной системе, реализованной над слоями гелия в каналах дифракционной решетки.

Ключевые слова: рухливість, квантовий перенос, полярон, провідність.

Ответственные за выпуск - канд. ф.-м. н. Зуев Н.В.

Подписано к печати 01.11.94. Физ. п. л. 1.

учет. изд. л. 1, заказ № 52, тираж 100 экз.

Ротапринт ФТИИТ НАН Украины, 310164, Харьков-164, пр. Ленина, 47.