

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

На правах рукописи
УДК 532.48

КОВДРЯ Юрий Захарович

ОБЪЕМНЫЕ И ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЗАРЯДЫ В ЖИДКОМ ГЕЛИИ

ОІ.04.09 - Физика низких температур

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Харьков - 1993

76 27 183

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

Официальные оппоненты: академик АН Украины, профессор
В.Г. Манжелей
доктор физико-математических наук,
профессор М.И. Каганов
доктор физико-математических наук,
профессор Б.Я. Сухаревский

Ведущая организация: Институт физики твердого тела АН
России.

Защита состоится "4" мая 1993 г.

в 15 часов на заседании Специализированного Совета Д.016.27.01 при Физико-техническом институте низких температур им. Б.И. Веркина АН Украины в помещении института по адресу:
ЗИО164, Харьков, проспект Ленина, 47.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИИТ АН Украины.

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00803074 (M)

Автореферат разослан "2" апреля 1993 г.

Ученый секретарь Специализированного Совета
кандидат физико-математических наук

Е.Н. Хацько

Хацько
ЛННБ ім. В. Стефаніка
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В изучении свойств жидкого гелия, которое особенно интенсивно ведется со времени открытия сверхтекучести, достигнуты большие успехи. Установлен спектр его элементарных возбуждений, и показано, что этот спектр приводит к появлению сверхтекучести, полно изучены гидродинамические и кинетические свойства, подробно рассмотрены различные виды звуковых колебаний в жидком гелии. Детальному теоретическому и экспериментальному анализу были подвергнуты свойства растворов ^3He - ^4He , особенно интересные при низких температурах, где, как известно, примесь ^3He , растворенная в сверхтекучем ^4He , образует ферми-жидкость.

При достаточно низких температурах жидкий ^3He также переходит в сверхтекучее состояние, свойства которого во многом отличаются от сверхтекучего состояния ^4He .

Детальные исследования сверхтекучести квантовых жидкостей существенно обогатили наши представления о физике конденсированного состояния.

В изучении свойств сверхтекучего гелия важное место занимают исследования поведения положительных и отрицательных ионов, которые дают возможность изучать эту квантовую жидкость как проводящую среду, исследовать процессы, происходящие в ней на элементарном, микроскопическом уровне.

Уже первые исследования свойств заряженных частиц в жидком гелии показали существенную роль поверхностей раздела различных фаз: жидкость-пар или поверхность расслоившихся растворов ^3He - ^4He . Заряды задерживаются такими поверхностями, и с помощью соответствующим образом направленных электрических полей можно заряжать указанные поверхности раздела. Как оказалось, наиболее интересными свойствами обладает заряженная электронами поверхность жидкого гелия. Локализованные над жидким гелием электроны были названы поверхностными электронами: они движутся квазисвободно вдоль поверхности жидкости, в направлении же перпендикулярном поверхности их движение квантованно.

Система поверхностных электронов над жидким гелием является одной из самых "чистых" двумерных систем. Ее исследование позволяет с одной стороны изучать свойства поверхности жидкого гелия, а с другой стороны - характеристики непосредственно

самой электронной системы.

Диссертационная работа посвящена исследованию поведения зарядов в жидком гелии: ионов в объеме жидких растворов ^3He - ^4He и электронов, локализованных над поверхностью сверхтекучего гелия.

С помощью внешних электрических полей ионы можно привести в движение относительно нормальной компоненты сверхтекучего гелия. Возникает интересная задача исследования явления переноса заряженных частиц в сверхтекучем гелии, изучения явлений, связанных с движением ионов в квантовой жидкости. Особое место в этом круге вопросов занимает изучение поведения заряженных частиц в сверхтекучих растворах ^3He - ^4He , поскольку наличие примеси должно существенно повлиять на характер кинетических процессов.

Не менее интересная информация о свойствах сверхтекучего гелия, в частности, его поверхности может быть получена с помощью исследования поверхностных электронов (ПЭ). Исследования свойств ПЭ, проводившиеся в данной работе, были начаты сразу после появления теоретических работ, в которых предсказывалось существование ПЭ и вычислялся энергетический спектр. Интерес к исследованиям поверхностных электронов обусловлен тем, что данная система является одной из самых простых двумерных систем. Это позволяет произвести количественное сравнение результатов эксперимента с теоретическими расчетами и тем самым проверить реалистичность различных моделей. Эксперименты с ПЭ дают возможность детальным образом исследовать такие свойства поверхности квантовой жидкости (например, связанные с диссипативными явлениями), которые не могут быть изучены другими способами. Наконец, представляет интерес исследования непосредственно самой двумерной электронной системы, являющейся своеобразным примером однокомпонентной плазмы, характеристики которой определяются как кулоновским взаимодействием между частицами, так и во многом свойствами поверхности жидкого гелия.

Все изложенные выше обстоятельства определяют актуальность экспериментального изучения поведения заряженных частиц в жидком гелии как в объеме, так и вблизи его поверхности.

Целью настоящего исследования является:

I. Экспериментальное изучение особенностей поведения ионов в жидких растворах ^3He - ^4He .

2. Исследование кинетических свойств и коллективных эффектов в двумерном слое электронов, локализованных над поверхностью жидкого ${}^4\text{He}$.

3. Изучение возможностей реализации, а также перспектив исследования свойств различных низкоразмерных электронных систем в гелии, смачивающем специальным образом профилированные подложки (с целью понижения размерности системы), а также в других веществах.

Научная новизна и достоверность результатов. Большинство научных результатов, составляющих основу работы, получено впервые. Среди результатов следует отметить получение новых данных о подвижности и скорости положительных и отрицательных ионов в растворах ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$, обнаружение ряда новых закономерностей, позволивших построить достаточно полную и законченную картину кинетических явлений, связанных с движением ионов в сверхтекучих жидкостях. В работе впервые было показано, что при наличии электрического поля, наклонного к поверхности раздела пар-жидкий гелий (так, что при этом появляются перпендикулярная и параллельная составляющие поля относительно поверхности жидкости), электроны движутся вдоль поверхности жидкого гелия квазисвободно, в узком слое вблизи поверхности с подвижностью, определяющейся рассеянием атомами гелия в паре. С учетом появившихся в это же время данных других работ это позволило сделать вывод о возможности существования поверхностных электронов. Был обнаружен также ряд других новых явлений: неустойчивость заряженной поверхности жидкости при большой плотности заряда, электрон-риплонное взаимодействие, наличие связанных электронных состояний, а также диплонов над гелиевой пленкой, локализация носителей в случайном потенциале над гелиевой пленкой, вигнеровская кристаллизация и существование в системе ${}^1\text{J}$ возможного перехода из газового в сильно скоррелированное жидкое состояние. Кроме того предложен новый способ реализации одномерной электронной системы над жидким гелием и двумерной зарядовой системы в структурах металл-диэлектрик-диэлектрик.

Достоверность результатов диссертации подтверждается следующим:

I. Надежной работой используемых экспериментальных методов, каждая из которых проверилась с помощью калибровочных измерений.

2. Анализом возможных погрешностей измерений и воспроизводимостью данных, полученных в различных сериях опытов.

3. Подтверждением ряда результатов измерениями других авторов.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Результаты экспериментального изучения скорости и подвижности положительных и отрицательных ионов в растворах ^3He - ^4He в широкой области электрических полей, в интервале температур и концентраций, где основную роль в процессах рассеяния играют квазичастицы ^3He и ротоны, позволившие

- обнаружить качественно новый характер температурных зависимостей подвижности ионов,
- дополнить и развить теоретические модели структуры ионов в жидком гелии,
- изучить особенности образования и характеристики переноса квантованных вихревых колец в растворах ^3He - ^4He ,
- идентифицировать процессы рассеяния, определяющие наиболее характерные особенности переноса ионов в сверхтекучих растворах, построить последовательную картину кинетических явлений, связанных с движением ионов в жидких растворах ^3He - ^4He .

2. Результаты экспериментального изучения характера движения электронов на границе раздела пар-жидкий гелий при наличии электрического поля, прижимающего заряды к поверхности жидкости, как в области газового рассеяния, так и в области температур, где наблюдается локализация электронов и образование газовых пузырьков, позволившие вместе с учетом появившихся в это же время данных других работ сделать вывод о возможности существования поверхностных электронов.

3. Результаты экспериментального изучения подвижности и импульсного времени релаксации поверхностных электронов в широкой области температур, прижимающих и ведущих электрических полей, позволившие

- обнаружить электрон-риплонное взаимодействие, определяющее при достаточно низких температурах величину и характер температурной зависимости подвижности поверхностных электронов,
- показать, что в двумерной системе электронов над жидким гелием при достаточно больших концентрациях реализуется режим полного (импульсного) контроля и тем самым установить возможность ко-

личественного описания многих кинетических свойств различных электронных систем в условиях сильного межэлектронного взаимодействия,

- изучить кинетические свойства поверхностных электронов в условиях перегрева электронной системы и перехода электронов на более высокие энергетические уровни.

4. Экспериментальное обнаружение поверхностных электронных состояний над гелиевой пленкой и связанных электронных состояний нового типа - диплонов: электронов на пленке, локализованных над положительными ионами, сцепленными с твердой подложкой.

5. Результаты измерений подвижности поверхностных электронов над гелиевой пленкой в широкой области концентраций и толщин пленки, позволившие

- обнаружить локализацию электронов на неоднородностях поляризованного потенциала подложки, вызванных ее дефектами и шероховатостями,

- зарегистрировать переход локализация-делокализация в двумерной системе электронов по мере изменения толщины гелиевой пленки и соответственно неоднородности потенциала, в котором движутся носители.

6. Экспериментальное обнаружение неустойчивости заряженной поверхности жидкого гелия в больших прижимающих электрических полях и изучение характеристик этого явления.

7. Экспериментальное обнаружение по данным о подвижности поверхностных электронов вигнеровской кристаллизации в двумерном электронном слое над жидким гелием при сверхнизких температурах.

8. Экспериментальное обнаружение аномального поведения времени жизни поверхностных электронов на основном энергетическом уровне и объяснение полученных результатов образованием сильно скоррелированной "жидкой" фазы в системе поверхностных электронов.

9. Результаты теоретического исследования характеристик низкоразмерных электронных систем, позволившие

- предложить новый способ реализации одномерной электронной системы над жидким гелием, отличающейся высокой чистотой и однородностью, установить спектр электронов и вычислить подвижность носителей,

- предложить новую структуру для реализации двумерной электронной системы на границе двух диэлектриков - МДД-структуру (металл-диэлектрик-диэлектрик), которая дает возможность изучать различные свойства широкого класса диэлектриков.

Научная и практическая значимость работы. Полученные в диссертации новые результаты о подвижности и скорости положительных и отрицательных ионов в растворах изотопов гелия позволили построить достаточно полную и надежную картину кинетических явлений, связанных с движением ионов в сверхтекучих жидкостях. Обнаруженные особенности кинетических процессов носят общий характер и могут проявляться в других сверхтекучих системах.

Исследования поверхностных электронов над жидким гелием позволили получить принципиальные выводы о состоянии электронного вещества при низких плотностях и температурах, изучить свойства поверхности квантовой жидкости, характеристики различных низкоразмерных электронных систем. Эксперименты, впервые проведенные еще в то время, когда только появились первые теоретические исследования этой проблемы, позволили получить сведения об особенностях движения электронов вдоль поверхности жидкого гелия и тем самым продемонстрировать возможность существования поверхностных электронов. В последующих экспериментах были детально исследованы кинетические свойства ПЭ, обнаружено электрон-риплонное взаимодействие и изучены его характеристики, установлено наличие связанных электронных состояний, а также диплонов над гелиевой пленкой, обнаружена и исследована локализация электронов в случайном потенциале, в котором движутся носители и т.д. Обнаруженные закономерности носят общий характер, будучи в той или иной степени присущими всем низкоразмерным электронным системам.

Наиболее яркие эффекты, характерные для двумерных электронных систем, были обнаружены при исследовании коллективных явлений в слое ПЭ: неустойчивость заряженной поверхности жидкости, вигнеровская кристаллизация, возможный переход из газового в сильно скоррелированное жидкое состояние. Все указанные эффекты носят общезначимый характер и могут проявляться в самых различных низкоразмерных электронных системах.

Проведенный анализ перспектив дальнейшего исследования

данной проблемы позволил указать некоторые новые направления создания и изучения электронных систем с пониженной размерностью, что дает возможность более глубоко и разносторонне исследовать их особенности и характеристики.

Проведенные научные разработки имеют и самостоятельное значение. Система поверхностных электронов явилась удобным "полигоном" для исследования вопросов, выходящих за рамки физики двумерных систем. Примером является уже упоминавшееся возникновение неустойчивости поверхности жидкости при большой плотности заряда, исследование плазменных характеристик слоя ИЭ и ряд других. Наконец, проведенные опыты позволили установить, что слой электронов над жидким гелием может быть использован в качестве детектора электромагнитного излучения, что является важным вопросом для современной техники.

Полученные результаты были использованы в ряде монографий, справочников и обзоров.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на международных конференциях по физике низких температур: LT-13 (г. Колорадо, США, 1972), LT-15 (г. Гренобль, Франция, 1978 г.), на Советско-японской конференции по физике низких температур (г. Новосибирск, 1969 г.), на 21 Международной конференции стран-членов СЭВ по физике и технике низких температур (г. Варна, 1983 г.), на всесоюзных совещаниях по физике низких температур: НТ-14 (г. Харьков, 1967 г.), НТ-15 (г. Ленинград, 1970 г.), НТ-18 (г. Киев, 1974 г.), НТ-19 (г. Минск, 1978 г.), НТ-21 (г. Харьков, 1980 г.), НТ-22 (г. Кишинев, 1982 г.), на международной школе по физике ионной сольватации (г. Львов, 1983 г.), на всесоюзных коллоквиумах по сверхтекучести (Бакуриани, 1976-1987 гг.).

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 27 публикациях, перечень которых приведен в конце реферата.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста, заключения, списка цитируемой литературы и приложения. Тематически ее можно разделить на две части: первая часть посвящена исследованию поведения зарядов в объемном гелии, вторая часть - исследованию поверхностных электронов. Общий объем диссертации составляет 281 страницу машинописного текста, в том числе 9 таблиц, 55 рисунков, библиография включает 203 ссылки.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается краткая характеристика объекта исследований, обоснована актуальность выбранной темы, очерчен круг задач поставленных в работе.

Первая глава диссертации посвящена изучению кинетических процессов, связанных с движением заряженных частиц в растворах ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$. Состояние вопроса и постановка задачи рассматривается в разделе I.1. К тому времени, когда начиналось настоящее исследование, существовала всего лишь одна работа, в которой изучались эффекты переноса ионов в растворах с предельно малым содержанием ${}^3\text{He}$ ($\sim 10^{-5}$). Полученных экспериментальных данных оказалось слишком мало, чтобы можно было составить последовательное представление о характере поведения заряженных частиц в растворах ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$, и кроме того отсутствовали измерения в растворах, где примеси ${}^3\text{He}$ играют определяющую роль в рассеянии ионов. Для решения поставленной задачи необходимо было обеспечить возможность проведения эксперимента при достаточно низких температурах ($\sim 0,4$ К), точных измерений скорости ионов в широкой области электрических полей.

Раздел 1.2 посвящен описанию установки для измерения подвижности ионов при температурах до 0,4 К, получаемых с помощью откачки паров над жидким ${}^3\text{He}$ адсорбционным насосом. Для проведения измерения скорости ионов в растворах был разработан время-пролетный спектрометр. Измеренные значения скорости ионов U_0 в заданном электрическом поле E позволили определить одну из наиболее важных величин, характеризующих кинетические процессы, связанные с движением ионов в квантовых жидкостях, - подвижность ионов: $\mu = U_0/E$.

Как известно, положительный ион в жидком гелии представляет собой твердый шарик с радиусом ~ 6 А, а отрицательный ион - пузырек радиуса ~ 16 А, в котором находится электрон.

Измерения проводились как в гидродинамической области, где характерные длины пробега много меньше радиуса ионов: $l \ll R_i$, так и в кинетической области движения ионов, где $l \gg R_i$.

В разделе I.3 приводятся результаты измерений подвижности положительных и отрицательных ионов в жидком ${}^4\text{He}$ и растворах ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ в гидродинамической области; при температуре T выше T_λ - точки и при $T \ll T_\lambda$ в окрестности T_λ . Подвижность

ионов в этом случае определяется вязкими силами, действующими на движущийся ион. Поскольку вязкость жидких ${}^4\text{He}$ и растворов ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ является хорошо известной величиной, то данные о подвижности позволяют получить сведения о величине радиусов положительных и отрицательных ионов R_{\pm} и тем самым проверить существующие модели структуры зарядов в жидком гелии.

Были проведены измерения подвижности положительных ионов в растворах с концентрацией ${}^3\text{He}$ до 40 мол.% и отрицательных ионов с концентрацией ${}^3\text{He}$ 19,7 и 39,9 % ${}^3\text{He}$.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что своеобразная температурная и концентрационная зависимость эффективного радиуса положительных ионов R_{+} , подсчитанного на основании данных о подвижности ионов, качественно может быть объяснена наличием слоя уплотненной жидкости вокруг твердого ядра положительного иона и соответственно появлением своеобразного отталкивательного потенциала взаимодействия между ионом и примесью ${}^3\text{He}$, имеющего следующий вид:

$$V(z) = \frac{\alpha e^2}{2z^4} \left(\frac{V_3}{V_4} - 1 \right) \equiv \frac{\varkappa}{2z^4}, \quad \varkappa = 6,8 \cdot 10^{-45} \text{ эрг} \cdot \text{см}^4 \quad (I)$$

Здесь α - атомная поляризуемость гелия, e - заряд электрона, V_3, V_4 - объемы, приходящиеся соответственно на атомы ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$ в жидких растворах. В частности, в концентрированных растворах наличие такого потенциала будет приводить к понижению концентрации ${}^3\text{He}$ вокруг иона, что и будет во многом определять особенности в поведении подвижности.

Что касается отрицательных ионов, то величина R_{-} существенно увеличивается с понижением температуры, причем для объяснения полученных результатов необходимо предположить, что на поверхности пузырька конденсируется 2-3 слоя атомов ${}^3\text{He}$. С учетом того, что при этом имеет место постепенное изменение граничных условий обтекания иона, удается согласованным образом объяснить вид зависимости R_{-} от T .

Уточненные модели структуры ионов позволили количественно объяснить особенности поведения ионов в сверхтекучих растворах ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ в кинетической области при низких температурах (раздел I.4). На рис. 1 и 2 приведены температурные зависимости величины e/μ_{\pm} в чистом ${}^4\text{He}$ (кривые I) и в растворах с концентрацией ${}^3\text{He}$ 0,75, 6,3, 11,0, 19,7, 39,9 % (кривые 2-6).

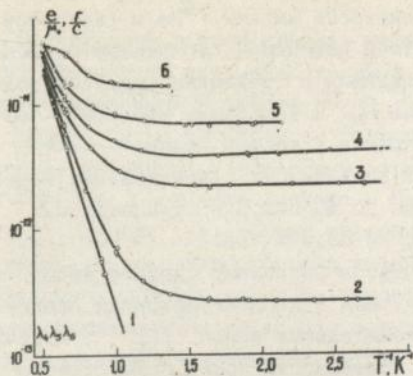


Рис. 1.

температуры, когда число ротонов уменьшается, - практически только на примесях ^3He . Измеренные значения подвижности ионов в растворах позволяют в широкой области температур определить подвижность ионов M_3 , обусловленную рассеянием ионов на примесях ^3He . Данные о M_3 для положительных ионов в растворах с концентрацией ^3He 0,75% (○) и 6,3% (●) представлены на рис. 3. Видно, что при относительно низких температурах

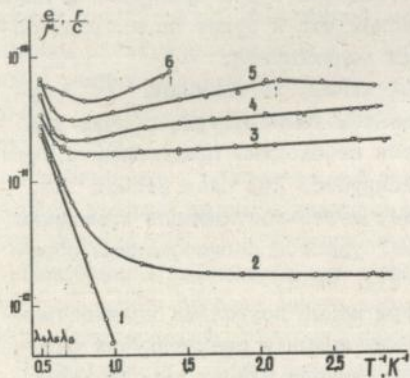


Рис. 2.

(Отметим, что кривые 5, 6 для отрицательных ионов относятся к гидродинамической области). Как следует из графиков, добавление примеси ^3He качественно изменяет характер температурной зависимости e/μ_{\pm} .

При $T > 0,8$ К подвижность ионов в растворах использованных концентраций определяется рассеянием на ротонах и примесях ^3He , а при понижении тем-

величина $e/\mu_3^+ N_3$ не зависит от температуры, а при повышении T существенно возрастает (N_3 - число атомов ^3He в единице объема). Пунктирной линией изображены расчетные величины $e/\mu_3^+ N_3$ в предположении, что положительные ионы и примеси ^3He сталкиваются как твердые шары (принималось, что $R_+ \approx 6 \text{ \AA}$). Видно сильное различие между расчетом и экспериментом, как по величине, так и по характеру

температурной зависимости. Добиться разумного согласия расчета с опытными данными при низких температурах удастся, если учесть потенциал взаимодействия между ионом и примесью ^3He в форме (1). В этом случае, как показывает проведенный расчет,

$$\frac{e}{\mu_3^+ N_3} = 5,32 \sqrt{\mu m_*}, \quad (2)$$

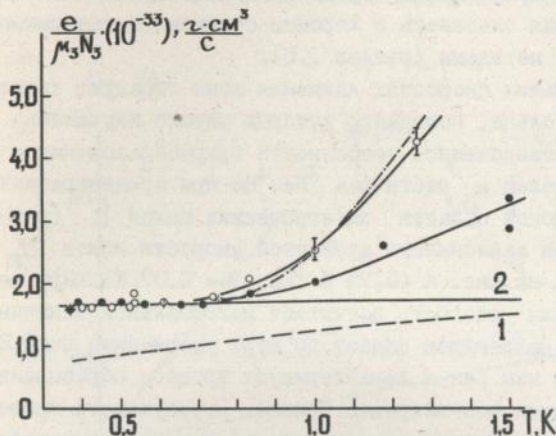


Рис. 3.

шения ротонной щели при повышенных давлениях. Локализация ротонов приводит к увеличению эффективного радиуса сечения рассеяния иона примесью ^3He на величину $n_2 \sigma_{32}$ (n_2 - число локализованных ротонов, σ_{32} - сечение рассеяния ротона примесью). Добавка к величине $e/\mu_3^+ N_3$, как показывает проведенный в работе расчет, в этом случае будет определяться следующим выражением

$$\Delta\left(\frac{e}{\mu_3^+ N_3}\right) \approx \frac{8}{3} \sigma_{32} n_2 \left(\frac{2}{\pi} m_* k T\right)^{1/2} \quad (3)$$

удовлетворительно согласующимся с экспериментальной кривой при $\bar{\sigma}_{32} = 3,8 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$ (штрих-пунктирная линия). Отметим, что менее резкая температурная зависимость $e/\mu_3^+ N_3$ в растворе 6,3% ^3He , возможно, обусловлена тем, что при таких концентрациях имеет место нарушение кинетического режима движения комп-

где m_* - эффективная масса примесных возбуждений в сверхтекучем гелии (кривая 2). Однако при высоких температурах (2) плохо описывает экспериментальные данные. Существенное уменьшение подвижности в этой области обусловлено локализацией ротонов вблизи иона за счет умень-

лексов ион-ротон.

Своеобразным является поведение отрицательных ионов в области примесного рассеяния, где полученные данные, позволившие определить величину R_- , подтвердили вывод, полученный для гидродинамической области с конденсации на поверхности пузырька отрицательного иона 2-3 слоев атомов ${}^3\text{He}$.

Полученные данные позволили определить зависимость эффективной массы примесных возбуждений в растворах от концентрации ${}^3\text{He}$, которая оказалась в хорошем согласии с данными, полученными другими методами (раздел I.5).

При больших скоростях движения ионы образуют квантованные вихревые кольца, поведение которых широко изучалось в ${}^4\text{He}$. В работе исследовались особенности вихреобразования и переноса вихревых колец в растворах ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ при концентрациях до $\sim 1\%$ ${}^3\text{He}$ в широкой области электрических полей E (раздел I.6). Типичная зависимость дрейфовой скорости ионов U_D от E представлена на рис. 4 (0,75% ${}^3\text{He}$, $T = 0,37\text{ K}$). При некотором значении поля скорость достигает максимальной величины (~ 38 м/сек) и в дальнейшем падает по мере увеличения поля. Эта последняя область как раз и характеризует процесс образования и движения комплекса ион-вихревое кольцо. В результате проведенных экспериментов был обнаружен сложный характер вихреобразования движущимися ионами, в частности, установлена связь критических полей и скоростей вихреобразования с преобладающим влиянием примесей ${}^3\text{He}$. Было показано, что коэффициент трения \mathcal{L} вихревых колец, обусловленный их взаимодействием с примесями ${}^3\text{He}$ не зависит от температуры. Этот результат объяснен в работе наличием потенциала взаимодействия между вихревой линией и примесью ${}^3\text{He}$ типа $g/2$, соответствующего силам притяжения. При этом примеси ${}^3\text{He}$, в зависимости от того, насколько близко они пролетают от вихревой линии, могут либо быть захвачены ею, либо рассеяны на некоторый угол. Численный расчет с учетом обоих указанных процессов приводит к следующему выражению для \mathcal{L} , приближенно совпадающим с экспериментальными данными:

$$\mathcal{L} \approx 0,4\pi \frac{h}{m_4} \sqrt{2gm_*} N_3. \quad (4)$$

Полученные в работе результаты позволяют, таким обра-

зом, объяснить практически все наблюдавшиеся эффекты переноса в сверхтекучих растворах ^3He - ^4He с учетом необычного характера взаимодействия между ионами и элементарными возбуждениями и характеристик фермиевской и бозевской ветвей энергетического спектра возбуждений. Проведенные опыты позволили построить последовательную картину кинетических явлений, связанных с движением ионов в жидких ^4He и ^3He - ^4He , получить интересные и поучительные сведения о многих основополагающих свойствах квантовых жидкостей.

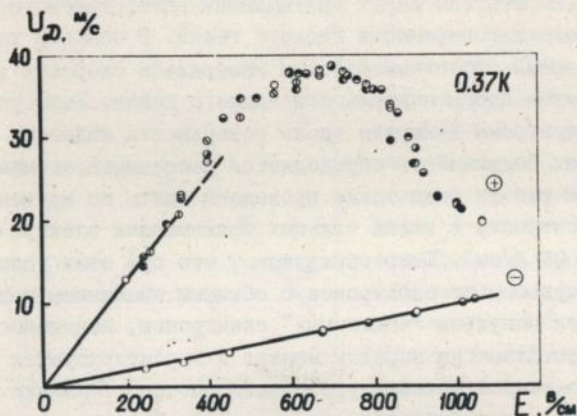


Рис. 4.

Последующие главы диссертации посвящены исследованию свойств поверхностных электронов (11Э) над жидким гелием с целью получения информации о характеристиках поверхности сверхтекучего гелия, а также о самой двумерной системе 11э , обсуждению перспектив и некоторых направлений дальнейших исследований низкоразмерных электронных систем.

Во второй главе описаны проведенные впервые опыты по изучению свойств электронов вблизи поверхности жидкого гелия, эксперименты по исследованию кинетических свойств поверхностных электронов. В разделе 2.1 сформулированы главные цели проводимых исследований. Отличительной особенностью поверхностных электронов является то, что они находятся на некотором удалении от поверхности жидкости или твердого - вне среды, с которой взаимодействуют. Ситуация особенно благоприятна для жидкого гелия,

где поверхностные электроны находятся на сравнительно большом расстоянии от поверхности, не содержащей к тому же каких-либо посторонних примесей. Это позволяет считать поверхностные электроны над жидким гелием одной из самых чистых и совершенных двумерных систем, пригодных для исследования свойств поверхности жидкого гелия, количественной проверки различных теоретических моделей.

В разделе 2.2 представлены эксперименты, в которых впервые изучался характер движения электронов вдоль поверхности жидкого гелия (со стороны пара) при наличии электрического поля, перпендикулярного к поверхности жидкого гелия. В области температур 1,4–2 К время-пролетным методом измерялась скорость электронов, движущихся вдоль поверхности жидкого гелия. Было установлено, что электроны движутся вдоль поверхности жидкости в узком слое, а их подвижность определяется рассеянием атомами гелия в паре. В работе были также проведены опыты по изучению подвижности электронов в очень сильных прижимающих электрических полях ($E_{\perp} \approx 5000$ В/см). Было обнаружено, что при этих условиях наряду с импульсом от электронов с обычным значением подвижности появляются импульсы "медленных" электронов, подвижность которых приблизительно на порядок меньше и характеризуется существенно более слабой температурной зависимостью. Наличие импульса медленных электронов объяснено взаимодействием слоя ПЭ с поверхностью жидкости и движением края прогиба жидкости, образующегося под слоем электронов. Опыты по изучению свойств электронов вблизи поверхности жидкого гелия одновременно проводились также и в других лабораториях. Вся совокупность данных, полученных как в настоящей работе, так и в других научных группах, позволили сделать вывод о существовании поверхностных электронов.

В последующих разделах главы описаны эксперименты по детальному исследованию одной из наиболее важных характеристик кинетических свойств ПЭ – подвижности. Для измерения подвижности, а также времени релаксации определялись изменение добротности

Q и резонансной частоты ω электрически связанного со слоем электронов контура, которое имело место при заряджении поверхности жидкого гелия (раздел 2.3). Сдвиг добротности $\Delta(\frac{1}{Q}) = \frac{1}{Q} - \frac{1}{Q_0}$ и частоты $\Delta\omega$ определяются соответственно действительной и мнимой частями проводимости электронного слоя и, комбинируя эти

величины, можно определить время релаксации τ и подвижность μ электронов.

В результате проведенных опытов было установлено, что в интервале температур 1,0–1,9 К температурная зависимость поглощения W (пропорционального величине $\Delta(\frac{1}{Q})$) и, следовательно, подвижности μ носит экспоненциальный характер и определяется рассеянием μ атомами гелия в паре. При $T < 0,9$ К изменение W соответствует зависимости $W \sim T^{-1}$ (рис. 5).

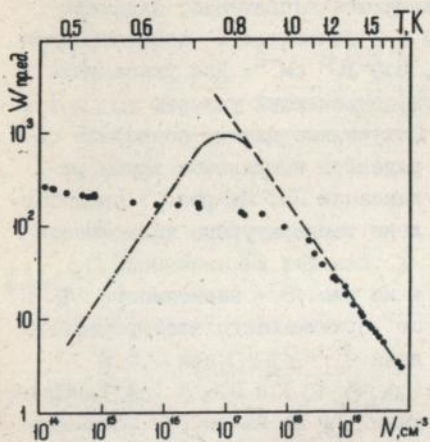


Рис. 5.

На рисунке для сравнения штрих-пунктирной линией представлена расчетная зависимость $W(T)$ для использованной частоты ($\omega = 14$ мГц), полученная в предположении, что рассеяние электронов определяется атомами гелия в паре. Существенное различие экспериментальной и расчетной зависимостей $W(T)$ свидетельствует о том, что при низких температурах начинает проявляться новый механизм рассеяния μ , обусловленный наличием тепловых возбуждений

поверхности жидкого гелия – риплонов.

теоретический расчет подвижности μ , обусловленной взаимодействием с риплонами, приводит к температурной зависимости вида $\mu \sim T^{-1}$, что находится в хорошем соответствии с опытом.

Было также установлено, что в области более низких температур до 20 мК наблюдается аномальное поведение поглощения W : отсутствие максимума на зависимости $W(T)$ и независимость от частоты, которые пока не находят своего объяснения (раздел 2.3).

Систему поверхностных электронов удобно характеризовать безразмерным параметром $\Gamma = e^2 \sqrt{\pi} n_s / T$, являющимся отношением энергии кулоновского взаимодействия между электронами к их кинетической энергии (n_s – концентрация электронов). При малом значении Γ подвижность μ хорошо описывается теорией,

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

учитывающей электрон-риплонное взаимодействие. Представляло интерес исследование подвижности ПЭ в условиях достаточно сильного электрон-электронного взаимодействия (раздел 2.4). Подвижность и время релаксации импульса ПЭ определялись по поглощению электромагнитного поля на частоте 324 МГц. Полученные результаты представлены на рис. 6, где отложены температурные зависимости величины $\Delta U/U_V$, пропорциональной подвижности ПЭ. (Здесь ΔU - изменение напряжения на контуре при зарядении поверхности жидкого гелия, U_V - прижимающее напряжение, задающее концентрацию электронов). Кривые 1-3 относятся к концентрациям соответственно $2,8 \cdot 10^8$, $4,2 \cdot 10^8$, $5,5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$. Для указанных концентраций наблюдается максимум, отвечающий условию $\omega\tau = 1$.

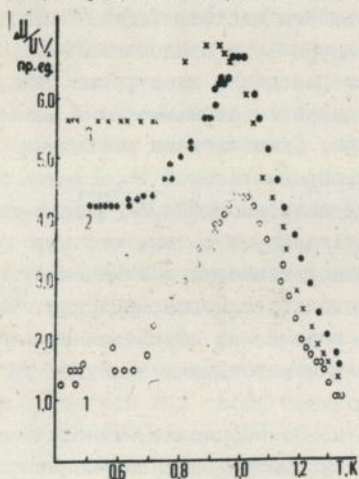


Рис. 6.

ся ниже соответствующих теоретических значений, причем указанное различие тем больше, чем больше концентрация ПЭ.

Это расхождение удалось устранить, учитывая межэлектронное взаимодействие в модели так называемого режима полного (импульсного) контроля, реализующегося при условии, что частота межэлектронных столкновений ν_{ee} много больше частоты столкновений с риплонами ν_{eZ} . В этом случае подвижность ПЭ может быть представлена в виде

$$\mu_{\text{ПК}} = \frac{4\alpha\hbar}{me[E_1^2 + 4(2\pi)^{-1/2}E_1\tilde{E}_0 + \tilde{E}_0^2]}, \quad \tilde{E}_0 = \frac{2\Lambda_0\tilde{\nu}\sqrt{2mT}}{3e\hbar}, \quad \Lambda_0 = \frac{\epsilon-1}{4(\epsilon+1)} \quad (5)$$

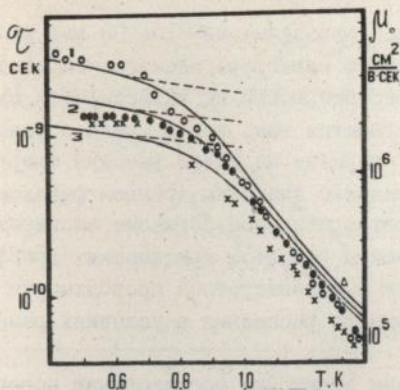


Рис. 7.

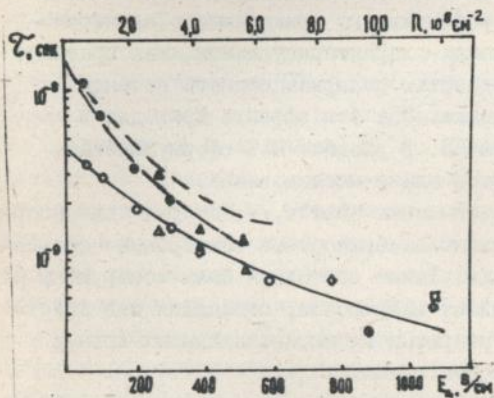


Рис. 8.

Здесь α и ε - поверхностное натяжение и диэлектрическая постоянная жидкого гелия, $\bar{\gamma}$ - величина, характеризующая степень локализации электронной волновой функции, m - масса электрона. Зависимость τ от T , следующая из (5) представлена на рис. 7 пунктиром, сплошной линией изображена зависимость, рассчитанная с учетом рассеяния на атомах гелия в паре. Видно хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных в широкой области концентраций. В том же приближении зависимость $\tau(E_{\perp})$ представлена на рис. 8 сплошной линией. Результаты одноэлектронной теории согласуются с экспериментальными данными до значений $n_s = 0,5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ (пунктир на рис. 8), в то время как

теория режима полного контроля хорошо описывает экспериментальные данные до существенно больших концентраций. Укажем, что тот факт, что в рамках теории полного контроля удается с хорошей точностью описать экспериментальные данные в широкой области концентраций имеет принципиальное значение, поскольку тем самым устанавливается возможность количественного описания многих кинети-

ческих свойств электронных систем в условиях достаточно сильного межэлектронного взаимодействия.

В работе также измерялась проводимость слоя ПЭ над жидким гелием в условиях существенного перегрева электронной системы (раздел 2.5). Обнаруженные закономерности на зависимостях высокочастотной проводимости объясняются тем, что в связи с разогревом электронов происходит их переход на более высокие энергетические уровни и увеличение среднего значения времени релаксации. При этом наблюдается удовлетворительное согласие экспериментальных результатов с теоретическим расчетом критических дрейфовых скоростей и вида зависимости высокочастотной проводимости от дрейфового поля в области риплонного рассеяния в условиях разогрева электронной системы.

Третья глава диссертации посвящена исследованию поверхностных электронных состояний над тонкими слоями гелия - гелиевыми пленками, когда велико влияние подложки, вызывающее с одной стороны появление сильного эффективного прижимающего электрического поля, а с другой стороны - характеризующееся, как правило, достаточно большой неоднородностью поляризационного потенциала за счет шероховатости подложки. Оба эти эффекта приводят к кардинальному изменению свойств ПЭ. В разделе 3.1 сформулированы главные цели проводимых в этом плане исследований.

Раздел 3.2 посвящен описанию опытов, в которых были впервые экспериментально обнаружены поверхностные электронные состояния над пленкой жидкого гелия. Такие состояния были обнаружены по появлению сигнала поглощения от электронов, стекающих под действием электрического поля с покрытых пленкой стеклянных стенок ячейки на свободную поверхность гелия.

Поскольку из проведенных опытов следовало, что подвижность электронов, локализованных над гелиевой пленкой, мала, то для ее измерения необходимо было использовать достаточно чувствительную методику. Это было достигнуто при измерении изменения добротности сверхпроводящего резонатора при зарядении электронами пленки HeII , смачивающей поверхность диэлектрика, помещенного в резонатор. Измерения проводились на частоте 9,4 ГГц в области температур 1,6-2,15 К и концентраций электронов до $\sim 10^{10} \text{ см}^{-2}$; использовались оптически гладкие подложки фторопласта, сапфира и ситалла.

Для измерений использовался тип колебаний в резонаторе H_{011} .

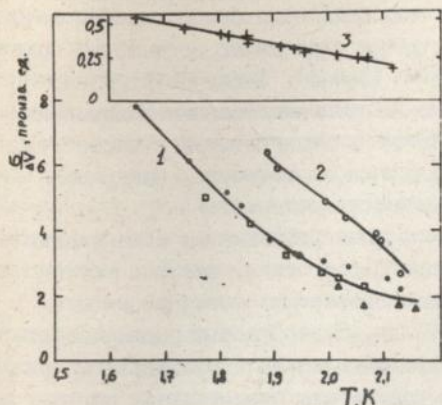


Рис. 9.

ет анализ, $\sigma_{\Delta V} \sim N_a^{-1}$ (N_a - плотность атомов гелия в паре), что указывает на то, что в данной области температур главную роль в механизме СВЧ-потерь играют атомы He в паре. При этом электроны, осаждавшиеся на подложке, при испарении пленки выше T_λ , не сказываются на величине σ . Найденные значения подвижности электронов оказались на один-два порядка меньше подвижностей ПЭ над массивным гелием. Объяснение наблюдавшихся эффектов заключается в том, что электроны оказываются локализованными в плоскости раздела пар-жидкий гелий на неоднородностях потенциала подложки, обусловленных ее дефектами и шероховатостями. Локализация электронов сопровождается деформацией под ними жидкого гелия и характер СВЧ-потерь определяется особенностями движения комплекса электрон-дунка под действием переменного электрического поля. В частности, динамика движения таких комплексов должна определяться их взаимодействием с атомами гелия в паре, что и наблюдается на опыте.

В работе был обнаружен новый тип связанных электронных состояний, названных дипольными комплексами: электроны на пленке жидкого гелия, локализованные над положительными ионами, сцепленными с твердой подложкой (раздел 3.4). При проведении опыта на покрытую пленкой подложку осаждались положительные ионы с концентрацией n_l , а затем электроны с концентрацией n_s . На рис. 9 (кривая 3) представлена температурная зависимость величины $\sigma_{\Delta V}$ при наличии на подложке положительных ионов ($n_l \approx n_s \approx 10^{10} \text{ см}^{-2}$)

На рис. 9 представлена температурная зависимость величины $\sigma_{\Delta V}$, где ΔV - разность напряжения, при котором происходило заряджение пленки, и напряжения, при котором электроны осаждались на подложку в области $T > T_\lambda$. Разные значки, укладываемые на единую кривую (исключение составляют данные на кривой 2). Как видно, величина $\sigma_{\Delta V}$ увеличивается с понижением T , причем, как показыва-

Видно, что эффективная проводимость в этом случае существенно ниже, чем на незаряженной подложке, что связано с более сильной локализацией электронов над ионами и, как следствие, достаточно большим прогибом жидкости под электроном (1-2 Å). В случае диплонов СВЧ-потери могут поэтому определяться преимущественным взаимодействием с объемными тепловыми возбуждениями жидкости, в частности, ротонами, что подтверждает температурная зависимость, найденная на опыте: $\sigma \sim V \sim N_2^{-1}$ (N_2 - плотность ротонов).

Раздел 3.5 посвящен описанию экспериментов по обнаружению перехода электронов из локализованного состояния, которое наблюдается над пленками гелия, к делокализованному состоянию носителей, характерному для массивного гелия. С этой целью высокочастотная подвижность электронов над гелиевой пленкой исследовалась при различных ее толщинах. Полученные результаты представлены на рис. 10, где отложены значения подвижности, определявшиеся по углу наклона зависимостей $\sigma(V_{\perp})$.

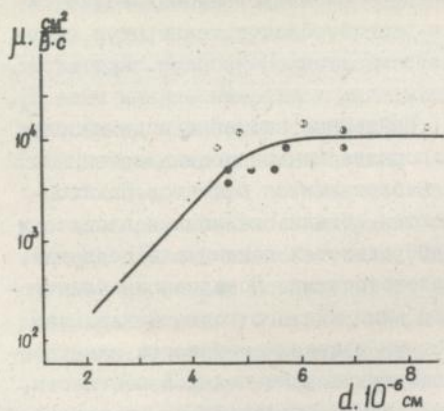


Рис. 10.

Видно, что при возрастании d от 250 Å до 800 Å $\mu(\omega)$ увеличивается от значения 250 до $1.5 \cdot 10^4$ см²/В сек, характерного для массивного гелия. Как следует из анализа результатов, зависимость μ от d в области не очень больших d приблизительно описывается соотношением $\mu(\omega) \sim e^{-\beta d}$, где β - независимый от d множитель. Полученная зависимость характеризует переход от локализованного состояния к делокализованному по мере увеличения толщины гелиевой пленки и сглаживания потенциального рельефа, в котором движутся носители.

Переход локализация-делокализация в системе ПД над гелиевой пленкой является интересным примером локализации в двумерном электронном слое на неоднородностях потенциала. Своеобразной особенностью указанной локализации является то, что она сопровождается сильным поляронным эффектом, который и определяет особенности СВЧ-поглощения при различных толщинах пленки.

Четвертая глава диссертации посвящена исследованию коллективных эффектов, которые возникают в системе поверхностных электронов над жидким гелием при достаточно больших концентрациях электронов. В этом ее отличие от предыдущих глав, где изучались эффекты, для которых межэлектронное взаимодействие либо фактически не играло никакой роли, либо всего лишь приводило к некоторым поправкам к основным величинам. В разделе 4.1 обсуждается физическая сущность основных явлений, относящихся к коллективным эффектам в системе ПЭ, анализируется состояние вопроса и формулируются основные цели проводимых исследований.

Одним из самых интересных коллективных эффектов является предсказанная ранее теоретически неустойчивость заряженной поверхности жидкости при большой плотности заряда. Опыты, в которых была впервые экспериментально обнаружена неустойчивость заряженной поверхности жидкого гелия, описываются в разделах 4.2 и 4.3. В качестве критерия возникновения неустойчивости использовался факт падения поглощения энергии электромагнитного поля слоем электронов при уходе заряда с поверхности жидкости и появления на нижнем электроде тока. Найденная на опыте критическая концентрация составляла при 1,5 К $n_{ск} \approx 2,6 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$, что удовлетворительно согласуется с теоретическим расчетом. На рис. II отложена температурная зависимость критического прижимающего электрического поля $E_{\perp кр}^*$, при котором возникает неустойчивость, в условиях неполной компенсации поля над слоем электронов ($E_{\perp} > 2\pi en_s$). Разные значки относятся к экспериментальным ячейкам различной геометрии. Было установлено, что при относительно высоких температурах наблюдается в общем неплохое согласие экспериментально измеренной величины $E_{\perp кр}^*$ с теоретическим расчетом. Вместе

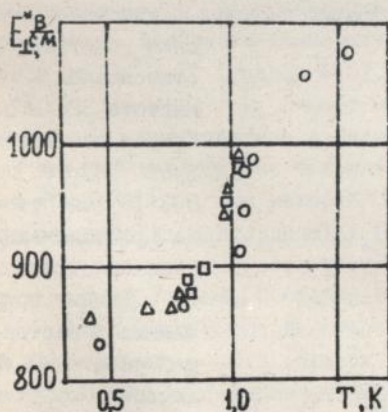


Рис. II.

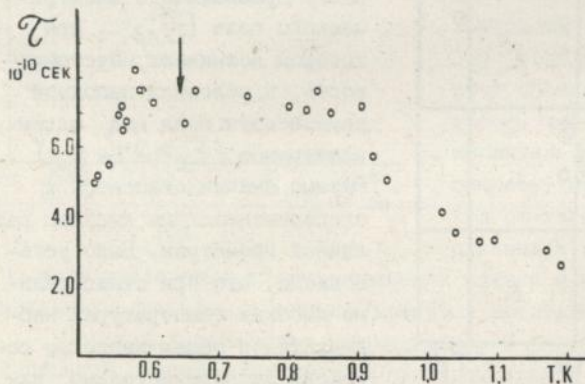
с тем при понижении температуры наблюдается неожиданный эффект:

уменьшение $E_{\perp \text{кр}}^*$, который пока не находит своего объяснения, но который необходимо учитывать при проведении экспериментов.

Исследование плазменных колебаний в условиях нескомпенсированного заряда описывается в разделе 4.4.

Раздел 4.5 посвящен изучению одного из интереснейших явлений, относящихся к коллективным эффектам в системе ПЭ, — вигнеровской кристаллизации. Теоретические исследования, выполненные к моменту постановки настоящей работы, показали, что при действии на кристаллическую решетку переменного электрического поля на поверхности жидкости возможно возбуждение стоячих капиллярных волн с волновыми векторами, совпадающими с векторами обратной решетки. С учетом этого явления и было впервые зарегистрировано существование электронного кристалла (Белл-лаборатория, США). В настоящей работе, результаты которой были опубликованы практически одновременно с данными американской группы, кристаллизация в системе ПЭ над жидким гелием регистрировалась по излому на зависимости подвижности ПЭ от прижимающего электрического поля, возникающего при переходе в кристаллическое состояние. Результаты эксперимента оказались в хорошем согласии с результатами сопоставляемого этим экспериментам теоретического расчета.

На рис. 12 представлена температурная зависимость импульсного времени релаксации, иллюстрирующая переход в кристаллическое состояние,



относящаяся к частоте 320 МГц. Кривая соответствует $n_s = 8,3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$; точка кристаллизации указана стрелкой.

Данные, полученные в настоящей работе (O, ●), вместе с результатами американской группы (+) пред-

Рис. 12.

ставлены на рис. 13, где приведена фазовая диаграмма жидкость-кристалл в системе электронов на поверхности жидкого гелия. Сплош-

ной линией показана зависимость, построенная на основании всех полученных впоследствии данных. Величина Γ , при которой возникает кристалл, соответствует $\Gamma_m \approx 135$, что приблизительно совпадает с теоретическим расчетом и свидетельствует в пользу дислокационной модели плавления кристалла.

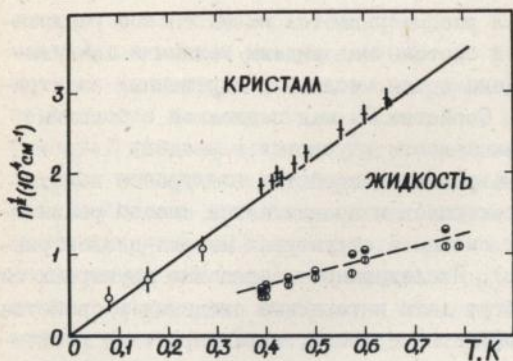


Рис. 13.

Теоретические работы по исследованию парной корреляционной функции, в двумерном электронном слое свидетельствовали о том, что еще задолго до кристаллизации в области значений $\Gamma \approx 30-50$ ближний порядок в двумерном слое во многом аналогичен ближнему порядку в кристаллической фазе. В работе исследовалось поведение времени жизни электронов на основном энергетическом уровне τ - величины, чувствительной к пространственному распределению зарядов в двумерном слое. Спыты проводились в области температур 0,4 - 1,5 K и концентраций электронов до 10^9 см^{-2} (раздел 4.6). Было показано, что, начиная с некоторого значения Γ_K имеет место резкое возрастание τ . На рис. 13 представлена зависимость минимальной концентрации n_s , при которой наблюдались большие времена жизни (\ominus) и максимальной концентрации, при которой $\tau < 10^{-2}$ сек (\circ). Видно, что эта зависимость в координатах $n_s^{1/2} - T$ приблизительно представляет собой прямую линию. Соответствующая величина Γ , определяемая по углу наклона прямой, составляет $\Gamma_K = 47 \pm 3$.

Полученные экспериментальные результаты можно объяснить, если предположить, что в области $\Gamma_K \approx 47$ имеет место резкое возрастание роли корреляционных эффектов и переход двумерной электронной системы из газового в "жидкое" состояние, в котором затруднен разогрев зарядов ведущим электрическим полем, что и приводит к большим значениям τ .

Пятая глава диссертации посвящена обсуждению перспектив и

некоторых направлений дальнейших исследований низкоразмерных электронных систем. Круг возникающих в связи с этим задач очерчен в разделе 5.1.

В разделах 5.2 и 5.3 рассматривается новый способ реализации одномерной электронной системы над жидким гелием и анализируются свойства этой системы в том числе и в скрещенных электрическом и магнитном полях. Свойства ПЭ над подложкой с большим значением магнитной проницаемости изучаются в разделе 5.4.

В разделе 5.5 рассматриваются свойства электронов вблизи границы раздела двух диэлектриков и предлагается способ реализации двумерных электронных систем в структурах металл-диэлектрик-диэлектрик (МДД-структуры). Исследование зарядовых двумерных систем в таких структурах могут дать интересные сведения о свойствах диэлектриков, таких как эффекты переноса, характеристики носителей, свойства поверхности и т.д.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

В цикле работ объединенных в диссертации, изучено поведение и основные свойства зарядов в жидком гелии: ионов в объеме жидкого ${}^4\text{He}$ и растворов изотопов ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ и электронов, локализованных над поверхностью сверхтекучего гелия (поверхностных электронов). Успешному выполнению работы способствовало создание необходимой экспериментальной базы: криостатов до 0,3 К, в том числе и криогенной системы с малым уровнем вибраций, экспериментальных методик измерения скорости ионов в жидком гелии и растворах его изотопов, импульсного времени релаксации и подвижности поверхностных электронов над жидким гелием, регистрации поверхностных электронных состояний над гелиевой пленкой, измерения СВЧ-проводимости и времени жизни ПЭ на основном энергетическом уровне.

Резюмируя данную работу, отметим ее основные физические результаты:

1. Проведено систематическое изучение свойств переноса положительных и отрицательных ионов в растворах изотопов гелия. Впервые получены данные о подвижности ионов в широкой области температур, концентраций ${}^3\text{He}$, скоростей ионов в условиях, когда основной вклад в рассеяние вносят квазичастицы ${}^3\text{He}$ и тепловые ротоны.

2. На основании анализа данных, относящихся к гидродинамической области, получены детальные сведения о структуре ионов, по-

требовавшие дальнейшего развития теории и учета для положительных ионов преобладающего влияния слоя уплотненной жидкости вокруг заряда, а для отрицательных ионов - появления при низких температурах на поверхности пузырька отрицательного иона поверхностных примесных возбуждений ^3He .

3. Экспериментально обнаружен качественно новый характер зависимости подвижности положительных и отрицательных ионов от температуры, концентрации ^3He , электрических полей, которые нельзя было истолковать в рамках имевшихся теоретических представлений. Найденные для положительных ионов закономерности были объяснены при учете предложенного в работе дальнедействующего потенциала взаимодействия между ионом и примесью ^3He , а при более высоких температурах особенно в области больших скоростей - локализацией ротон вблизи иона. Для отрицательных ионов установлена преобладающая роль конденсации на поверхности пузырька нескольких слоев атомов ^3He , что потребовало уточнения концепции примесных поверхностных уровней в растворах.

4. Изучены особенности вихреобразования движущимися ионами и переноса квантованных вихревых колец в растворах ^3He - ^4He . Обнаружено два значения критического поля и скорости, при которых ионы образуют вихревые кольца. Установлена независимость коэффициента трения вихревых колец от температуры, что объяснено эффектами притяжения и захвата примесей ^3He ствол вихревой линии.

5. В результате проведенных исследований построена полная и достаточно надежная картина кинетических явлений, связанных с движением заряженных частиц в сверхтекучих растворах ^3He - ^4He . Показано, что при относительно высоких температурах процессы переноса определяются взаимодействием ионов с тепловыми ротонами и примесными возбуждениями, а при низких температурах - рассеянием примесью ^3He ; определены величины вкладов в рассеяние от различных возбуждений, а также их характеристики в зависимости от температуры, концентрации ^3He и скорости ионов, в том числе и в области, где образуются квантованные вихревые кольца.

6. Впервые проведены опыты по изучению характера движения электронов вдоль поверхности жидкого гелия в электрическом поле, перпендикулярном к поверхности жидкости, в которых было установлено, что движение носителей является квазисвободным и происходит в узком слое вблизи поверхности жидкости. Эти результаты вместе с появившимися в это же время данными других работ позволили

сделать вывод о существовании поверхностных электронов. Проведены измерения подвижности и импульсного времени релаксации ПЭ над жидким гелием, в результате которых было обнаружено электрон-риплонное взаимодействие, изучены его характеристики в широкой области температур, частот, прижимающего электрического поля.

7. На основании анализа экспериментальных данных сделан вывод о том, что в двумерной электронной системе при достаточно больших концентрациях и низких температурах, когда частота электрон-электронных столкновений много больше частоты электрон-риплонных столкновений, реализуется режим полного (импульсного) контроля. Это позволило достаточно точно описать экспериментальные данные о подвижности ПЭ в широком интервале концентраций и тем самым установить возможность количественного описания кинетических свойств различных электронных систем в условиях достаточно сильного электрон-электронного взаимодействия.

8. Экспериментально изучена проводимость электронного слоя над жидким гелием в условиях перегрева электронной системы ведущим электрическим полем. Обнаруженная зависимость проводимости ПЭ от ведущего поля, характеризующаяся наличием максимума, объяснена переходом поверхностных электронов на более высокие энергетические уровни.

9. Впервые обнаружены поверхностные электронные состояния над гелиевой пленкой, а также новый тип связанных электронных состояний: дипольные комплексы — электроны на пленке, локализованные над положительными ионами, сцепленными с твердой подложкой (диплоны).

10. Впервые экспериментально измерена высокочастотная проводимость поверхностных электронов над гелиевой пленкой при различной ее толщине и концентрации электронов. Обнаружен переход локализованное-делокализованное состояние, сопровождающийся резким изменением подвижности, который происходит по мере изменения толщины гелиевой пленки и соответственно неоднородности потенциала, в котором движутся носители. Установлено, что локализация электронов сопровождается сильным поляронным эффектом, определяющим особенности высокочастотной проводимости электронов над гелиевой пленкой.

11. Впервые экспериментально обнаружено, что, начиная с некоторой концентрации электронов, заряженная поверхность жидкого гелия становится неустойчивой, причем полученные данные удовлет-

ворительно согласуются с теоретическим расчетом. Обнаружено существенное влияние температуры на границу неустойчивости в условиях неполной компенсации прижимающего электрического поля над слоем электронов.

12. По данным о подвижности поверхностных электронов экспериментально зарегистрирован фазовый переход в кристаллическое состояние в двумерном электронном слое при сверхнизких температурах. Полученные результаты согласуются с теорией дислокационного плавления двумерного кристалла, что можно рассматривать как аргумент в пользу того, что в двумерной системе частиц с кулоновским взаимодействием фазовый переход жидкость-твердое является фазовым переходом второго рода.

13. Измерено время жизни поверхностных электронов на основном энергетическом уровне, - величины, чувствительной к пространственному распределению зарядов. Экспериментально обнаружено резкое изменение характера поведения времени жизни при значении фундаментального параметра $\Gamma_k \approx 47$, что может служить свидетельством резкого возрастания роли корреляционных эффектов и образования в системе ПЭ отличающейся наличием ближнего порядка "жидкой" фазы.

14. Предложен новый способ реализации одномерной электронной системы, отличающейся чистотой и однородностью, свойственных системе поверхностных электронов над жидким гелием. Рассчитан энергетический спектр и средние длины пробегов электронов в такой системе.

15. Показано, что избыточные электроны или дырки в ряде диэлектриков на границе с вакуумом или другим диэлектриком при наличии электрического поля, перпендикулярного границе раздела, образуют двумерную систему. Вычислен энергетический спектр частиц в такой системе. Для практической реализации такой системы, по аналогии с МДП-структурой (металл-диэлектрик-полупроводник), предложена МДД-структура (металл-диэлектрик-диэлектрик).

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Ковдря Ю.З., Есельсон Б.Н. Влияние ^3He на подвижность положительных ионов в жидком гелии // Письма в ЖЭТФ.-1967.- 6, в 4.- С. 581-584.

2. Ковдря Ю.З., Есельсон В.Н. Подвижность положительных ионов в растворах ^3He - ^4He // ЖЭТФ.- 1968.- 55, в. I.- С. 86-92.
3. Есельсон В.Н., Ковдря Ю.З., Шикин В.В. Подвижность положительных и отрицательных ионов в сверхтекучих растворах ^3He - ^4He // ЖЭТФ.- 1970.- 59, № 7.- С. 64-76.
4. Есельсон В.Н., Ковдря Ю.З., Толкачева О.А. Особенности движения заряженных частиц в растворах ^3He - ^4He в сильных электрических полях // Тезисы докладов 16 Всесоюзного совещания по физике низких температур.- Ленинград.- 1970.- С. 173.
5. Есельсон В.Н., Ковдря Ю.З., Толкачева О.А. Особенности движения заряженных частиц в растворах ^3He - ^4He в сильных электрических полях // ЖЭТФ.- 1972.- 62, № 2.- С. 652-660.
6. Шикин В.В., Ковдря Ю.З., Рыбалко А.С. К вопросу о подвижности электронов в плотном газообразном гелии // Физика конденсированного состояния. Харьков.- 1971.- в 15.- С. 99-108.
7. Рыбалко А.С., Ковдря Ю.З. Измерение подвижности электронов вдоль поверхности жидкого гелия в сильных прижимающих электрических полях // Тезисы докладов 18 Всесоюзного совещания по физике низких температур. - Киев.- 1974.- С. 36.
8. Rybalko A.S., Kovdrya Yu.Z. Mobility of electrons along the liquid helium surface in strong retarding electric fields // J. Low Temp. Phys. - 1975. - 18, N.3/4. - P.219-227.
9. Рыбалко А.С., Ковдря Ю.З., Есельсон В.Н. Подвижность электронов вблизи поверхности жидкого гелия при температурах до 0,5 К // Письма в ЖЭТФ.- 1975.- 22, в. II.- С. 569-572.
10. Рыбалко А.С., Ковдря Ю.З. Особенности поглощения энергии электромагнитного поля системой электронов на поверхности жидкого гелия // ФНТ.- 1975.- I, № 8.- С. 1037-1043.
11. Рыбалко А.С., Ковдря Ю.З., Есельсон В.Н. Подвижность электронов вблизи границы раздела пар-жидкий гелий // Тезисы докладов 19 Всесоюзного совещания по физике низких температур.- Киев.- 1976.- С. 10-11.
12. Есельсон В.Н., Рыбалко А.С., Ковдря Ю.З., Голуб А.А., Соколов С.С. Подвижность поверхностных электронов в жидком гелии при температурах до 20 мК // Тезисы докладов 20 Всесоюзного совещания по физике низких температур.- Москва.- 1978.- 4.2.- С. 280-282.
13. Eselson V.N., Rybalko A.S., Kovdrya Yu.Z., Golub A.A., Sokolov S.S. On mobility of surface electrons in liquid helium at temperatures up to 20 mK // Proc. of the 15-th Int. Conf. on Low Temp. Phys. - J. de Phys. - 1978. -v.1. - P.C6-338.

14. Есельсон Б.Н., Рыбалко А.С., Ковдря Ю.З. Исследование проводимости и вольт-амперных характеристик поверхностных электронов в гелии // ФНТ.- 1979.- 5, № II.- С. 1354-1358.
15. Рыбалко А.С., Есельсон Б.Н., Ковдря Ю.З. Фазовый переход жидкость-кристалл в системе поверхностных электронов при температурах ниже 0,3 К // ФНТ.- 1979.- 5, № 8.- С. 947-949.
16. Карамушко В.И., Ковдря Ю.З., Менде Ф.Ф., Николаенко В.А. СВЧ поглощение электронами над гелиевой пленкой // ФНТ.- 1982.- 8, № 2.- С. 219-222.
17. Монарха Ю.П., Ковдря Ю.З. Дипольные комплексы в пленке сверхтекучего гелия // ФНТ.- 1982.- 8, № 2.- С. 215-218.
18. Карамушко В.И., Ковдря Ю.З., Менде Ф.Ф., Николаенко В.А. Исследование СВЧ-проводимости электронов над гелиевой пленкой // Тезисы докладов 22 Всесоюзного совещания по физике низких температур.- Кишинев.- 1982.- С. 194-196.
19. Ковдря Ю.З., Менде Ф.Ф., Николаенко В.А. Влияние локализации электронов на неоднородностях поляризационного потенциала подложки на СВЧ-проводимость слоя электронов над пленкой HeII // Тезисы докладов 21 Международной конференции стран-членов СЭВ по физике низких температур.- Варна.- 1983.- С. 41-42.
20. Ковдря Ю.З., Бунтарь В.А. Влияние оптической моды плазменных колебаний на высокочастотное поглощение энергии электронным кристаллом // ФНТ.- 1983.- 9, № II.- С. II25-II28.
21. Ковдря Ю.З., Бунтарь В.А. Коллективные возбуждения электронов, локализованных над жидким гелием при наличии нескомпенсированного электрического поля // ФНТ.- 1983.- 9, № 6.- С. 565-569.
22. Ковдря Ю.З., Менде Ф.Ф., Николаенко В.А. Высокочастотная проводимость электронов над гелиевой пленкой при наличии локализации на неоднородностях потенциала подложки // ФНТ.- 1984.- 10, № II.- С. II29-II40.
23. Менде Ф.Ф., Ковдря Ю.З., Николаенко В.А. Локализация в двумерной системе электронов над гелиевой пленкой // ФНТ.- 1985.- С. 646-650.
24. Ковдря Ю.З. О двумерном слое зарядов на границе двух диэлектриков // ФНТ.- 1985.- II, № 6.- С. 654-658.
25. Бунтарь В.А., Григорьев В.Н., Киричек О.И., Ковдря Ю.З., Монарха Ю.П. Жидкостные эффекты в двумерном электронном слое // Тезисы докладов 24 Всесоюзного совещания по физике низких температур.- Тбилиси.- 1986.- С. 15-16.
26. Бунтарь В.А., Ковдря Ю.З., Григорьев В.Н., Монарха Ю.П., Соколов С.С. Исследование скорости релаксации импульса и наблю-

Ав 27.183

Ав 27.183

дение режима полного контакта на поверхности гелия // Физ. журн. - 1987. - № 10. - С. 183-184.

27. Бунтарь В.А., Григорьев В.И., Соколов С.С. Влияние электрон-электронного взаимодействия на кинетические свойства поверхностных электронов в жидком гелии // Тезисы докладов 25 Всесоюзного совещания по физике низких температур.- Ленинград.- 1988.- С. 44-45.

Ответственный за выпуск - кандидат физ.-мат. наук С.С. Соколов

Подписано к печати 16.03.1993 г., физ. п. л. 2,0,
учетн. изд. л. 2,0. Заказ № 39. Тираж 100 экз.

Ротапринт ФТИИТ АН Украины, Харьков-164, пр. Ленина; 47