



Батулин Руслан Германович

**Оптическая спектроскопия атомов и ионов бария в
сверхтекучем ^4He**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена на кафедре общей физики Института физики ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Научный руководитель:

Таюрский Дмитрий Альбертович, д. ф.-м. н., профессор,
ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Официальные оппоненты:

Шикин Валерий Борисович, д. ф.-м. н.,
главный научный сотрудник,
ФГБУН Институт физики твердого тела Российской академии наук, г. Черноголовка.

Карабулин Александр Владимирович, к. ф.-м. н.,
ассистент кафедры химической физики,
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва.

Ведущая организация:

ФГБУН Институт физических проблем им. П.Л. Капицы Российской академии наук,
г. Москва.

Защита состоится 6 июня 2019 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.081.15 при Казанском (Приволжском) федеральном университете, расположенном по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 16а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке К(П)ФУ (г. Казань, ул. Кремлевская, д. 35). Электронная версия размещена на официальных сайтах ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ (vak.ed.gov.ru) и К(П)ФУ (kpfu.ru).

Автореферат разослан «___» апреля 2019 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д. ф.-м. н., профессор



Еремин Михаил Васильевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования.

Квазичастицы, обладающие свойствами фермионов Майорана, привлекают интересы исследователей во многих областях физики, в том числе и в физике конденсированного состояния [1–3]. Среди многих других систем, сверхтекучая фаза $^3\text{He-B}$ на поверхности которой предсказано существование майорановских фермионов [4, 5] представляет особый интерес. Подобно топологическим изоляторам (ТИ), топологические сверхпроводники (SC) или сверхтекучие жидкости имеют энергетическую щель в спектре в объеме сверхпроводника, но на границе или на поверхности образца ширина щели обращается в нуль. Для исследования поверхностных состояний в сверхтекучем $^3\text{He-B}$ используются различные экспериментальные методы, такие, например, как ЯМР [6, 7], либо методы, основывающиеся на измерениях акустического импеданса [8], измерениях удельной теплоемкости [9, 10] или подвижности ионов, локализованных под поверхностью [11, 12].

В соответствии с опубликованными недавно теоретическими расчетами [13, 14], наличие майорановских поверхностных состояний ведет к сильной анизотропии спиновой магнитной восприимчивости вблизи поверхности или в тонкой пленке сверхтекучего $^3\text{He-B}$. Такого рода анизотропия должна привести к особенностям в механизмах спиновой релаксации примесных частиц, инжектированных в приповерхностный слой сверхтекучего гелия. Время спиновой релаксации ансамбля частиц с направлением поляризации, ортогональным к поверхности, будет значительно меньше чем поляризованных вдоль поверхности.

Чунг и Чжан в своей работе [13] предложили измерить время спиновой релаксации локализованного вблизи поверхности сверхтекучего $^3\text{He-B}$ ансамбля электронов. Однако, имеется ряд ограничений, существенно осложняющих осуществление этой идеи. Концентрация примесных электронов, локализованных под поверхностью, не может превысить 10^9 см^{-2} , измерения должны проводиться в слабом статическом магнитном поле - должно выполняться условие $H \ll k_B T / \mu_B$, а времена продольной релаксации могут достигать порядка 10^3 с , что может привести к насыщению спиновой системы [13]. Таким образом, необходимо провести измерения спектров ЭПР и времени продольной релаксации парамагнитных центров с концентрацией не более 10^9 см^{-2} в постоянном магнитном поле не превышающем миллитесла, что ниже предела чувствительности современных спектрометров.

В работе [A1] был предложен альтернативный метод наблюдения анизотропии спиновой релаксации, основанный на оптическом детектировании спин-поляризованного ансамбля ионов Ba^+ , локализованных под поверхностью сверхтекучего гелия $^3\text{He-B}$. Задача внедрения

примесных ионов в приповерхностный слой сверхтекучего ^3He -В была успешно решена для «собственных» примесей - ионов He^+ и электронов [15]. Вместе со свободными электронами и катионами He^+ , ион Ba^+ является модельным объектом для изучения свойств заряженных примесей в сверхтекучем гелии. Исторически первые измерения подвижности Ba^+ в жидком гелии были опубликованы Джонсоном и Глаберсоном [16] в 1972 г., а первые оптические измерения - Рейхером и др. [17] в 1986 г.

С 1960-х гг. хорошо известно, что свободный электрон в жидком гелии образует полость вокруг себя, известную как электронный «пузырь», тогда как положительный ион He^+ , окруженный плотной оболочкой из атомов гелия, формирует кластер, известный как «снежный ком». Гораздо больше дебатов [18–22] вызывает структура и свойства иона Ba^+ и других щелочноземельных катионов в жидком гелии.

Состояние типа «пузырь» формируется из-за отталкивания, возникающего между свободным электроном и замкнутыми электронными оболочками окружающих атомов гелия (принцип Паули). Эта сила уравнивается силой поверхностного натяжения и внешним гидростатическим давлением на границе «пузыря» и приводит к равновесному состоянию «пузыря» с радиусом 17 Å. Многие нейтральные примеси, в частности атомы большинства металлических элементов, образуют «пузыри», которые аналогичны электронному «пузырю» и имеют типичные радиусы от 5 до 7 Å. В этом случае сила отталкивания действует между электронными оболочками атомов He и валентными электронами примесного атома (для обзора по атомным «пузырям» см. [23]). Для «снежного кома» локальное увеличение плотности жидкого гелия вокруг примесного иона происходит потому, что на атомы He в сильно неоднородном электрическом поле иона действует притягивающая сила, природа которой - ион-дипольное взаимодействие. В работе Аткинса [24] было предсказано, что это увеличение локальной плотности He вокруг He^+ (электрострикция) может приводить к затвердеванию жидкого He и образованию твердого «снежного кома» с радиусом ≈ 8 Å.

Катионы щелочных металлов также имеют структуру, напоминающую «снежный ком» [25, 26]. Однозарядные катионы щелочноземельных элементов, такие как Ba^+ , представляют собой более сложную систему которая находится между двумя предельными случаями: «пузырь» и «снежный ком». Электронная структура таких катионов эквивалентна структуре нейтрального атома щелочного металла с одним валентным электроном, занимающим сферически симметричную nS -орбиталь ($n = 6$ для Ba^+) с электронной плотностью которая распространяется на область радиусом несколько ангстрем. Отталкивание между внешним s -электроном и замкнутой электронной оболочкой атома He превалирует над притяжением между ионом Ba^+ и атомами He на межатомных расстояниях меньше 5 Å. С другой

стороны, электрическое поле, создаваемое ионом, поляризует атомы He и приводит к появлению дополнительной притягивающей силы, которая доминирует на расстояниях больше 5 Å. Результирующая структура локализованного иона определяется конкуренцией между двумя механизмами и может сочетать свойства - как «пузыря», так и «снежного кома». В настоящее время данное представление активно развивается, формируя новую область исследований.

Методы внедрения в сверхтекучий гелий ионов и атомов различных щелочных, щелочно-земельных и переходных металлов значительно отличаются от метода внедрения «собственных» примесей: электронов и ионов He⁺. Одним из методов создания наночастиц и внедрения их в жидкий гелий является лазерная абляция металлов непосредственно в жидком гелии. Уже в первых экспериментах подобного рода было обнаружено, что создаваемые методом лазерной абляции наночастицы объединяются в мезоскопические структуры нитевидной формы [27]. В некоторых случаях из нитей формируются дендритные структуры, представляющие собой сети или паутины размерами несколько миллиметров или даже сантиметров. Исследования таких структур методами сканирующей электронной микроскопии показали, что металлические нити состоят из большого числа скрученных и запутанных нанонитей с характерными диаметрами 2 – 20 нм [23]. В дальнейшем проводились исследования их кристаллической структуры, температурной стабильности и электрических свойств [28–35]. Похожие структуры наблюдались в экспериментах по внедрению металлических атомов и кластеров в микро- и нанокapли сверхтекучего гелия [36–39].

Отличительной особенностью сверхтекучего гелия, помимо других его интересных физических свойств, является наличие долгоживущих вихрей (топологических дефектов), на оси которых отсутствует сверхтекучесть [40, 41]. Еще в 1970-ые годы было экспериментально обнаружено свойство вихрей притягивать и захватывать примесные электроны за счет разницы давлений на периферии и на оси вихря [42]. Существует гипотеза, что в сверхтекучем гелии и нанокapлях гелия металлические нанонити формируются за счет агрегации частиц на оси вихря [23, 28, 43–45]. В настоящее время большинство публикаций по данной тематике придерживаются этой гипотезы [32, 36–38, 46–48]. Локализация отдельных частиц, таких как электроны и ионы, широко исследовалась теоретически [49, 50]. Изучались процессы диффузии нейтральных частиц в жидком He и их объединения в мелкие кластеры [39, 46]. Однако в настоящее время отсутствует завершенная теория, которая описывала бы рост нанопроволок или нанонитей из наночастиц, локализованных на оси вихря. Особенно загадочным является образование нитей, когда отдельные нанопроволоки запутываются или скручиваются вместе, чтобы образовать «веревку» или проволоку миллиметрового размера и сетку из таких проволок.

Нанопроволоки в сверхтекучем гелии представляют интерес по нескольким причинам. Во-первых, нанопроволоки, полученные таким способом, могут обладать физическими свойствами, резко отличающимися от полученных традиционными методами. Во-вторых, структура нанопроволок и их сетей может дать новое представление о физике квантованных вихрей в бесконечно больших (в объеме гелия) и конечных (капли гелия) сверхтекучих системах. Изучение роста нанопроволок в сверхтекучем гелии является обособленной актуальной задачей, напрямую связанной с задачей о внедрении отдельных ионов в сверхтекучий гелий. Присутствие проводящих нанопроволок сильно искажает локальное электрическое поле в системе, и в зависимости от полярности ведёт - либо к потерям в числе отдельных ионов - вследствие их коагуляции с нанопроволоками, либо к выталкиванию ионов из зоны наблюдения.

Для решения задачи локализации ионов под поверхностью сверхтекучего ^3He важно понимать процесс роста нанопроволок в условиях близости к свободной поверхности. Эксперименты в сверхтекучем ^3He на данном этапе не целесообразны из-за своей дороговизны по сравнению с ^4He и дополнительных сложностей в подготовке и проведении эксперимента при температурах порядка 1 мК. Таким образом необходимо было сначала апробировать механизм внедрения ионов и исследовать процесс роста нанопроволок вблизи свободной поверхности жидкого ^4He , для чего проводились эксперименты с различными конфигурациями ячеек и схемами абляции.

Цели и задачи диссертационной работы: Целями данной работы являются:

1. Апробация методов внедрения примесных атомов и ионов щелочных и щелочноземельных металлов в сверхтекучий ^4He и исследования образуемых ими точечных дефектов и мезоскопических металлических структур.

Для достижения поставленных целей необходимо было решить следующие задачи:

1. Создать экспериментальную установку по исследованиям оптических спектров атомов и ионов щелочных и щелочноземельных металлов, внедряемых в приповерхностный слой сверхтекучего ^4He в диапазоне температур 1.5 - 2.2 К;
2. Исследовать различные конфигурации ячеек и схем абляции для внедрения атомов и ионов бария в сверхтекучий ^4He ;
3. Измерить оптические спектры атомов и ионов Ва, инжестированных в сверхтекучий ^4He ;

4. Выполнить теоретический расчет спектров иона Ba^+ в сверхтекучем гелии в приближении модели атомного «пузыря» и сравнить результаты с полученными экспериментальными данными;
5. Пронаблюдать рост и формирование мезоскопических структур при наличии свободной поверхности гелия в приложенном вертикально электрическом поле;

Научная новизна.

1. Предложен экспериментальный метод по оптическому детектированию майорановских поверхностных состояний в сверхтекучем 3He -В. Сделана оценка критического поля и максимальной концентрации ионов, которые можно локализовать под поверхностью сверхтекучего 3He -В;
2. Выполнено оригинальное исследование влияния рекомбинации в плазме, создаваемой абляцией мишени в сверхтекучем жидком гелии;
3. Выполнен расчет спектров поглощения и люминесценции, отвечающих переходу D_1 иона Ba^+ в сверхтекучем 4He в модели деформированного атомного «пузыря» с использованием полученных из первых принципов парных потенциалов Ba^+-He ;
4. Для внедрения ионов в сверхтекучий гелий реализована экспериментальная установка в которой скомбинированы два метода внедрения ионов: лазерная абляция и разряд в газовой фазе;
5. Исследован процесс формирования мезоскопических структур, локализованных под свободной поверхностью гелия в приложенном вертикально электрическом поле;

Научная и практическая значимость. Детектирование майорановских фермионов на поверхности сверхтекучей фазы 3He -В является актуальной фундаментальной задачей современной физики конденсированного состояния. Майорановские поверхностные состояния сверхтекучей фазы 3He -В обладают физическими свойствами, которые могут быть использованы в так называемых топологических квантовых вычислениях [51]. Прямое детектирование поверхностных состояний майорановских фермионов, а впоследствии манипулирование майорановскими поверхностными состояниями, будет первым шагом на пути к реализации топологического квантового компьютера.

В диссертации представлены результаты, развивающие представления о процессах формирования нанопроволок и сетей из внедренных атомов и ионов металлов в сверхтекучий

гелий в новой системе при наличии свободной поверхности и статического электрического поля. Таким образом была создана двумерная ловушка для примесных частиц, по аналогии с квантовым вихрем, который представляет собой одномерную ловушку.

Были исследованы экспериментально и теоретически спектры перехода D_1 иона Ba^+ , внедренного в сверхтекучий 4He . Установлено, что локальное увеличение плотности гелия He вокруг иона за счет эффекта электрострикции оказывает сравнительно небольшое влияние на спектр электронного перехода. Модель атомного пузыря, которая не учитывает это увеличение плотности, по-прежнему обеспечивает качественное согласие результатов расчетов с экспериментом, а сама модель может применяться для расчетов спектров ионов щелочных и щелочно-земельных атомов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Реализована универсальная экспериментальная установка, позволяющая внедрять примесные атомы и ионы щелочных и щелочноземельных металлов в сверхтекучий 4He и исследовать образуемые ими точечные дефекты и мезоскопические металлические структуры;
2. Численными расчетами показано, что полученные экспериментально сдвиг и ширина спектров поглощения и люминесценции хорошо описываются в рамках модели атомного «пузыря», а структура иона Ba^+ в возбужденном состоянии в окружении сверхтекучего 4He представляет собой пузырь;
3. При наличии свободной поверхности гелия, в приложенном вертикально электрическом поле, происходит образование мезоскопических структур, которые представляют из себя квазиодномерные нанонити и квазидвумерные наносетки в сверхтекучем 4He , состоящие из атомов аблируемого вещества.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих международных конференциях и семинарах:

International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS) (Matsue, Japan, August 1 - 6 2013); V Young Scientists Conference «Problems of Theoretical Physics» (YSC-2013) (Kyiv, Ukraine, December 24 - 27, 2013); 2014 Annual meeting of the Physical Society of Japan (Kasugai, Japan, September 7-9, 2014); International Workshop «2D electrons on helium and quantum information» (Kazan, Russia, May 3-7 2014); 27th International Conference on Low Temperature Physics (LT-27) (Buenos Aires, Argentina, August 1st - 6th, 2014); The International Workshop on Electrons and Ions in Quantum Fluids and Solids (Mishima, Japan, March 11-14 2018);

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 6 печатных изданиях: три из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, индексируемых аналитическими базами данных Web of Science (WOS), Scopus, РИНЦ [A1, A2, A3], 3 в тезисах докладов [A4, A5, A6].

Личный вклад автора. Представленные в диссертации экспериментальные результаты получены в лаборатории физики низких температур Института физических и химических исследований RIKEN (Япония) в рамках сотрудничества между КФУ и RIKEN. Автор принимал личное участие в создании экспериментальной установки для регистрации оптических спектров атомов и ионов при низких температурах, разработке экспериментальных ячеек, проведении экспериментов, анализе и интерпретации экспериментальных данных, выполнении численных расчетов. Публикации полученных результатов проводились совместно с соавторами.

Экспериментальные и теоретические исследования по теме диссертации выполнены при поддержке гранта JSPS KAKENHI грант № 24000007, и теоретические исследования частично за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (проект №3.8138.2017/8.9).

Содержание работы

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи, обосновывается научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов и представлены положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена исследованию примесных атомов и ионов методами оптической спектроскопии [52, 53]. Спектры поглощения и люминесценции примесных частиц, внедренных в жидкий гелий, позволяют получить важную информацию о структуре дефекта, который образует данная примесь, а существующие теории качественно описать сдвиги и уширение линий оптических переходов.

В Разделе 1.1 данной главы рассматриваются дефекты, которые образует внедренный ион или атом в жидком гелии, такие как «пузырь» и «снежный ком». Раздел 1.2 посвящен методам внедрения, таким как конденсация атомного или ионного пучка и лазерная абляция, описываются их преимущества и недостатки. Раздел 1.3 целиком посвящен оптической спектроскопии примесных ионов и атомов, в том числе и рекомбинационной спектроскопии. В Разделе 1.4 рассматривается задача о локализации примесных ионов под поверхностью жидкого гелия, и сделана оценка концентрации поверхностных ионов в соответствующем

критическом поле при превышении которого возникает неустойчивость поверхности. Была сделана оценка [A1] критического поля, E_c , для системы: ионы, локализованные под поверхностью сверхтекучего ^3He -В. В соответствующем температурном диапазоне напряженность электрического поля $E_c \approx 2$ кВ/см, а соответствующая этому значению напряженности поверхностная плотность зарядов $n_c \approx 10^9$ см $^{-2}$. Раздел 1.5 полностью посвящен обзору работ по изучению мезоскопических структур в сверхтекучем гелии, таких как нити и сетки.

Вторая глава посвящена теоретическому расчету спектров перехода D_1 иона Ba^+ в жидком гелии. Раздел 2.1 главы посвящен свободному иону Ba^+ . Приведена энергетическая диаграмма уровней иона бария Ba^+ [54] и вероятности переходов. Раздел 2.2 посвящен парным потенциалам взаимодействия Ba^+ -He. Взаимодействие между ионом Ba^+ и окружающими атомами He описывается с помощью парных потенциалов, полученных из первых принципов квантово-химическими методами расчета. Первый набор парных потенциалов был рассчитан в работах [55, 56] для основного $6s$ и возбужденных $6p$ состояний иона Ba^+ . Методом самосогласованного поля в полном активном пространстве (CASSCF) был сделан расчет молекулярных орбиталей, и парные потенциалы Ba^+ -He были получены методом конфигурационного взаимодействия (MRCI). Второй набор парных потенциалов Ba^+ -He для разнообразных электронных состояний Ba^+ и атома He в основном состоянии был рассчитан в недавних работах [22, 57] методом объединенных кластеров, CCSD (T). В разделе 2.3 представлена модель атомного «пузыря», а в Разделе 2.4 описывается метод расчета уширения спектральных линий. В Разделе 2.5 описывается модель деформированного «пузыря» и представлены результаты расчетов спектров поглощения и люминесценции перехода $6p\ ^2P_{1/2} - 6s\ ^2S_{1/2}$ (линия перехода D_1) иона Ba^+ в сверхтекучем гелии с учетом дышащей и квадрупольных мод.

Сдвиги линий переходов относительно свободного иона, δ , и полная ширина линии на половине высоты FWHM, γ , для рассчитанных теоретически и полученных экспериментально спектров поглощения и люминесценции приведены в Таблице 1.

В Разделе 2.6 полученные теоретические значения сдвига линий и полуширина линий сравниваются с экспериментальными данными, представленными в литературе [17] и полученными в экспериментах [A3], описание которых будет в третьей и четвертой главах диссертационной работы. На Рисунке 1, представлен экспериментальный профиль [17] спектральной линии перехода $6p\ ^2P_{1/2} - 6s\ ^2S_{1/2}$ в поглощении (необходимо заметить, что экспериментальные спектры в [17] были получены после деконволюции с спектральной функцией спектрометра), и теоретически рассчитанные спектры поглощения. Экспериментальные и теоретически рассчитанные спектры люминесценции будут представлены в Главе 4.

Таблица 1. Сдвиги спектральных линий и ширина спектральных линий иона Ba^+ в сверхтекучем гелии ^4He . δ^{exp} , γ^{exp} - экспериментальные [17] сдвиги линий и ширина линий, δ^{exp} , γ^{th} - теоретически полученные сдвиги линий и ширина линий для различного набора парных потенциалов (настоящая работа). Переход D_1 свободного иона Ba^+ соответствует $20\,262\text{ см}^{-1}$

Спектральный переход D_1	Ba ⁺ в жидком гелии, эксперимент [17]		Ba ⁺ в жидком гелии, модель «пузыря»			
			MRCI [55, 56]		CCSD(T) [22, 57]	
	δ^{exp} (см ⁻¹)	γ^{exp} (см ⁻¹)	δ^{th} (см ⁻¹)	γ^{th} (см ⁻¹)	δ^{th*} (см ⁻¹)	γ^{th} (см ⁻¹)
Люминесценция	+105	83	+141	38	+108	51
Поглощение	+485	194	+373	91	+421	93

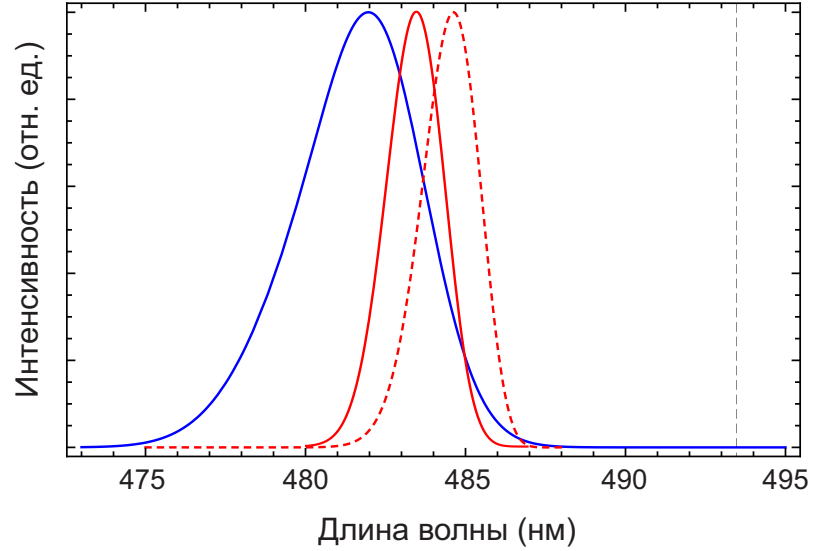


Рис. 1. Спектр поглощения Ba^+ перехода D_1 в сверхтекучем He. Красная линия - результат настоящей работы в рамках модели «пузыря» (сплошная кривая для потенциалов [22, 57], пунктирная линия - для парных потенциалов [55, 56]), синяя линия - экспериментальные данные из работы [17]. Вертикальная пунктирная линия обозначает переход D_1 свободного иона.

На Рисунке 1 рассчитанные спектры поглощения перехода D_1 иона Ba^+ сопоставлены с экспериментальными данными [17], полученными при температуре $T = 1.6\text{ К}$. Две рассчитанные формы линий соответствуют различным наборам *ab initio* парных потенциалов Ba^+-He [22, 55–57]. В наших экспериментах спектр поглощения не исследовался. Соответствующие сдвиги линий и ширина линии, FWHM, указаны во второй строке Таблицы 1. Согласие с экспериментальными данными лучше для набора парных потенциалов, полученных методом объединенных кластеров [22, 57], особенно при сравнении сдвига линии. Сдвиг линии и

уширение линии более выражены в спектрах поглощения, чем для спектров люминесценции. Расчет сильно недооценивает уширение линии: $\gamma^{th} = 93 \text{ см}^{-1}$ против экспериментального значения $\gamma^{exp} = 194 \text{ см}^{-1}$. Недооценка сдвига линии составляет 15%: $\delta^{th} = +421 \text{ см}^{-1}$ против экспериментального значения $\delta^{exp} = +485 \text{ см}^{-1}$.

Качественное согласие экспериментальных и теоретических значений сдвигов оптических спектров перехода D_1 иона Ba^+ позволяет сделать вывод о применимости модели атомного «пузыря» для расчета спектров ионов щелочных и щелочно-земельных металлов. Совпадение в пределах экспериментальной погрешности значения сдвига спектра люминесценции перехода D_1 иона Ba^+ в сверхтекучем гелии с теоретическим значением говорит о структуре окружения в виде «пузыря» иона Ba^+ в возбужденном состоянии $^2P_{1/2}$, тогда как в поглощении сдвиг лучше описывается в рамках модели TDDFT [58], которая предсказывает состояние «снежный ком». Результирующая структура локализованного иона определяется противостоянием этих двух механизмов и может сочетать свойства, как «пузыря», так и «снежного кома».

Разделы 3.1 и 3.2 третьей главы посвящены описанию экспериментальной установки, схемам откачки и напуска газа, различным инженерным решениям для установки образца в оптический криостат и проведении измерений при низких температурах. В Разделе 3.3 приводится экспериментальное оборудование: для абляции и инъекции примесей в сверхтекучий гелий с применением методов, описанных в первой главе данной работы, для детектирования лазерно индуцированной флуоресценции атомов и ионов Ba и наблюдения за формированием мезоскопических структур в сверхтекучем гелии. Раздел 3.4 посвящен характеристикам исследуемого образца и описанию методики очистки поверхности. Данная методика эффективна при абляции щелочных и щелочноземельных металлов, позволяет уменьшить энергию лазерного импульса абляции и увеличить стабильность выхода ионов и атомов.

В четвертой главе, состоящей из трех разделов, представлены основные экспериментальные данные. В Разделе 4.1 описаны спектры ионов и атомов Ba^+ в плазме при абляции в жидком гелии, атомные спектры Ba в сверхтекучем гелии. Сделана оценка влияния рекомбинационных процессов на концентрацию ионов Ba^+ , инжектированных в сверхтекучий гелий.

Лазерная абляция в сверхтекучем гелии приводит к образованию плотной плазмы в точке фокуса лазерного импульса на образце. Характерный спектр излучения плазмы показан на Рисунке 2, энергия импульса 25 мДж. Вблизи центра плазмы спектр излучения непрерывный. Электронные переходы иона Ba^+ и нейтрального атома Ba представлены в виде спектров поглощения на фоне непрерывного спектра (кривая 1). В спектре излучения

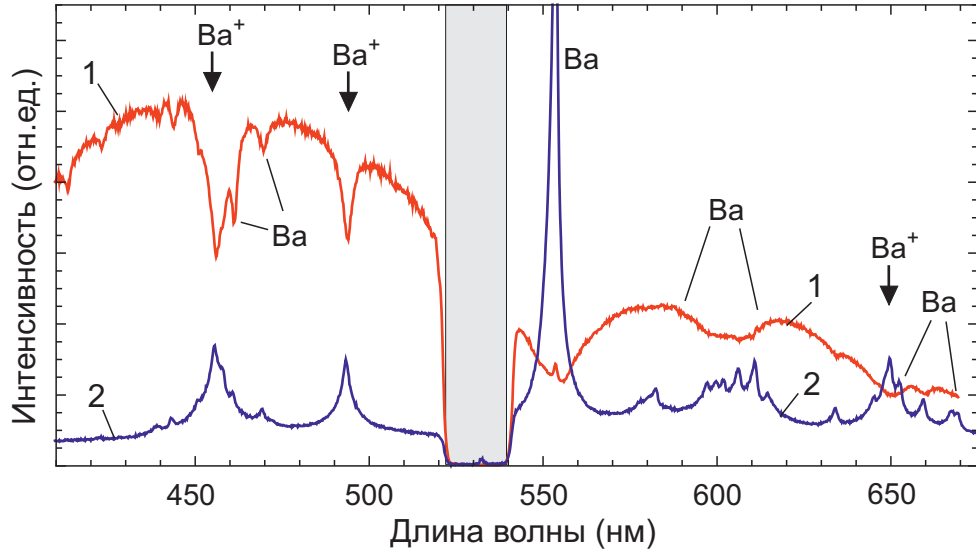


Рис. 2. Спектр плазмы при абляции образца в сверхтекучем гелии при $T=1.6$ К в диапазоне длин волн 410–670 нм. Сплошная кривая 1 красного цвета - центральная часть плазменного шлейфа, сплошная кривая 2 синего цвета - периферическая часть плазменного шлейфа. Наблюдаемые линии поглощения / флуоресценции принадлежат ионам Ba^+ и нейтральным атомам Ba. Серая затененная область на 530 нм отмечает полосу поглощения светофильтра

периферийной части плазмы, спектральные линии представлены в виде пиков и вклад непрерывного спектра существенно меньше. Полученные спектры плазмы позволяют оценить количество ионов Ba^+ в плазме. Коэффициент поглощения $\alpha(\omega)$ разрешенного перехода может быть посчитан из уравнения [59]:

$$\alpha(\omega) = \frac{4\pi D^2 \omega_0 N_i}{3\hbar c} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\Gamma}{(\omega - \omega_0)^2 + \Gamma^2} \quad (1)$$

В уравнении (1), ω_0 и D - частота перехода и дипольный момент перехода, соответственно, Γ - ширина линии перехода, и N_i - количество поглощающих оптическое излучение частиц. Спектр пропускания может быть описан законом Ламберта-Бугера-Бэра:

$$I(\omega) = I_0 \exp[-\alpha(\omega)L] \quad (2)$$

В уравнении (2), L - толщина поглощающего слоя, а I_0 и I интенсивность падающего и проходящего излучения, соответственно. Радиус плазмы для оценки выбран равным 1 мм, тогда аппроксимация спектра поглощения электронного перехода $6s \ ^2S_{1/2} - 6p \ ^2P_{1/2}$ формулой (1) позволяет вычислить концентрацию ионов $N_i \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$. В объеме плазмы 1 мм^3 соответственно будет 10^{12} ионов Ba^+ , производимых за один лазерный импульс энергией 25 мДж.

Движение ионов в жидком гелии порождает ток смещения, регистрируемый на электроде. Интегрируя по времени зависимость тока $I(t)$, можно оценить заряд частиц, которые инжектируются в сверхтекучий гелий и достигают электрода. При напряженности поля $E=1$ кВ/см суммарный заряд частиц составляет порядка 10^{-11} Кл, что соответствует 10^8 ионов/импульс. При меньшей напряженности поля ≈ 0.5 кВ/см количество ионов составляло 10^7 ионов/импульс. При напряженности поля $E=1$ кВ/см, концентрация заряженных частиц, инжектируемых в сверхтекучий гелий, как минимум на четыре порядка меньше чем в плазме. Таким образом можно говорить об эффективном процессе рекомбинации в плазме при абляции мишени в сверхтекучем гелии. В отсутствие диссоциирующего импульса, спектр люминесценции атомов и ионов в сверхтекучем гелии не наблюдался.

В фокусе лазерного пучка, диссоциирующего кластеры, если туда попадает микрочастица, она аблируется и образуется газовый пузырек. В этом случае визуально видно искру и регистрируется характерный спектр плазмы. Ионы и электроны в плазме рекомбинируют и термализуются на границе газ/жидкость. Атомы Ba формируют «пузырные» состояния и движутся в жидкости, покидают зону абляции и заполняют окружающий объем. Спустя несколько минут после начала работы диссоциирующего лазерного импульса, сфокусированного в центре ячейки, можно было невооруженным глазом наблюдать светящийся зеленый конус, который повторял форму сфокусированного лазерного пучка.

Широкий спектр линии поглощения перехода $6s\ ^1S_0 - 6s6p\ ^1P_1$ атома Ba [52] в сверхтекучем ^4He позволяет возбуждать атомы бария и наблюдать оптические спектры многочисленных линий электронных переходов бария с помощью лазерного излучения на длине волны 532 нм (диссоциирующий импульс). Энергия одного фотона на длине волны 532 нм ($18\,796\text{ см}^{-1}$) возбуждает атом бария в сверхтекучем гелии в состояние $6s6p\ ^1P_1$ ($18\,060\text{ см}^{-1}$). Из этого состояния атом релаксирует с излучением в основное состояние $6s^2\ ^1S$ (длина волны в вакууме 553.5 нм). В сверхтекучем гелии линия перехода сдвинута в синюю область спектра на -0.5 ± 0.08 нм. На Рисунке 3 изображена наблюдаемая в эксперименте спектральная линия перехода атома Ba для данного состояния.

Чувствительность спектральных приборов позволяет зарегистрировать малые концентрации атомов и ионов. Способ инъекции нейтральных примесей настолько эффективен, что удалось зарегистрировать излучение спектральной линии $5s^2\ ^1S_0 - 5s5p\ ^1P_1$ атома стронция Sr [20]. Концентрация примеси стронция в нашем образце составляла не более 0.8 %. Длина волны люминесценции в вакууме 460.73 нм, в сверхтекучем ^4He сдвинута на $+0.63 \pm 0.07$ нм [60]. Экспериментально измеренная линия в сверхтекучем ^4He сдвинута на $+0.46 \pm 0.08$ нм и приведена на Рисунке 4.

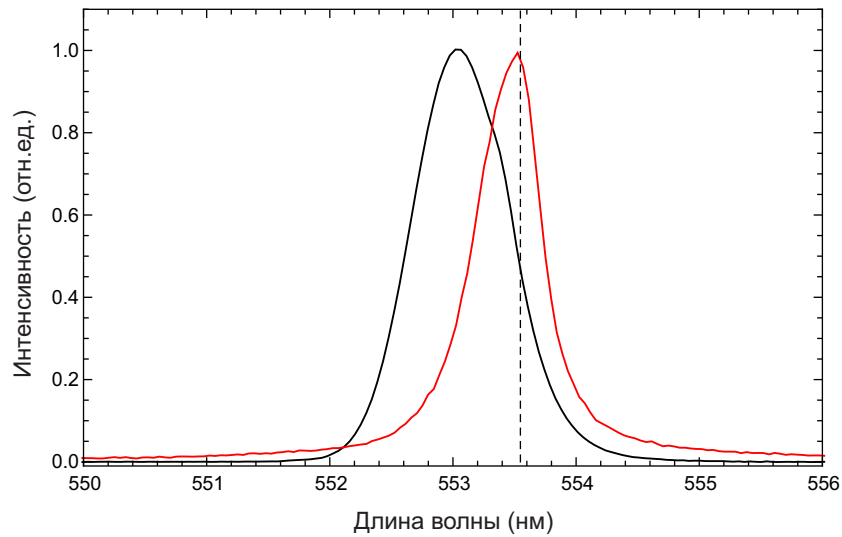


Рис. 3. Спектральная линия перехода (черная сплошная линия) $6s\ ^1S_0 - 6s6p\ ^1P_1$ атома Ва в жидком гелии. Красная сплошная линия - спектральная линия перехода, наблюдаемая в плазме. Пунктирной линией обозначен переход в вакууме $\lambda=553.55\text{ нм}$

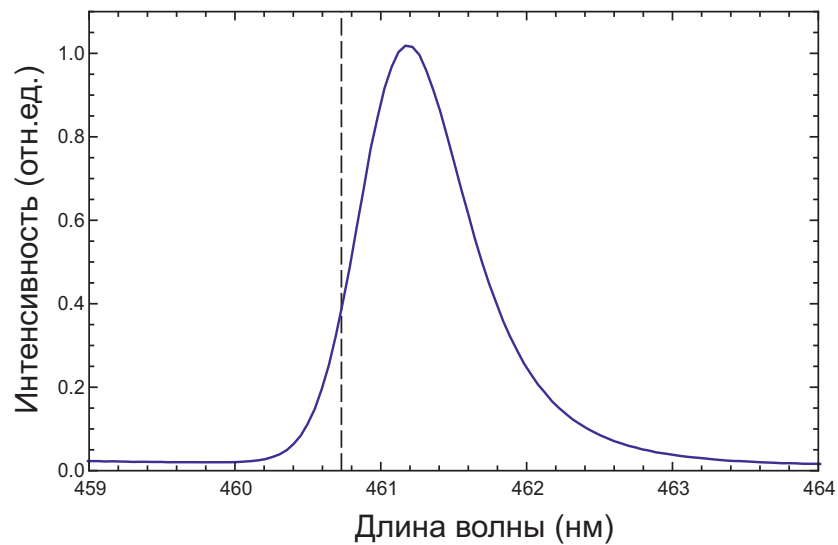


Рис. 4. Спектральная линия перехода $5s^2\ ^1S_0 - 5s5p\ ^1P_1$ атома Sr в сверхтекучем гелии. Стрелкой обозначен переход в вакууме

В Разделе 4.2 описываются мезоскопические структуры, наблюдаемые в сверхтекучем гелии. Экспериментальные наблюдения свидетельствует о том, что свободная поверхность жидкого He в вертикально ориентированном электрическом поле действует как эффективная двумерная ловушка для различных заряженных примесных частиц и, таким образом, значительно усиливает процесс их коалесценции и формирования сетей. На Рисунке 5 изображена одна такая сеть, локализованная под поверхностью сверхтекучего гелия. Рост такой сети занял время порядка одного часа с момента начала абляции мишени, напряженность электрического поля была $\approx 80\text{ В/см}$. Частота повторения лазерных импульсов - 2 Гц, потен-

циал мишени $U_{tar} = +100$ В, потенциал нижнего электрода $U_{plate} = 0$ В. Сеть электрически заряжена, так как один конец сети уходит вглубь жидкого гелия и прикреплен к нижнему электроду, и очень стабильна. На Рисунке 5 видно, что ветви дендритов, из которых преимущественно состоит данная сеть, указывают на разные направления и стремятся оттолкнуться от соседних ветвей.

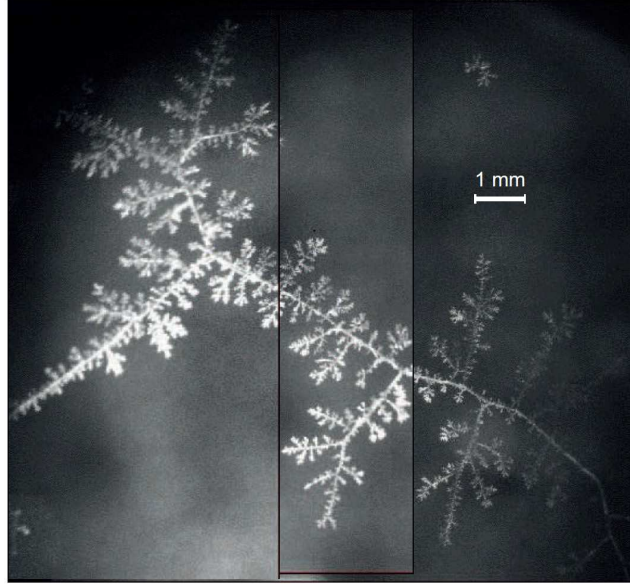


Рис. 5. Изображение сети Ва под свободной поверхностью сверхтекучего жидкого He, $U_{tar} = +100$ В, $U_{plate} = 0$, $T = 1.4$ К [A2]. Сеть освещается непрерывным синим лазером, снимок сделан через нижнее окно криостата и ячейки с образцом

В случае, когда нет прямого контакта таких сетей с нижним электродом, поведение сети становится более сложным. При той же полярности электрического поля (потенциал мишени $U_{tar} = +100$ В, потенциал нижнего электрода $U_{plate} = 0$ В) сети плавают вдоль поверхности и заряжены отрицательно. Поток частиц, генерируемых лазерным импульсом, и заряженных положительно, постепенно нейтрализует отрицательный заряд сетей. В этом случае различные сети начинают сближаться, и разрастаются, образуя еще большие структуры. Отдельные нити также участвуют в этом процессе. В какой-то момент конец такой сети начинает тонуть и касается нижнего электрода. Вся сеть мгновенно заряжается и распадается на фрагменты, состоящие из небольших сетей, после чего нити снова начинают сближаться и процесс повторяется.

Процесс динамического роста сети можно проиллюстрировать с помощью Рисунка 6. В момент времени $t=0$ (Рисунок 6 а)), сеть касается нижнего электрода и находится в максимально растянутом состоянии. Рисунки 6 б), с) и d) иллюстрируют процесс объединения сетей в моменты времени $t=1.3$, 1.8 и 2.3 с, соответственно. Процесс роста, изображенный на

Рисунке 6 – циклический и весь цикл в данном случае занимает 2.8 с.

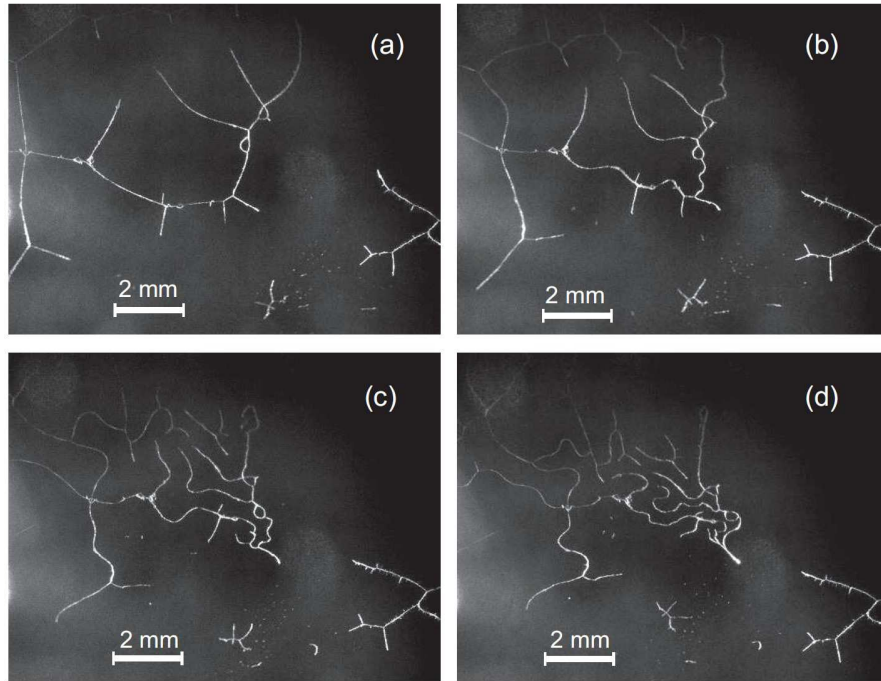


Рис. 6. Серия изображений, иллюстрирующих движение сети Ва под свободной поверхностью сверхтекучего He, $U_{tar} = +100$ В, $U_{plate} = 0$, $T = 1.4$ К [A2]. Сеть подсвечена непрерывным синим лазером, фотографии сделаны через нижнее окно ячейки. (а) Растянутая сеть в момент времени $t=0.7$ с после прикосновения к нижнему электроду; (b), (c), (d) сжатие сети в моменты времени $t = 1.3, 1.8$ и 2.3 с соответственно

Очевидно, что строительным материалом для роста сетей являются заряженные микрочастицы и заряженные нити, движение которых мы наблюдаем с помощью камеры. Сами микрочастицы и нити получаются вследствие коалесценции кластеров и/или отдельных атомов и ионов, образующихся в плазме при абляции мишени. Отдельные атомы и ионы, инжектированные в жидкий гелий, также могут образовывать кластеры в объеме жидкого гелия, а движение частиц играет важную роль для процесса формирования нитей и сетей.

При другой полярности приложенного электрического поля (потенциал мишени $U_{tar} = -200$ В, потенциал нижнего электрода $U_{plate} = +600$ В) многие из этих частиц выполняют повторяющееся движение между свободной поверхностью жидкого He и нижним электродом, которое мы называли челночным. Такой тип движения значительно подавляет процесс формирования нитей и сеток под поверхностью сверхтекучего гелия.

При абляции, как медной, так и бариевой мишени, структуры, которые получают в сверхтекучем гелии в виде нитей и сеток, очень похожи. Однако, в отличие от меди, барий быстро окисляется под воздействием атмосферы. Под микроскопом такие частицы выгля-

дят как кусочки нитей, состоящие из микрочастиц неправильной формы. Поэтому в работе представлены результаты исследования медных сетей, которые получаются в сверхтекучем гелии, методом сканирующей электронной микроскопии (SEM). Данные структуры достаточно стабильны. Типичные изображения, сделанные с помощью SEM, представлены на Рисунке 7.

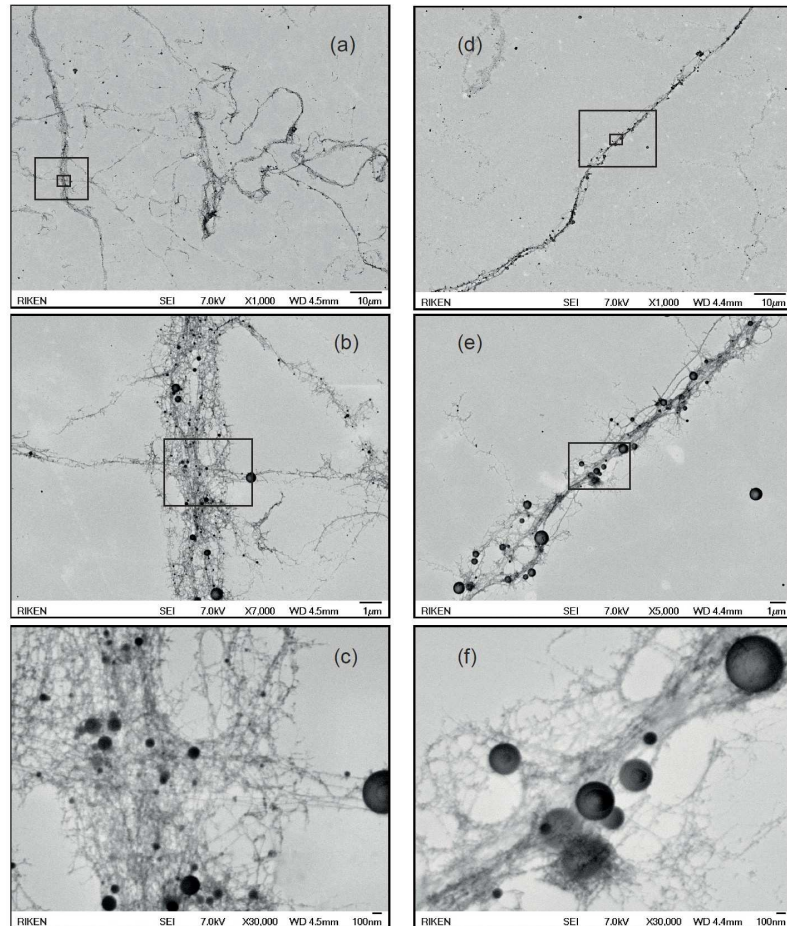


Рис. 7. Изображения медных нитей [A2], полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM), собранных с поверхности сверхтекучего He. (a) Изображение с небольшим увеличением 120×90 мкм; (b) увеличенное изображение левой области рисунка (a), 17×13 мкм; (c) увеличение центральной части рисунка (b), 4×3 мкм; (d) изображение с небольшим увеличением 120×90 мкм; (e) увеличенное изображение центральной части рисунка (d), 24×18 мкм; (f) увеличенное изображение центральной части из рисунка (e), 4×3 мкм. Черными прямоугольниками отмечена область увеличения

В верхнем ряду Рисунка 7 представлены изображения, сделанные с небольшим увеличением 120×90 мкм. На них изображены несколько длинных нитей. В среднем ряду этого же рисунка фрагменты двух из этих нитей масштабированы. Наконец, в нижнем ряду приведены изображения выделенных областей этих же нитей с большим увеличением.

На Рисунке 7 видно, что нити состоят из большого количества запутанных нанопроволок, шириной порядка 10 нм. В третьем ряду рисунка можно увидеть сферические частицы, которые соединены с нанопроволоками случайным образом, но встречаются и свободные сферические частицы. Анализируя множество увеличенных изображений подложки с медными сетями, можно построить распределение сферических наночастиц в зависимости от их размеров. Максимум в пике распределения сферических частиц по диаметру приходится на диапазон 60 – 80 нм. Распределение имеет довольно длинный шлейф, наиболее крупные из них имеют диаметр ≈ 500 нм.

В Разделе 3.3 описан метод генерации ионов бария в газе над поверхностью жидкого гелия с использованием лазерной абляции и радиочастотного разряда, а также явление электрического пробоя, которое сопровождает процесс внедрения ионов Ba^+ в сверхтекучий гелий при низких температурах.

Типичный спектр лазерно-индуцированной флуоресценции перехода D_1 ионов Ba^+ , инжектированных в жидкий гелий, и регистрируемый в жидком гелии на несколько мм ниже свободной поверхности, изображен на Рисунке 8. Линия излучения D_1 смещена на 2.4 нм ($+105 \text{ см}^{-1}$) относительно перехода свободного иона. Полная ширина на уровне половинной амплитуды (FWHM) составляет 2.0 нм (83 см^{-1}). Центральная длина волны наблюдаемой линии излучения соответствует $\lambda=491$ нм, что соответствует ранним наблюдениям [17]. В более ранних экспериментах разрешение монохроматора было равно 6.6 нм, и была применена деконволюция для того, чтобы получить ширину линии $\delta\lambda$ из экспериментальных спектров. Полученная ширина линии FWHM также согласуется с нашими результатами.

Пятая глава посвящена обсуждению полученных результатов. Обосновывается существование двумерной ловушки, значительно усиливающей коалесценцию заряженных частиц, роль которой выполняет свободная поверхность сверхтекучего гелия в вертикально ориентированном электрическом поле. Описывается процесс инжектирования ионов в жидкий гелий и структура окружения иона Ba^+ в сверхтекучем ^4He в приближении модели атомного «пузыря».

В Заключение диссертационной работы приведены основные результаты:

1. Апробирован метод внедрения отдельных атомов и ионов Ba^+ в сверхтекучий ^4He ;
2. Определена структура окружения иона Ba^+ в сверхтекучем ^4He в приближении модели атомного «пузыря»;
3. Исследован рост мезоскопических структур при наличии свободной поверхности гелия;

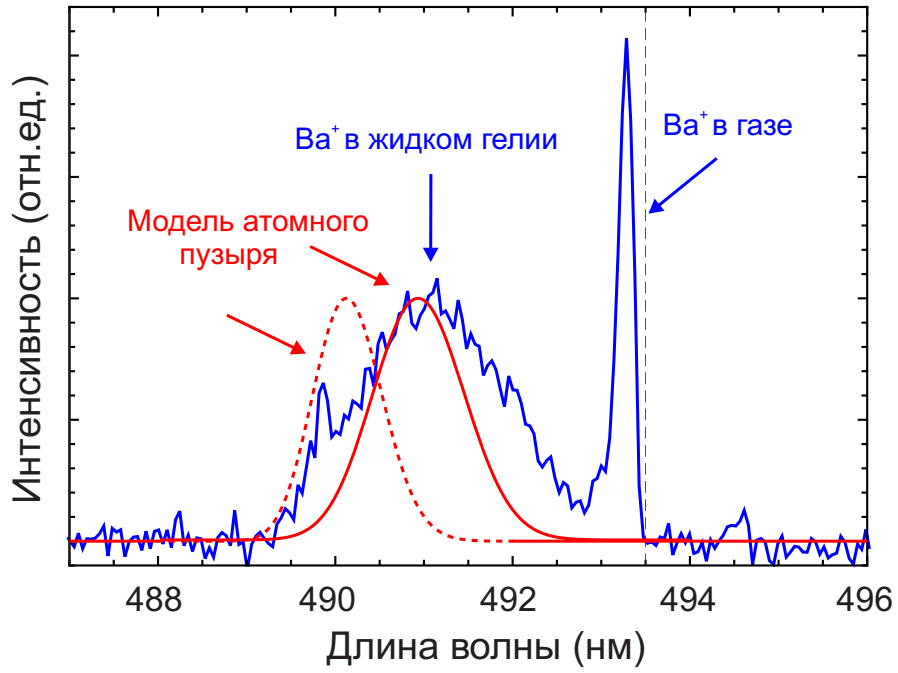


Рис. 8. Наблюдаемый спектр излучения ионов Ba^+ в сверхтекучем He. Переход D_1 ($6p^2P_{1/2} - 6s^2S_{1/2}$), $T = 2.13$ К, абляция на частоте 10 Гц, параметры разряда $f_{dis} = 3.3$ кГц, длительность импульса $\tau_{dis} = 10$ мкс, напряженность приложенного вертикально электрического поля $E_{\perp} = 3.2$ кВ/см. Красная кривая представляет собой расчетный спектр Ba^+ (см. Таблицу 1) в жидком He в рамках модели атомного «пузыря» (сплошная кривая для парных потенциалов [22, 57], пунктирная кривая для парных потенциалов [55, 56]). Вертикальная пунктирная линия указывает длину волны перехода D_1 свободного иона

Для получения основных результатов:

1. Реализована универсальная экспериментальная установка, позволяющая внедрять примесные атомы и ионы щелочных и щелочноземельных металлов в сверхтекучий ^4He и исследовать образуемые ими точечные дефекты и мезоскопические металлические структуры. Исследованы различные схемы абляции для инъекции нейтральных и заряженных примесей в сверхтекучий гелий: с использованием одного и нескольких лазеров и комбинацией методов лазерной абляции и радиочастотного разряда. Получены спектры атомов и ионов бария в сверхтекучем гелии. Внедрен метод очистки поверхности для инъекции примесей и абляции на малых мощностях;
2. Выполнен теоретический расчет оптических спектров поглощения и люминесценции иона бария в сверхтекучем гелии для перехода $^2S_{1/2} - ^2P_{1/2}$ в рамках модели атомного «пузыря» с учетом квадрупольных мод и использованием двух наборов парных потенциалов, что позволило описать структуру окружения иона Ba^+ в сверхтекучем гелии;

3. Предложен эксперимент по наблюдению поверхностных возбуждений в сверхтекучем гелии ^3He -В методом оптического детектирования спинового резонанса совместно с соавторами [A1]. Сделана оценка влияния рекомбинации ионов Ba^+ при абляции в жидкости. В процессе проведения экспериментов по локализации ионов бария под поверхностью сверхтекучего гелия ^4He был обнаружен механизм формирования сетей и нитей в приповерхностном слое сверхтекучего ^4He в электрическом поле, что привело к созданию двумерной ловушки для роста мезоскопических структур в сверхтекучем гелии.

Список публикаций автора по теме диссертации

- A1. Laser spectroscopy of Ba^+ ion in liquid He: Towards the detection of Majorana fermion surface state in superfluid $^3\text{He-B}$ / R. Batulin, P. Moroshkin, D. A. Tayurskii et al. // J. Low Temp. Phys. — 2014. — V. 175. — Pp. 63–69.
- A2. Metallic nanowires and mesoscopic networks on a free surface of superfluid helium and charge-shuttling across the liquid-gas interface / P. Moroshkin, R. Batulin, P. Leiderer, K. Kono // Phys. Chem. Chem. Phys. — 2016. — V. 18, No. 38. — Pp. 26444–26455.
- A3. Spectroscopy of Ba^+ ions in liquid ^4He / R. Batulin, P. Moroshkin, D. Tayurskii, K. Kono // AIP Advances. — 2018. — V. 8. — P. 015328.
- A4. Laser spectroscopy of Ba^+ ions in liquid He: Towards the detection of Majorana fermion surface state in superfluid $^3\text{He-B}$ / R. Batulin, P. Moroshkin, D. Tayurskii et al. // International Symposium on Quantum Fluids and Solids QFS2013. Conference Handbook. Abstracts. - Matsue 2013. - PS1.23.
- A5. Theoretical study of Ba^+ ion in superfluid helium / R. Batulin, P. Moroshkin, D. Tayurskii et al. // V Young Scientists Conference Problems of Theoretical Physics. Program&Proceedings. - Kyiv 2013. - P25.
- A6. Impurity ions at the surface of superfluid He / R. Batulin, P. Moroshkin, D. Tayurskii et al. // 27th International Conference on Low Temperature Physics. Book of Abstracts. - Buenos Aires 2014. - 0620.

Список литературы

- 1. Classification of topological insulators and superconductors in three spatial dimensions / A. P. Schnyder, S. Ryu, A. Furusaki, A. W. W. Ludwig // Phys. Rev. B. — 2008. — V. 78. — P. 195125.
- 2. Wilczek, F. Majorana returns / F. Wilczek // Nature Physics. — 2009. — V. 5. — Pp. 614–618.
- 3. Signatures of Majorana fermions in hybrid superconductor-semiconductor nanowire devices / V. Mourik, K. Zuo, S. M. Frolov et al. // Science. — 2012. — V. 336. — Pp. 1003–1007.
- 4. Volovik, G. E. Fermion zero modes at the boundary of superfluid $^3\text{He-B}$ / G. E. Volovik // JETP Lett. — 2009. — V. 90. — Pp. 398–401.
- 5. Silaev, M. A. Andreev-Majorana bound states in superfluids / M. A. Silaev, G. E. Volovik // J. Exp. Theor. Physics. — 2012. — V. 24, No.6. — Pp. 1042–1057.
- 6. Silaev, M. A. Majorana states and longitudinal NMR absorption in a $^3\text{He-B}$ film /

- M. A. Silaev // Phys. Rev. B. — 2011. — V. 84. — P. 144508.
7. Bunkov, Y. M. Observation of Majorana quasiparticles' edge states in superfluid ^3He / Y. M. Bunkov, R. R. Gazizulin // Applied Magnetic Resonance. — 2014. — V. 45. — Pp. 1219–1224.
 8. Okuda, Y. Surface Andreev bound states of superfluid ^3He and Majorana fermions / Y. Okuda, R. Nomura // J. Phys.: Condens. Matter. — 2012. — V. 24. — P. 343201.
 9. Surface specific heat of ^3He and Andreev bound states / H. Choi, J. P. Davis, J. Pollanen, W. P. Halperin // Phys. Rev. Lett. — 2006. — V. 96. — P. 125301.
 10. Bunkov, Y. M. Direct observation of a Majorana quasiparticle heat capacity in ^3He / Y. M. Bunkov // J. Low Temp. Phys. — 2014. — V. 175. — Pp. 385–394.
 11. Ikegami, H. Nonlinear transport of negative ions below a free surface of topological superfluid $^3\text{He-B}$ / H. Ikegami, S. B. Chung, K. Kono // J. Phys. Soc. Jpn. — 2013. — V. 82. — P. 124607.
 12. Ikegami, H. Nonlinear transport of positive ions below a free surface of topological superfluid $^3\text{He-B}$ / H. Ikegami, K. Kono // J. Low Temp. Phys. — 2014. — V. 175. — Pp. 718–724.
 13. Chung, S. B. Detecting the Majorana fermion surface state of $^3\text{He-B}$ through spin relaxation / S. B. Chung, S. C. Zhang // Phys. Rev. Lett. — 2009. — V. 103. — P. 235301.
 14. Nagato, Y. Strong anisotropy in spin susceptibility of superfluid $^3\text{He-B}$ film caused by surface bound states / Y. Nagato, S. Higashitani, K. Nagai // J. Phys. Soc. Jap. — 2009. — V. 78. — P. 123603.
 15. First mobility measurement of ions trapped below the normal and superfluid ^3He surface / T. Shiino, H. Mukuda, K. Kono, W. F. Vinen // J. Low Temp. Phys. — 2002. — V. 126. — Pp. 493–498.
 16. Johnson, W. W. Positive impurity ions in He II / W. W. Johnson, W. I. Glaberson // Phys. Rev. Lett. — 1972. — V. 29, No. 4. — Pp. 214–217.
 17. Spectroscopy of barium ions in He II / H. Reyher, H. Bauer, C. Huber et al. // Phys. Lett. A. — 1986. — V. 115, No. 5. — Pp. 238–244.
 18. Glaberson, W. I. Impurity ions in liquid helium / W. I. Glaberson, W. W. Johnson // J. Low Temp. Phys. — 1975. — V. 20. — Pp. 313–338.
 19. Cole, M. W. Structure of positive impurity ions in liquid helium / M. W. Cole, R. A. Bachman // Phys. Rev. B. — 1977. — V. 15, No. 3. — Pp. 1388–1394.
 20. Laser spectroscopy of alkaline earth atoms in He II / H. Bauer, M. Beau, B. Friedl et al. // Phys. Lett. A. — 1990. — V. 146, No. 3. — Pp. 134–140.
 21. Theoretical modeling of ion mobility in superfluid ^4He / S. L. Fiedler, D. Mateo, T. Aleksanyan, J. Eloranta // Phys. Rev. B. — 2012. — V. 86. — P. 144522.

22. Communication: Nucleation of quantized vortex rings in ^4He nanodroplets / D. Mateo, A. Leal, A. Hernando et al. // J. Chem. Phys. — 2014. — V. 140. — P. 131101.
23. Nanowire formation by gold nano-fragment coalescence on quantized vortices in He II / P. Moroshkin, V. Lebedev, B. Grobety et al. // Europhys. Lett. — 2010. — V. 90. — P. 34002.
24. Atkins, K. R. Ions in liquid helium / K. R. Atkins // Phys. Rev. — 1959. — V. 116, No. 6. — Pp. 1339–1343.
25. Müller, S. Alkali-helium snowball complexes formed on helium nanodroplets / S. Müller, M. Mudrich, F. Stienkemeier // J. Chem. Phys. — 2009. — V. 131. — P. 044319.
26. Solvation of Na^+ , K^+ , and their dimers in helium / L. A. der Lan, P. Bartl, C. Leidlmair et al. // Chem. Eur. J. — 2012. — V. 18. — Pp. 4411–4418.
27. Implantation of neutral atoms into liquid helium by laser sputtering / A. Fujisaki, K. Sano, T. Kinoshita et al. // Phys. Rev. Lett. — 1993. — V. 71, No. 7. — Pp. 1039–1042.
28. Electric properties of metallic nanowires obtained in quantum vortices of superfluid helium / E. B. Gordon, A. V. Karabulin, V. I. Matyushenko et al. // Low Temp. Phys. — 2010. — V. 36, No. 7. — Pp. 590–595.
29. Structure of metallic nanowires and nanoclusters formed in superfluid helium / E. B. Gordon, A. V. Karabulin, V. I. Matyushenko et al. // J. Exp. Theor. Phys. — 2011. — V. 112, No. 6. — Pp. 1061–1070.
30. Formation of metallic nanowires by laser ablation in liquid helium / V. Lebedev, P. Moroshkin, B. Grobety et al. // J. Low Temp. Phys. — 2011. — V. 165. — Pp. 166–176.
31. The electrical conductivity of bundles of superconducting nanowires produced by laser ablation of metals in superfluid helium / E. B. Gordon, A. V. Karabulin, V. I. Matyushenko et al. // Appl. Phys. Lett. — 2012. — V. 101. — P. 052605.
32. The nanostructures produced by laser ablation of metals in superfluid helium / E. B. Gordon, A. V. Karabulin, V. I. Matyushenko et al. // J. Low Temp. Phys. — 2013. — V. 172. — Pp. 94–112.
33. Structure and properties of platinum, gold and mercury nanowires grown in superfluid helium / E. B. Gordon, A. V. Karabulin, A. Morozov et al. // J Phys. Chem. Lett. — 2014. — V. 5. — Pp. 1072–1076.
34. Stability and structure of nanowires grown from silver, copper and their alloys by laser ablation into superfluid helium / E. Gordon, A. Karabulin, V. Matyushenko et al. // Phys. Chem. Chem. Phys. — 2014. — V. 16. — Pp. 25229–25233.
35. Experimental study of thermal stability of thin nanowires / E. B. Gordon, A. V. Karabulin, V. I. Matyushenko, I. I. Khodos // J. Phys. Chem. A. — 2015. — V. 119, No. 11. —

- Pp. 2490–2501.
36. Gomez, L. F. Traces of vortices in superfluid helium droplets / L. F. Gomez, E. Loginov, A. F. Vilesov // *Phys. Rev. Lett.* — 2012. — V. 108. — P. 155302.
 37. Formation of bimetallic core-shell nanowires along vortices in superfluid He nanodroplets / P. Thaler, A. Volk, F. Lackner et al. // *Phys. Rev. B.* — 2014. — V. 90. — P. 155442.
 38. Preparation of ultrathin nanowires using superfluid helium droplets / E. Latimer, D. Spence, C. Feng et al. // *Nano Letters.* — 2014. — V. 14. — Pp. 2902–2906.
 39. The impact of doping rates on the morphologies of silver and gold nanowires grown in helium nanodroplets / A. Volk, P. Thaler, D. Knez et al. // *Phys. Chem. Chem. Phys.* — 2016. — V. 18. — Pp. 1451–1459.
 40. Glaberson, W. I. Quantized vortices in superfluid helium-4 / W. I. Glaberson, K. W. Schwarz // *Physics Today.* — 2016. — V. 40, No. 2. — Pp. 54–60.
 41. Donnelly, R. J. Quantized vortices in helium II / R. J. Donnelly. — London: Cambridge University Press, 1991.
 42. Yarmchuk, E. J. Observation of stationary vortex arrays in rotating superfluid helium / E. J. Yarmchuk, M. J. V. Gordon, R. E. Packard // *Phys. Rev. Lett.* — 1979. — V. 43, No. 3. — Pp. 214–217.
 43. Bewley, G. P. SUPERFLUID HELIUM: Visualization of quantized vortices / G. P. Bewley, D. Lathrop, K. R. Sreenivasan // *Nature.* — 2006. — V. 441. — P. 588.
 44. Filament formation by impurities embedding into superfluid helium / E. B. Gordon, R. Nishida, R. Nomura, Y. Okuda // *JETP Lett.* — 2007. — V. 85, No. 11. — Pp. 581–584.
 45. Coagulation of metals in superfluid and normal liquid helium / E. B. Gordon, A. V. Karabulin, V. I. Matyushenko et al. // *J. Phys. Chem. A.* — 2017. — V. 121, No. 48. — Pp. 9185–9190.
 46. The role of vortices in the process of impurity nanoparticles coalescence in liquid helium / E. B. Gordon, A. V. Karabulin, V. I. Matyushenko et al. // *Chem. Phys. Lett.* — 2012. — V. 519–520. — Pp. 64–68.
 47. The nanowires growth by laser ablation of metals inside rotating superfluid helium / E. B. Gordon, M. I. Kulish, A. V. Karabulin et al. // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* — 2019. — V. 222–223. — Pp. 180–185.
 48. The nanowires growth by laser ablation of metals inside rotating superfluid helium / E. B. Gordon, M. E. Stepanov, M. I. Kulish et al. // *Laser Phys. Lett.* — 2019. — V. 16. — P. 026002.
 49. Berloff, N. Capture of an impurity by a vortex line in a Bose condensate / N. Berloff, P. H. Roberts // *Phys. Rev. B.* — 2000. — V. 63. — P. 024510.
 50. Kivotides, D. Interactions between particles and quantized vortices in superfluid helium /

- D. Kivotides, C. F. Barenghi, Y. A. Sergeev // Phys. Rev. B. — 2008. — V. 77. — P. 014527.
51. Sarma, S. Majorana zero modes and topological quantum computation / S. Sarma, M. Freedman, C. Nayak // NPJ Quantum inf. — 2015. — V. 1. — P. 15001.
 52. Tabbert, B. Optical investigation of impurities in superfluid ^4He / B. Tabbert, H. Günther, G. zu Putlitz // J. Low Temp. Phys. — 1997. — V. 109. — Pp. 653–707.
 53. Moroshkin, P. Atomic and molecular defects in solid ^4He / P. Moroshkin, A. Hofer, A. Weis // Phys. Rep. — 2008. — V. 469. — Pp. 1–57.
 54. Curry, J. J. Compilation of wavelengths, energy levels, and transition probabilities for Ba I and Ba II / J. J. Curry // J. Phys. Chem. Ref. Data. — 2004. — V. 33, No. 3. — Pp. 725–746.
 55. Fukuyama, Y. Laser-induced fluorescence spectra of $\text{Ba}^{+*}\text{-He}$ exciplexes produced in cold He gas / Y. Fukuyama, Y. Moriwaki, Y. Matsuo // Phys. Rev. A. — 2004. — V. 69. — P. 042505.
 56. Fukuyama, Y. Formation and dissociation of $\text{Ba}^{+*}\text{-He}$ exciplexes at 3–25 K / Y. Fukuyama, Y. Moriwaki, Y. Matsuo // Phys. Rev. A. — 2007. — V. 75. — P. 032725.
 57. Mella, M. Exciplexes with ionic dopants: Stability, structure, and experimental relevance of $\text{M}^{+}(^2\text{P})\ ^4\text{He}_n$ ($\text{M} = \text{Sr}, \text{Ba}$) / M. Mella, F. Cargnoni // J. Phys. Chem. A. — 2014. — V. 118. — Pp. 6473–6483.
 58. Dynamics of photoexcited Ba^{+} cations in ^4He nanodroplets / A. Leal, X. Zhang, M. Barranco et al. // J. Chem. Phys. — 2016. — V. 144. — P. 094302.
 59. Demtroder, W. Laser spectroscopy / W. Demtroder. — Berlin: Springer-Verlag, 2001.
 60. Implantation of atoms into liquid helium for the purpose of impurity spectroscopy / H. Bauer, M. Beau, A. Bernhardt et al. // Phys. Lett. A. — 1989. — V. 137, No. 4,5. — Pp. 217–224.