

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

на правах рукописи

Голик

Голик Александр Вячеславович

Распространение и взаимное преобразование высокочастотных
акустических и электромагнитных волн в диэлектрических
кристаллах, нормальном металле и аморфных магнетиках
при низких температурах

01.04.07 - физика твердого тела

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

Харьков - 1995 г.



00755158 (V) *копією рукопису.*

Ав 33.992

Робота виконана в Інституті радіофізики і електроніки
Национальной Академии наук Украины.

Официальные оппоненты:

- член-корреспондент НАН Украины,
доктор физико-математических наук
профессор Слэзов В.В.
- доктор физико-математических наук,
профессор Филь В.Д.
- доктор физико-математических наук,
профессор Ермолзев А.М.

Ведущая организация: Донецкий физико-технический
институт НАН Украины

Защита состоится 9 января 1996 г. в 14 часов на заседа-
нии Специализированного совета Д 02.35.02 при Физико-тех-
ническом институте низких температур им.Б.И.Веркина НАН
Украины, ЗІОІ64, г.Харьков-І64, пр.Ленина, 47.

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

Автореферат разослан *4 декабря* 1995 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью,
заверенной Гербовой печатью, просим направлять по адресу:
ЗІОІ64, г.Харьков-І64, пр.Ленина, 47, ФТИНГ НАН Украины,
ученому секретарю Специализированного совета Д 02.35.02

Ученый секретарь Специализированного совета
доктор физико-математических наук

А.С.Ковалев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Прогресс исследований в области физики твердого тела обусловлен одновременно несколькими факторами: непрерывное развитие, усовершенствование известных методов исследований; достижение ранее недоступных экспериментальных условий, а также появление принципиально новых методов и объектов.

Достижения в синтезе диэлектрических кристаллов позволили вырастить совершенные монокристаллы кварца, сапфира и других веществ с поперечными размерами в десятки сантиметров и обладающих чрезвычайно малыми акустическими и диэлектрическими потерями. При криогенных температурах акустические и электромагнитные колебания в этих кристаллах могут распространяться на значительные расстояния на частотах дециметрового и сантиметрового диапазонов. Такие высокие характеристики совершенных диэлектрических монокристаллов позволили разработать принципиально новые акустоэлектронные и электродинамические устройства и приборы, нашедшие широкое применение в радиоэлектронике. Развитие физики и техники СВЧ позволило реализовать эти устройства на частотах вплоть до мм и субмм диапазонов.

Одним из актуальных направлений продолжает оставаться создание устройств динамической памяти на акустических волнах - ультразвуковых линий задержки (УЛЗ). Самой большой динамической памятью среди УЛЗ обладают т.н. многогранные УЛЗ, имеющие вид многогранной призмы, симметрия которых основана на свойствах рациональных полигональных бильярдов. Однако, продолжала оставаться нерешенной в общем случае проблема расчета полигональных конфигураций для случая использования анизотропных диэлектрических кристаллов. Эта проблема послужила отправной точкой выполнения цикла работ, составивших I и II главы диссертационной работы - нахождение методов отображения двумерных рациональных полигональных бильярдов с изотропными свойствами на анизотропные случаи. Решение этой проблемы в общем виде позволило обобщить известные свойства бильярдов на анизотропный случай, а также рассчитывать произвольные полигональные конфигурации из анизотропных кристаллов и в то же время потребовало выполнения цикла работ по

определению акустических характеристик синтетического пьезокварца с абсолютной точностью не хуже 10^{-4} . Этот кристалл нашел широкое применение для изготовления различных акустических устройств, однако в литературе фактически отсутствовали данные о модулях упругости, пьезоэлектрических и диэлектрических постоянных синтетического пьезокварца при криогенных температурах, охлаждение до которых позволяет реализовать высокие акустические параметры кварца.

Проблема создания высокодобротных резонаторов, обладающих разреженным спектром и небольшими габаритами, по-прежнему является актуальной для твердотельной радиофизики СВЧ. Попытки решения этой проблемы привели к созданию открытых диэлектрических кольцевых резонаторов (ДКР), обладающих предельно высокими добротностями в мм и субмм диапазонах, недостижимыми другими типами резонаторов - объемными и сверхпроводящими. Однако, реализация предельных добротностей ДКР предъявляет весьма жесткие требования к материалу кольца и точности его изготовления. Другой "классической" формой диэлектрического резонатора, в котором существуют высокодобротные колебания типа "шепчущей галереи", является шар - диэлектрический шаровой резонатор (ДШР). Резонансные свойства ДШР из изотропного диэлектрика хорошо изучены, однако, как отмечалось выше, предельно малыми углами диэлектрических потерь обладают сапфир и рубин - оптически одноосные кристаллы, т.е. их диэлектрические свойства являются анизотропными. В связи с этим представляется актуальным исследование ДШР из оптически одноосного кристалла с целью установления факта существования в них высокодобротных колебаний и оценка их спектральных свойств.

К началу 80-х годов в физике нормальных металлов были выполнены обширные разделы исследований высокочастотными магнитоакустическими и электродинамическими методами, однако продолжал оставаться открытым вопрос о высокочастотных исследованиях электромагнитного возбуждения и регистрации акустических волн. Отдельные работы по наблюдению этого явления в сильных магнитных полях, а также одна работа по "геометрическому резонансу" Пипшарда в меди и серебре выполнялись с использованием автодинных методик и не могли составить полную физическую картину. В связи с этим представляется

актуальной разработкой высокочастотной экспериментальной методики и проведение исследований электромагнитной генерации звука в широкой области частот и магнитных полей, а также изучение поляризационных эффектов и особенностей электромагнитного возбуждения звука в условиях магнитоакустических резонансов.

Пополнившие недавно список аморфных материалов аморфные металлы и сплавы привлекли к себе пристальное внимание в силу многих замечательных качеств, обусловивших их широкое применение уже сегодня. Области использования аморфных веществ быстро расширяются, а технологические разработки, направленные на создание массивных образцов и получение сплавов с заранее заданными свойствами, проводятся чрезвычайно интенсивно. Все это послужило мощным толчком для возникновения и развития физики аморфных конденсированных тел. С конца 70-х годов такой мощный метод исследования локальных магнитных полей, как электронный магнитный (спиновый) резонанс, стал использоваться и для изучения неупорядоченных магнетиков. Проведенные исследования показали наличие универсальных зависимостей в поведении магниторезонансных линий в области частот и температур, когда энергия кванта электромагнитного поля $\hbar\omega$ меньше энергии теплового движения kT . Эти результаты были качественно интерпретированы в рамках модели магнитных двухуровневых систем, однако в ряде работ были обнаружены существенные отклонения от этих универсальных зависимостей в области $\hbar\omega \approx kT$. Все обстоятельства свидетельствуют об актуальности выполнения цикла магниторезонансных исследований металлических стекол на основе железа в области физического эксперимента от $\hbar\omega \ll kT$ до $\hbar\omega \approx kT$.

Основные цели работы являлись:

- разрабатывались методы отображения задач о движении луча внутри области с анизотропными свойствами на изотропные бильбарды;
- исследование лучевых потоков и спектральных характеристик ДИР из оптически одноосного монокристалла;
- экспериментальное исследование взаимного преобразования акустических и электромагнитных волн в пластине вольфрама на частотах 50-500 МГц в постоянном магнитном поле;
- исследование аморфных магнетиков, в том числе вольтратных соединений стекол, методом магнитного резонанса в 4-м квадранте

зове длин волн при температурах 0,3-150 К.

Научная новизна результатов работы состоит в том, что впервые:

- рассмотрены задачи о движении луча внутри двумерных и трехмерных областей с анизотропными свойствами, обобщены свойства изотропных билиардов на анизотропный случай;
- определены типы каустики, образуемых потоком несфокусированного луча в анизотропном диэлектрическом шаре, установлено существование квазидвумерных колебаний в ДШР;
- предложен квазиоптический метод измерения предельно малых диэлектрических потерь в конденсированных средах, с помощью которого обнаружены диэлектрические потери в жидком гелии-4;
- разработана методика и проведены экспериментальные исследования взаимного преобразования акустических и электромагнитных волн в нормальном металле - вольфраме. Изучены основные механизмы преобразования, обнаружены и исследованы резонансные и поляризационные эффекты в преобразовании волн, а также обнаружен "наклонный" эффект в электрон-фононном взаимодействии в условиях пространственной дисперсии;
- обнаружена аномалия магнитных свойств сплавов системы Fe-B с концентрациями, близкими к эвтектической, и обусловленная сменой характера упаковки кластеров;
- показано, что в аморфном магнетике в области температур $T < 1\text{К}$ на частотах 4-мм диапазона длин волн происходит смена механизма поглощения энергии электромагнитной волны магнитными двухуровневыми системами.

Научное и практическое значение диссертационной работы состоит в том, что:

- найденные методы отображения анизотропных билиардных систем являются обобщением теории динамических систем на анизотропный случай;
- предложенный квазиоптический метод измерения предельно малых диэлектрических потерь в конденсированных средах открыл принципиально новые возможности изучения релаксационных процессов в диэлектрических кристаллах, квантовых жидкостях и квантовых кристаллах;
- результаты исследования взаимного преобразования акустических и электромагнитных волн в вольфраме существенно дополнили и расширили представления о высокочастотной акустике и

электродинамике сверхчистых нормальных металлов;

- результаты исследований аморфных магнетиков представляют собой существенный вклад в развитие единого подхода к описанию структуры неупорядоченных твердых тел, в частности аморфных магнетиков на основе железа.

Достоверность результатов работы обеспечена их сравнением в предельных случаях с известными литературными данными, они не противоречат общезначимым принципам и известным моделям.

Основные научные результаты и положения, выносимые на защиту заключаются в следующем:

I. Проведен цикл исследований динамики луча с поперечной поляризацией внутри анизотропной области с идеально отражающей границей.

I.1 Найдены изоморфные (взаимно-однозначные) отображения бильярдов внутри двумерных областей с изотропными свойствами и ограниченных рациональной полигональной или кусочно-гладкой границей на динамику луча с поперечной поляризацией внутри области с анизотропными свойствами. С помощью отображений обобщены основные свойства этих плоских бильярдов на анизотропный случай: установлено существование периодических и непериодических траекторий, продемонстрировано влияние анизотропии на расположение и форму каустик, а также на сдвиг границы стохастичности.

I.2 На основе изоморфного отображения области, ограниченной кривой, пропорциональной географу групповой скорости, разработан метод расчета произвольных полигональных звукопроводов из диэлектрических монокристаллов.

I.3 Определены упругие характеристики: модули упругости, пьезоэлектрические и диэлектрические постоянные, синтетического пьезокварца при температуре 4,2 К, а также их температурные зависимости в интервале температур 4,2 К + 60 К.

2. Выполнен цикл исследований диэлектрического шарового резонатора из оптически одноосного монокристалла.

2.1 На основе изоморфных отображений бильярда внутри области с алгебраической границей и численных расчетов установлены типы каустик, образуемых потоками необширенного луча внутри шара, выделенного из оптически одноосного (двухосного или отрицательного) монокристалла - диэлектрическо-

го шарового резонатора (ДШР). Показано, что внутри такого ДШР существуют потоки, распространяющиеся в условиях полного внутреннего отражения (типа "шепчущей галереи") и формирующие высокочастотные моды колебаний.

С помощью численного анализа дисперсионного уравнения для свободного диэлектрического шара установлено, что измеренные спектры мод, локализованных вблизи центрального сечения ДШР, перпендикулярного оптической оси кристалла, имеют эквидистантный характер. Т.е., в ДШР, выполненном из одноосного кристалла, существуют квазидвухмерные высокочастотные колебания.

2.2 На основе результатов п.2.1 предложен квазиоптический метод измерений предельно малых диэлектрических потерь в конденсированных средах, основанный на использовании в качестве измерительного резонатора ДШР из монокристалла с малыми диэлектрическими потерями при криогенных температурах, например, сапфира. С помощью этого метода впервые обнаружены потери в жидком ^4He и измерена их аномалия в области сверхтекучего λ -перехода.

3. Выполнен цикл работ по изучению взаимного преобразования высокочастотных акустических и электромагнитных волн в пластине нормального металла.

3.1 Разработана высокочастотная экспериментальная методика исследования взаимного преобразования акустических и электромагнитных волн в пластине нормального металла, в том числе и методика прямых поляризационных измерений.

3.2 В нелокальном пределе впервые реализовано взаимное преобразование электромагнитная волна - звук в условиях доплер-сдвинутого акустического циклотронного и доплерон-фонового резонансов. Экспериментально показано, что в широкой области магнитных полей преобразование обусловлено одновременным действием индукционных и деформационных сил взаимодействия электронов с решеткой.

Обнаружены и объяснены эффекты монотонного и резонансного поворота плоскости поляризации и эллиптичности возбуждаемой акустической волны.

Определена длина затухания собственной электромагнитной моды вольфрама - σ -доплерона.

В сильных магнитных полях (локальный предел) обнаружен и

объяснен пространственный резонанс глубины скин-слоя и длины акустической волны, приводящий к максимуму в полевой зависимости амплитуды возбуждаемого звука.

Обнаружен эффект "отклонения" ("tilt"-эффект) в поглощении звука в нелокальном пределе (в малых магнитных полях) и определены фермиевские скорости электронов в вольфраме в кристаллографическом направлении [010].

4. Выполнен цикл магниторезонансных исследований аморфных магнитных металлических соединений.

4.1 Разработана методика измерений электронного спинового резонанса в аморфных магнетиках в мм радиодиапазоне в интервале температур $0,3 + 150$ К. Разработан новый тип рефрижератора растворения $^3\text{He}-^4\text{He}$ для высокочастотных радиофизических исследований при $T \leq 0,1$ К.

4.2 Исследованы динамические магнитные свойства аморфной системы Fe-B. Обнаружено, что для сплавов с концентрацией B, близкой к эвтектической, имеет место аномалия магнитных параметров (g -фактора и M_s - намагниченности насыщения), коррелирующая с аномалией механических свойств и связанная с изменением характера упаковки кластеров.

4.3 Изучены магниторезонансные свойства возвратных аморфных магнетиков $(\text{Fe}_x\text{Ni}_{100-x})_{77}\text{B}_{13}\text{Si}_{10}$ и в результате анализа экспериментальных данных в рамках модели магнитных двухуровневых систем показано, что переход от $\hbar\omega < kT$ к $\hbar\omega \geq kT$ сопровождается сменой основного механизма температурного уширения резонансной линии. Обнаружено резонансное поглощение в комплексе слабосвязанных магнитных центров, возникающем в окрестности тройной точки магнитной фазовой диаграммы.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались или были представлены на: 22-м Всесоюзном совещании по физике низких температур (Кишинев, 1982), Всесоюзной конференции по квантовой акустике и акустоэлектронике (Саратов, 1983), Всесоюзных семинарах по низкотемпературной физике металлов (Донецк, 1981 и 1983 г.г.), Международной конференции EMMA-83 (Словакия, Кошице, 1983), Международных конференциях PIERS-93 и PIERS-95 (Вашингтон, США).

Структура работы. Диссертация содержит 316 стр., 95 рисунков, 8 табл. Список литературы содержит 232 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во Введении приведен анализ тех проблем физики твердого тела, решение которых выполнено высокочастотными акустическими и электромагнитными методами в диссертационной работе, сформулированы цели и задачи работы, кратко изложено содержание диссертации. Здесь же содержатся положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена исследованию динамики акустических (оптических) лучей внутри плоской двумерной области с анизотропными свойствами с помощью изоморфных отображений на бильярды с изотропными свойствами. Известно, что многие физические явления могут быть описаны и исследованы с помощью бильярдов. Под бильярдами обычно понимают динамическую систему, описывающую свободное движение с единичной скоростью точечной массы внутри односвязной области с дифференцируемой границей и упругим законом отражения от границы. Описание динамики луча внутри однородной области с идеально отражающими стенками является одной из задач, сводимых к бильярду. Бильярдные задачи обычно, например [1,2], рассматриваются в приближении изотропного пространства, когда скорость луча не зависит от направления распространения, а отражение от границы описывается первым законом Снелиуса - угол падения равен углу отражения. В то же время, диэлектрические кристаллы: кварц, рубин, сапфир, - обладающие чрезвычайно малыми акустическими и диэлектрическими потерями, являются анизотропными как для акустических, так и для оптических мод колебаний. Сложность расчета траектории луча внутри анизотропного монокристалла заключена прежде всего в том, что в анизотропной среде направление луча (групповой скорости, вектора Пойнтинга) в общем случае не совпадает с направлением волнового вектора, а отражение от границы описывается вторым законом Снелиуса - условием непрерывности тангенциальной компоненты волнового вектора в точке отражения. И если учесть, что бильярды с изотропными свойствами в общем случае принадлежат к недифференцируемым гамильтоновым системам, то становится очевидной сложность задач о бильярдах с анизотропными свойствами.

В первой задаче, давшей толчок исследованиям бильярдов

с анизотропными свойствами, разработан метод расчета полигональной конфигурации для пьезоактивной моды, распространяющейся в плоскости YZ кварца, изучены возможности термокомпенсации времени распространения для различного числа боковых граней. Однако, эта методика не позволяет рассчитывать конфигурации, в которых луч отражается от некоторых из боковых граней несколько раз (т.е. многозаходная система ходов луча). Многозаходная система ходов луча реализуется в изотропных бильярдах (звукопроводах) поскольку они базируются на свойствах симметрий правильных многогранников, описанных вокруг окружности, и фигуры, образованные отражениями луча, состоят из кусков различных периодических траекторий внутри окружности. Следовательно, необходимо найти аналоги полигональных бильярдов для случая, когда скорость распространения луча зависит от направления его распространения. Поскольку рассматривается задача о распространении луча (переносе энергии), было изучено распространение луча внутри области, ограниченной кривой, пропорциональной географу групповой скорости распространяющегося луча. Было доказано, что при распространении чистой поперечной моды в плоскости кристалла, ограниченной поверхностью, пропорциональной радиус-вектору групповой скорости, время распространения или эквивалент на отрезках между двумя последовательными отражениями есть величина постоянная для данных начальных условий движения. Фактически найдено взаимнооднозначное (изоморфное) отображение динамики луча на изотропный бильярд в круге. Этот результат является обобщением на анизотропный случай теоремы, которую иногда называют теоремой Якоби, о движении луча в изотропном круге, на которой основана геометрия многогранных звукопроводов из изотропных материалов. Продемонстрировано применение найденного метода для расчета полигонального звукопровода из монокристаллического кварца.

В последующем было изучено влияние анизотропии на динамику луча в том случае, когда задача сводится к рассмотрению бильярда в эллипсе, а также в случае произвольной дифференцируемой границы. Рассмотрено движение чистой поперечной непьезоактивной моды колебаний, вектор поляризации которой перпендикулярен плоскости распространения. Показано, что аффинные преобразования системы координат и скорости движения

луча с коэффициентом преобразования равным отношению максимальной и минимальной скоростей луча являются изоморфным отображением на бильярд с изотропными свойствами. Это позволяет установить ряд важных особенностей луча с поляризацией, перпендикулярной двумерной анизотропной плоскости распространения: наличие периодических траекторий, существование и форму каустик, а также позволяет определить области и условия эргодического или стохастического движения луча.

1. Известно, что область фазового пространства динамической системы, заполненная стохастическими траекториями, характеризуется положительной К-энтропией [3,4], величина которой определяется только формой границы для бильярдов с одной материальной точкой, движущаяся с постоянной скоростью [5,6]. В силу линейности найденных изоморфных преобразований следует, что для двумерной области переход от постоянной к зависящей от направления скорости луча не приводит к изменению знака эффективной кривизны границы. Регулярные участки границы с положительной, отрицательной или нулевой (по отношению к внешней нормали) кривизной остаются соответственно рассеивающими, фокусирующими либо нейтральными для узкого пучка траекторий, падающих на границу. Изменение эффективной кривизны границы и величин эйконолов внутри рассматриваемой области в общем случае должно изменить соотношение времен, в течение которых пучок находится на растягивающих и фокусирующих участках, что приведет к изменению величины К-энтропии и соответствующему сдвигу границы стохастичности.

2. В замкнутой выпуклой анизотропной области всегда имеются 2 периодические траектории луча с числом звеньев $n=2$. Траектория, которая характеризуется большим эйконалом (большей длиной пути в изотропном отображении), всегда является неустойчивой, а траектория с меньшим эйконалом может быть устойчивой или неустойчивой [1].

3. В любой выпуклой анизотропной области, ограниченной замкнутой кривой, существуют периодические траектории с любым числом звеньев $n \geq 3$, устойчивость которых может быть проанализирована известными методами [1,2] в изотропном отображении.

4. Существование каустик, образуемых непериодическими траекториями, и их свойства могут быть установлены и проанализи-

рованы по изотропным отображениям известными методами, например [7,8]. Расположение каустик в анизотропной области может отличаться от таковых в изотропной области с такой же границей, поскольку оно определяется не только последней и начальными условиями движения луча, но и величиной анизотропии.

Результаты I.+4. проиллюстрированы на бильярдах с эллиптической границей и бильярде типа "стадион".

Найденные методы расчета полигональных бильярдов (звукопроводов) сделали возможным расчет их конфигураций с точностью, зависящей только от точности определения модулей упругости, пьезоэлектрических констант и диэлектрических постоянных, определяющих скорость звука в материале звукопровода. Поэтому в синтетическом пьезокварце были измерены величины и температурные зависимости в интервале $4,2+80$ К фазовых скоростей продольной и поперечной акустических мод в различных кристаллографических направлениях, а также коэффициенты теплового расширения вдоль кристаллографических осей. По экспериментальным данным определены значения модулей упругости и пьезоэлектрических постоянных при $4,2$ К, а также их температурные зависимости в интервале $4,2+80$ К.

Вторая глава посвящена исследованию ДШР из оптически одноосного кристалла, а также описан новый квазиоптический ДШР-метод измерения предельно малых диэлектрических потерь в конденсированных средах при низких температурах и приведены результаты первого наблюдения аномалии диэлектрических потерь в жидком гелии в области λ -перехода.

В основу численных расчетов траекторий необыкновенного луча внутри шара был положен инвариантный метод [9], позволяющий сформулировать все законы распространения, отражения и преломления света в анизотропных кристаллах в форме, не связанной с выбором конкретной системы координат. С помощью этого метода, задав на сфере начальные координаты движения луча и ориентацию единичного вектора волновой нормали, можно простым табулированием рассчитать ломаную траекторию, определить каустики и тем самым качественно характеризовать лучевые потоки, определяющие основные типы колебаний.

Проведенный численный анализ показывает, что анизотропия диэлектрической проницаемости для необыкновенного луча при-

водит к качественно иной картине его движения по сравнению с обыкновенным лучом. Из симметрии задачи видно, что в ДШР выделенным является только одно направление - оптическая ось Z , -и, поскольку анизотропия фазовой и групповой скоростей необыкновенного луча в меридианальной плоскости (содержащей ось Z) совпадает с анизотропией скорости акустического луча в задачах, рассмотренных в первой главе, фактически оказывается, что задача о движении необыкновенного луча в этой плоскости была рассмотрена ранее. В случае трехмерного движения ключевым является соотношение между компонентами тензора диэлектрической проницаемости ϵ_o и ϵ_e , определяющими значения скоростей обыкновенного и необыкновенного лучей в плоскости, перпендикулярной Z . Согласно результатам главы I это соотношение определяет расположение фокусов эллипса отображения, возникающего вследствие аффинного преобразования границы, - на оси Z для оптически отрицательного кристалла или в плоскости, перпендикулярной оси Z , для оптически положительного кристалла. Для оптически одноосного положительного кристалла множество фокусов эллипса отображения лежит в центральном сечении, перпендикулярном оси Z и образует окружность радиусом $r=R(1-\epsilon_o/\epsilon_e)^{1/2}$. Софокусные множеству эллипсов отображения гиперболы образуют множество однополостных гиперboloидов вращения и определяющими тот или иной тип каустики, образуемой при трехмерном движении луча, являются координаты точки пересечения луча с плоскостью $Z=0$. Если точка пересечения лежит внутри окружности радиусом $r=R(1-\epsilon_o/\epsilon_e)^{1/2}$, то каустическими поверхностями, ограничивающими лучевые потоки, являются два однополостных гиперboloида вращения, между которыми лежит область, заполняемая траекториями луча. При пересечении начальным лучом плоскости $Z=0$ внутри кольца $R(1-\epsilon_o/\epsilon_e)^{1/2} < r < R$, потоки необыкновенного луча образуют каустику, ограниченную однополостным гиперboloидом и сфероидом. В отличие от положительного кристалла, в шаре из отрицательного кристалла существует единственный тип объемного потока необыкновенного луча. Он образует каустику, ограниченную внутри сфероидом и двуполостным гиперboloидом. Меридианальное сечение этой каустики ограничено софокусными эллипсом и гиперболами, фокусы которых расположены в точках $Z_f = \pm R(1-\epsilon_o/\epsilon_e)^{1/2}$.

Важным результатом этих исследований явилось установление факта существования лучевых потоков, испытывающих полное внутреннее отражение. Причем соответствующими начальными условиями эти потоки можно локализовать вблизи сечения $Z=0$ и сформировать квазиодномерные высокочастотные колебания с разреженным спектром. Для проверки этого утверждения были выполнены измерения и расчеты спектров собственных электромагнитных мод ДШР, локализованных вблизи плоскости $Z=0$. Было экспериментально определено, что ДШР, изготовленные из совершенных монокристаллов сапфира и кварца, возбуждаются в одномодовом режиме, т.е. при свипировании частоты наблюдаются эквидистантные по частоте резонансы прохождения сигнала в системе - излучающая антенна, ДШР, приемная антенна, - только при расположении антенн в плоскости $Z=0$ и при ориентациях, соответствующих поляризации либо обыкновенной либо необыкновенной волны. Для идентификации измеренных спектров были выполнены расчеты спектров электромагнитных резонансов свободной изотропной диэлектрической сферы для TE_{nmr} и TM_{nmr} мод.

Совокупность полученных в работе результатов показывает, что в ДШР из одноосных диэлектрических кристаллов существуют сверхвысокочастотные колебания, локализованные в узких "полосках" вблизи центрального сечения ДШР, а спектр этих колебаний близок к эквидистантному спектру квазиодномерных азимутальных колебаний диэлектрического кольцевого резонатора.

На основе полученных результатов в работе был предложен и реализован квазиоптический ДШР-метод измерения предельно малых диэлектрических потерь в конденсированных средах. Идея метода ДШР заключается в том, чтобы возбуждая в шаре множество различных, обладающих малыми радиационными потерями, собственных колебаний, регистрировать затухание таких колебаний, которые обладают максимальным временем жизни, и по их затуханию определять уровень поглощения электромагнитного поля, не связанный с радиационными потерями за счет неоднородностей. Метод был реализован при измерении диэлектрических потерь в кристалле розового рубина при низких температурах на частоте 36,7 ГГц и получены значения $t_{9\delta}$ соответственно $3,3 \cdot 10^{-7}$ и $6 \cdot 10^{-8}$ при температурах 78 К и 15 К. Эти данные хорошо согласуются с данными [10,11], полученными с помощью диэлектрического кольцевого резонатора, изготовлен-

ного из особо совершенного монокристалла.

Поскольку ДШР является открытой электродинамической структурой, часть электромагнитного поля собственных мод расположена вне шара. Поэтому при размещении ДШР не в вакууме, а в конденсированной среде, именно потери в последней будут определять нагруженную добротность ДШР. Эта идея была реализована при измерении угла диэлектрических потерь в жидком гелии вблизи λ -перехода. Поскольку в эксперименте добротность сапфирового ДШР в вакууме более чем на порядок превышала его добротность при погружении в жидкий гелий, то именно потери в последнем и определяли добротность ДШР. Было установлено, что в довольно широкой области температур вблизи λ -точки наблюдается значительное увеличение диэлектрических потерь, при котором $\tan \delta_{\text{He}}$ возрастает с $3,4 \cdot 10^{-5}$ при 4,2 К до 10^{-5} при 2,17 К. Важно отметить, что вне области λ -перехода поглощение несимметрично по температуре, т.к. $\tan \delta_{\text{He}}$ равен $4,4 \cdot 10^{-6}$ для сверхтекучего состояния ^4He .

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям взаимного преобразования акустических и электромагнитных волн в пластине нормального металла - вольфраме, - в постоянном магнитном поле. Эффекты преобразования электромагнитных и акустических волн, обусловленные взаимодействием электронов проводимости с электромагнитной волной и кристаллической решеткой в условиях слабой пространственной неоднородности, когда справедливо неравенство $q_1 l < 1$ (\vec{q} - волновой вектор звука, l - длина свободного пробега электронов проводимости), изучались во многих экспериментальных и теоретических работах. Достаточно полные сведения о них представлены в обзорах [12,13]. В то же время особый интерес представляет изучение преобразования волн во внешнем постоянном магнитном поле в нелокальном режиме $qR > 1$, (R - циклотронный радиус траектории электрона) поскольку в этих условиях возможно проявление различных электромагнитных и магнитоакустических резонансов и эффектов связывания собственных электромагнитных мод электронно-дырочной плазмы со звуком.

Обнаружение резонансного связывания акустических колебаний с собственной электромагнитной модой - доплероном, - вольфрама [14] предопределило идею экспериментальной методики - режим "на проход", с одной стороны образца акустический

преобразователь, а с другой - электромагнитный контур. В качестве объекта исследований был выбран вольфрам, поскольку именно в вольфраме был обнаружен и тщательно изучен доплерофонный резонанс (ДФР) магнитоакустическими методами [14]. Немаловажным обстоятельством является и наличие достаточно полных сведений о поверхности Ферми вольфрама, которые кратко изложены в работе.

Отдельные теоретические вопросы взаимного преобразования акустических и электромагнитных волн в металлах в магнитном поле рассматривались многими авторами. Достаточно полный перечень этих работ и их анализ представлены в [13,15]. Однако, наиболее полно и последовательно теория электромагнитного возбуждения звука была построена в работах В.Л.Фалько [15], а её часть, описывающая взаимное преобразование волн в металлах со сложной поверхностью Ферми была инициирована и выполнена "параллельно" с экспериментальными исследованиями, представленными в настоящей главе. Поэтому в диссертации приведены некоторые из этих теоретических результатов, необходимые для анализа экспериментальных данных.

В связи с тем, что измерения преобразования волн в зависимости от величины магнитного поля проводились в непрерывном режиме, была выполнена оценка погонного затухания возбуждаемой звуковой или электромагнитной волны. При малом затухании возможны многократные преломления возбуждаемой волны в образце и результирующее значение сигнала на приемной стороне образца в этом случае является суммой сигналов от разных проходов волны, что существенно затрудняет интерпретацию экспериментальных данных. Эти оценки были выполнены двумя независимыми методиками: импульсной и в режиме свипирования частоты по форме резонансов Фабри-Перо. Полученные значения затухания $9+10$ дБ/мм для частоты 150 МГц показывают, что при анализе экспериментальных результатов на частотах выше 100 МГц с достаточной точностью можно не учитывать влияние многократных преломлений волны в образце. Отметим, что практически все эксперименты по преобразованию волн в вольфраме были выполнены при 4,2 К при ориентации постоянно магнитного поля перпендикулярно поверхности образца.

Проведение низкотемпературных исследований распространения и преобразования электромагнитных и акустических волн в

вольфраме в диапазоне 50-500 МГц потребовало разработки высокочастотного устройства с небольшими поперечными размерами в области держателя образца и обеспечивающего поворот элемента связи (электромагнитная петля) в плоскости поверхности образца. В работе приведено описание такого устройства, представляющего собой отрезок коаксиальной линии с конструктивно встроенным трансформатором импеданса, тяги настройки которого выведены из криостата. Для проведения поляризационных измерений взаимного преобразования волн коаксиальный отрезок с петлей связи помещался во внешнюю неподвижную трубку-держатель, к которой неподвижно крепился держатель образца. Постоянная электромагнитная связь образца с петлей обеспечивалась фторопластовой прокладкой толщиной 10 микрон.

Для разделения механизмов преобразования и исследования поляризационных эффектов полевые зависимости амплитуды преобразования регистрировались при различных взаимных ориентациях плоскости поляризации пьезопреобразователя и электромагнитной петли. Параллельная и перпендикулярная вектору электрического поля $\vec{E}(0)$ волны на поверхности образца компоненты амплитуды $\vec{U}(H)$ генерируемого звука были обозначены как $U_{||}(H)$ и $U_{\perp}(H)$. Наиболее интересные результаты были получены в экспериментах с различными углами φ взаимной ориентации плоскостей поляризации электромагнитной петли и пьезопреобразователя, которые проводились при инверсии магнитного поля, т.е. при замене $+\vec{H}$ на $-\vec{H}$. Полевые зависимости $U_{||}(H)$ и $U_{\perp}(H)$ были малочувствительны к инверсии магнитного поля, если отклонение угла φ от 0° и 90° не превышало нескольких градусов. Наиболее существенная разница в амплитудах преобразования волн была обнаружена в магнитном поле, соответствующем ДФР, при $\varphi = (25 \pm 2)^\circ$. Для поля $-\vec{H}$ на полевой зависимости имеется участок протяженностью 10 кЭ, где практически отсутствует сигнал преобразования. Края этого участка - "ступени", - соответствуют резонансным особенностям при направлении магнитного поля $+\vec{H}$. Этот эффект обусловлен тем, что в магнитных полях, близких к резонансам, генерируемый звук в общем случае должен быть эллиптически поляризован и большая ось эллипса поляризации повернута относительно осей координат, одна из которых совпадает с $\vec{E}(0)$. В полях, где нет резонансов, звук линейно поляризован, а направление век-

тора поляризации зависит от величины \vec{H} . Непосредственные измерения поляризационных диаграмм амплитуды возбуждаемого звука в нулевом магнитном поле, в условиях ДФР, а также в сильных магнитных полях позволили определить соответственно линейную (параллельную $\vec{E}(0)$), эллиптическую и снова линейную, но перпендикулярную $\vec{E}(0)$, поляризации звука. Измерения в условиях инверсии магнитного поля отношения полуосей эллипса поляризации при известном φ и поглощении звука на том же образце позволило оценить длину затухания доплерона, которая на частоте 155 МГц и магнитном поле $H=20$ кЭ составила примерно $1,37 \lambda_{зв}$, где $\lambda_{зв}$ - длина волны звука.

В сильных магнитных полях, когда радиусы экстремальных траекторий всех электронов на ПФ существенно меньше длины волны звука, принципиальное влияние на поведение зависимостей $U_{||}(H)$ и $U_{\perp}(H)$ оказывает соотношение между электронами и дырками. Для компенсированного металла, каковым является вольфрам, по мере увеличения магнитного поля происходит переход от зависимости $U_{\perp}(H) \sim H$, характерной для индукционного механизма возбуждения звука, к $U_{\perp}(H) \sim H^{-1}$. Т.е. в компенсированных металлах в сильных магнитных полях реализуется условие пространственного резонанса между глубиной скин-слоя и длиной волны возбуждаемого звука, что наблюдалось в вольфраме в магнитном поле 30 кЭ на частоте 50 МГц при температуре 2,6 К. Это позволяет оценить глубину скин-слоя в этих условиях - $1,3 \cdot 10^{-3}$ см.

Оценка коэффициента преобразования волн потребовала измерений фермиевских скоростей в вольфраме. "Классическим" методом измерения фермиевских скоростей является "tilt"-эффект, заключающийся в скачкообразном включении бесстолкновительного механизма поглощения звука при отклонении магнитного поля от направления, перпендикулярного направлению распространения звука. До сих пор считалось, что "tilt"-эффект существует только в сильных магнитных полях, где справедливо соотношение $qR \ll 1$. В работе обнаружен и объяснен "tilt"-эффект в слабых магнитных полях, когда существенно пространственная дисперсия $qR > 1$, что позволило измерить фермиевские скорости двух групп электронов проводимости в вольфраме в направлениях [010] - $5 \cdot 10$ см/сек и $1,7 \cdot 10$ см/сек.

В главе приведены также результаты экспериментальных ис-

следований переноса электромагнитного поля на частотах 500+800 МГц сквозь пластину вольфрама при гелиевых температурах.

В четвертой главе представлены исследования металлических стекол методом магнитного резонанса на частотах 4-х мм диапазона в интервале температур 0,3 К + 150 К. В качестве объектов исследования были выбраны металлические стекла двух типов на основе Fe. Металлические стекла одного из них сохраняют во всем интервале исследовавшихся температур дальний магнитный порядок, а другие с понижением температуры от комнатной демонстрируют переходы из парамагнитного (неупорядоченного) состояния в ферромагнитное (магнитоупорядоченное), а затем в спин-стекольное (неупорядоченное) состояние, т.е. возвратные стекла.

Исследуемые образцы представляли собой фольги толщиной 20+30 микрон, полученные методом быстрой закалки. Эксперименты выполнялись с использованием квазиоптической ячейки в виде открытого двухзеркального резонатора, на нижнем круглом плоском зеркале которого располагался исследуемый образец. Основными измеряемыми величинами были частота и величина резонансного магнитного поля, ширина резонансной линии, а также её форма. По первым двум величинам, с учетом размагничивающего фактора, определялись величины g -фактора и намагниченности насыщения M_s .

При измерениях магниторезонансных свойств различных металлических стекол была зафиксирована аномалия величины g -фактора и намагниченности насыщения M_s для сплавов системы Fe-B с концентрациями, близкими к эвтектической. Одновременно во ФТИНГ НАН Украины были обнаружены концентрационные зависимости предела текучести (разрушающего напряжения) для этой системы. Полученные экспериментальные результаты интерпретированы в рамках известных данных о поликластерной структуре сплава Fe-B, согласно которым вблизи эвтектической концентрации происходит смена характера упаковки кластеров.

В последние годы объектом интенсивных исследований стали т.е. возвратные аморфные металлические сплавы. Эти вещества являясь топологически неупорядоченными могут находиться в зависимости от состава и температуры в различных магнитных фазовых состояниях. Т.е. при изменении температуры в этих сплавах происходят магнитные фазовые переходы и наблюдаются

следующие типы магнетизма: парамагнетизм, ферромагнетизм и спиновое стекло. Эти системы являются чрезвычайно удобными объектами для изучения фазовых переходов порядок - беспорядок. Самостоятельный интерес представляет изучение такого нетривиального состояния вещества, как спиновое стекло - неупорядоченного магнетика, характеризующегося сильным обменным взаимодействием (как дальнедействующим, так и короткодействующим), и в котором величина и энергия взаимодействия являются случайной функцией координат. Поэтому в спиновых стеклах - системах с конкурирующим обменным взаимодействием, - не возникает дальний магнитный порядок при понижении температуры.

Магниторезонансное поглощение было исследовано для возвратных аморфных сплавов $(\text{Fe}_x\text{Ni}_{100-x})\text{B}_{77}\text{Si}_{10}$; $x=7,8,9,10$ ат.%, которые были приготовлены в ИМФ НАН Украины. Там же были определены их магнитные фазовые диаграммы на основании низкочастотных исследований их магнитных свойств. При концентрациях атомов железа меньше $x_{\text{тр}} \approx 7,7$ ат.%, что соответствует тройной точке магнитной фазовой диаграммы, в этой системе при понижении температуры происходит переход из парамагнитной фазы непосредственно в спин-стекольную, в то время как для сплавов с концентрацией больше $x_{\text{тр}}$ этот переход происходит через ферромагнитное состояние. В этой серии экспериментов измерялись форма и ширина линии, g -фактор, величина намагниченности насыщения M_{S} и поле анизотропии.

Полученные в работе данные по температурной зависимости ширины $\Gamma(T)$ магниторезонансной линии в области температур $\hbar\omega < kT$ ($3 \text{ K} < T < 30 \text{ K}$) хорошо согласуются с эмпирической зависимостью $\Gamma(T) = \Gamma_0 + \Gamma_1 \exp(-T/T_0)$, описывающей проявление релаксационного механизма взаимодействия электромагнитной волны с ансамблем магнитных двухуровневых систем в аморфном магнетике. Здесь Γ_0 - температурно независимая ширина линии, Γ_1 , T_0 - эмпирические константы. Необходимо отметить, что аналогичные температурные зависимости ширины линии были получены для сходной по составу и свойствам системы в работе [16]. В соответствии с представлениями о магнитных двухуровневых системах, их взаимодействие с электромагнитной волной реализуется посредством двух механизмов: релаксационного, связанного с модуляцией электромагнитной волной расстояния

между туннелирующими уровнями, и резонансным, описывающим непосредственное взаимодействие двухуровневых систем и электромагнитной волны. В области температур $10^{-4} \text{ K} < T < 0,3 \text{ K}$ ($0,3 \text{ K} < T < 3 \text{ K}$) измеренная температурная зависимость ширины линии описывается соотношением $\Gamma(T) = A/T$, что в рамках модели магнитных двухуровневых систем соответствует проявлению резонансного механизма.

Во время проведения экспериментальных исследований стала очевидной перспективность проведения измерений аморфных магнетиков при температурах ниже $0,3 \text{ K}$. Поэтому была разработана конструкция рефрижератора растворения для радиофизических исследований при $T < 0,1 \text{ K}$, сочетающая все достоинства "top-loading" рефрижераторов, и в которой механически настраиваемые трансформаторы импедансов ВЧ и СВЧ трактов расположены в непосредственной близости к экспериментальной ячейке, что позволяет уменьшить подводимую к последней электромагнитную мощность и реализовать максимальную чувствительность приемной аппаратуры.

В Приложении приведены коэффициенты полиномов Чебышева, описывающих температурные зависимости коэффициентов теплового расширения кварца вдоль кристаллографических осей в интервале температур $4,2-300 \text{ K}$, а также модулей упругости и пьезоэлектрических констант в интервале $4,2-60 \text{ K}$. Там же приведены экспериментальные данные по температурным зависимостям фазовых скоростей звука в плоскости YZ, по которым были определены модули C_{14}^E , C_{44}^E , C_{66}^E и константы e_{14} и e_{11} .

В Заключение сформулированы основные научные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы и намечены перспективы дальнейших исследований.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные выводы и результаты работы состоят в следующем:
I. Выполнен цикл работ по изучению динамики луча с поперечной поляризацией внутри плоской области с анизотропными свойствами и ограниченной идеально отражающей границей.

I.I. Доказано существование изоморфного отображения динамики луча внутри анизотропной области, ограниченной географом групповой скорости, на изотропный бильярд в круге. На основе этого отображения разработан метод расчета полигональных

звукопроводов из диэлектрических кристаллов.

1.2. Доказано существование изоморфных отображений динамики луча с поперечной поляризацией (непьезоактивная мода) внутри односвязной области с кусочно-гладкой границей на бильярды с изотропными свойствами. Тем самым обобщены основные свойства плоских изотропных бильярдов на анизотропный случай: установлено существование периодических и непериодических траекторий, продемонстрировано влияние анизотропии на расположение, форму каустик и сдвиг границы стохастичности.

1.3. Выполнен цикл работ по прецизионному определению упругих характеристик синтетического пьезокварца при 4,2 К и их температурному изменению в интервале 4,2 К + 60 К.

2. Проведены исследования диэлектрического шарового резонатора из оптически одноосного кристалла.

2.1. Исследованы каустики, образуемые потоками несобыкновенного луча в шаре из оптически одноосного диэлектрического кристалла. Измерены спектры высокочастотных мод, каустики которых расположены вблизи центральных сечений сапфирового и кварцевого ДШР. С помощью численного анализа дисперсионного уравнения для свободного диэлектрического шара установлено, что измеренные спектры являются эквидистантными - т.е. в ДШР из оптически одноосного кристалла существуют квазиодномерные колебания.

2.2. Предложен квазиоптический метод измерения предельно малых диэлектрических потерь в конденсированных средах. С помощью этого метода зарегистрированы потери в жидком ${}^4\text{He}$ и обнаружен пик электромагнитного поглощения в области сверхтекучего λ -перехода.

3. Проведены исследования взаимного преобразования акустических и электромагнитных волн в пластине нормального металла - вольфраме.

3.1. Разработана экспериментальная методика высокочастотных "гибридных" (электромагнитная волна - звук) измерений, в том числе поляризационных. Обнаружены доплер-сдвинутый акустический циклотронный и доплер-фононный резонансы в электромагнитной генерации звука. Определены механизмы взаимного преобразования акустической и электромагнитной волн в широком интервале магнитных полей. Обнаружены и объяснены эффекты поворота плоскости поляризации и эллиптичности возбуждае-

емой акустической волны. В электромагнитной генерации звука обнаружен пространственный резонанс между глубиной скин-слоя и длиной волны возбуждаемого звука.

3.2. Обнаружен и объяснен эффект "отклонения" в поглощении звука в слабом магнитном поле, когда радиус циклотронной орбиты больше длины волны звука.

4. Выполнены магниторезонансные исследования аморфных ферромагнетиков и возвратных спиновых стекол.

4.1. Обнаружена аномалия g -фактора и намагниченности насыщения для сплавов системы FeB с эвтектической концентрацией.

4.2. Изучены магниторезонансные свойства возвратных спиновых стекол $(\text{Fe}_{100-x}\text{Ni}_x)_{77}\text{B}_{13}\text{Si}_{10}$ в 4-х мм диапазоне длин волн в интервале температур 0,3 К + 150 К. Результаты проанализированы на основе модели магнитных ДУС. Показано, что в области физического эксперимента $\hbar\omega/kT \geq 1$ наблюдается переход от продольного к поперечному механизму поглощения энергии электромагнитной волны. Определены характерные энергии расщепления магнитных ДУС в системе $(\text{Fe}_{100-x}\text{Ni}_x)_{77}\text{B}_{13}\text{Si}_{10}$.

4.3. Предложен новый тип рефрижератора растворения ^3He - ^4He для радиофизических исследований при $T < 0,1$ К.

Цитированная литература

1. Биркигоф Дж. Динамические системы. - М.: Л.: ОГИЗ, 1941. - 320 с.
2. Корнфельд И.П., Синая Я.Г., Фомин С.В. Эргодическая теория. - М.: Наука, 1980. - 383 с.
3. Федоров Ф.И. Теория упругих волн в кристаллах. - М.: Наука, 1965. - 386 с.
4. Колмогоров А.Н. Об энтропии на единицу времени как метрическом инварианте автоморфизмов // ДАН СССР. - 1959. - т. 124, N 4. - С. 754-755.
4. Синая Я.Г. О понятии энтропии динамической системы // ДАН СССР. - 1959. - т. 124. - N 4. - С. 768-771.
5. Бунимович Л.А. О бильярдах, близких к рассеивающим // Мат. сб. - 1974. - т. 94(136), N 1(5). - С. 49-73.
6. Бунимович Л.А. Об эргодических свойствах некоторых бильярдов // Функц. анализ и его прилож. - 1974. - т. 8, N 3. - С. 73-74.
7. Лазуткин В.Ф. Выпуклый бильярд и собственные функции оператора Лапласа. - Л.: Изд-во ЛГУ, 1981. - 196 с.

8. Лазуткин В.Ф. Существование каустик для билиардной задачи в выпуклой области // Изв. АН СССР. Сер. математическая. - 1973. - т.37, N 1. - С.188-216.
9. Федоров Ф.И. Теория упругих волн в кристаллах. - М.: Наука, 1985. - 388 с.
10. Braginski V.B., Il'chenko V.S. and Bagdasaryan Kh.S. Experimental Observation of Fundamental Microwave Absorption in High-Quality Dielectric Crystals // Phys.Lett.A.- 1987. - v.120, N 6. - p.300 - 305.
11. Брагинский В.Б., Митрофанов В.П., Панов В.И. Системы с малой диссипацией. - М.: Наука, 1981. - 144 с.
12. Васильев А.Н., Гайдукон Д.П. Электромагнитное возбуждение звука в металлах // УФН. - 1983. - т.141, N 3. - С.431-467.
13. Aronov I.E., Fal'ko V.L. Electromagnetic Generation of Sound in Metals in a Magnetic Field // Phys.Reports.- 1992. - v.221, N 2&3. - p. 82-116.
14. Цымбал Л.И. Электромагнитные возбуждения и доплеро-фонный резонанс в металлах. - Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. - Днепропетр., 1982. - 334 с.
15. Фалько В.Л. Трансформация электромагнитных и звуковых волн в металлах. - Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. - Харьков. - 1986. - 316 с.
16. Manheimer M.A., Bhagat S.M., Webb D.J. Two Level Systems and FMR near the Ferromagnetic Spin-Glass Transition // J.Appl.Phys.-1985.-v.57, N 8 (part II).- P.3476-3478.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Васильченко В.В., Голик А.В., Королик А.П., Мацаков Л.Я. Согласование нагрузок с помощью емкостного и индуктивного трансформаторов импеданса // Радиотехника. - 1982. - т.37, N 8. - с.94 - 96.
2. Васильченко В.В., Голик А.П., Королик А.П., Мацаков Л.Я. Исследование упругих и электрических характеристик синтетического пьезокварца при 4,2 К // Доклады АН УССР, сер.А - 1982. - N 2. - с.78 - 80.
3. Голик А.В., Королик А.П., Хвильня В.И. Взаимная трансформация электромагнитных волн и звука в условиях доплерофонного резонанса в вольфраме // ФНТ. - 1982. - т.8, N 9. -

- с.994 - 996.
4. Golik A.V., Korolyuk A.P., Khizhnyi V.I. Reciprocal Conversion of Sound and Electromagnetic Waves under Conditions of Doppler-Shifted Cyclotron Resonance // Sol. St. Comm.- 1982.- v.44, N 2 - p.173 - 175.
 5. Голик А.В., Королюк А.П., Мацаков Л.Я. Термостабильные многогранные звукопроводы из монокристаллического кварца для ультразвуковых линий задержки // Акуст.журнал.- 1984. - т.30, N I.- с.28 - 31.
 6. Golik A.V., Zagudnyi E.A., Korolyuk A.P., Fal'ko V.L., Khizhnyi V.I. The "Tilt" Effect in the Absorption of Ultrasound by Metals in a Low Magnetic Field // Sol.St. Comm. - 1983. - v.48, N 4.- p.373 - 375.
 7. Голик А.В., Королюк А.П., Хижный В.И. Аномальная электромагнитная прозрачность вольфрама в малых магнитных полях // Письма в ЖЭТФ.- 1983.-т.38, N 3.- с.100 - 102.
 8. Голик А.В., Королюк А.П., Фалько В.Л., Хижный В.И. Трансформация электромагнитных волн и звука в вольфраме в магнитном поле // ЖЭТФ.- 1984.- т.86, N 2.- с.616 - 626.
 9. Golik A.V. The Time Invariant for the Propagation of Plane Waves in Solids // Sol.St.Comm.- 1984.-v.52, N 11. - p.917-919.
 10. Голик А.В., Королюк А.П., Хижный В.И. Низкотемпературное высокочастотное согласующее устройство // ПТЭ.- 1987.- N 2.- с.213 - 215.
 11. Васильченко В.В., Голик А.В., Королюк А.П., Мацаков Л.Я., Попов В.П. Акустические характеристики монокристаллов синтетического кварца в области температур 4,2 - 60 К // Доклады АН УССР, сер.А.- 1987.- N 3.- с.64 - 67.
 12. Аронов И.Е., Голик А.В., Королюк А.П., Фалько В.Л. Диамагнитный резонанс в пластине вольфрама в нормальном магнитном поле // ФНТ.- 1988.- т.14, N 3.- с.313 - 316.
 13. Бакай А.С., Голик А.В. Движение луча в анизотропной области с эллиптической границей // Доклады АН УССР, сер.А - 1988.- N 2. - с.45 - 47.
 14. Бакай А.С., Голик А.В. О движении луча с поперечной поляризацией в ограниченной анизотропной среде // ДАН СССР - 1989.- т.308, N 4.- с.847-850.
 15. Вертик А.А., Голик А.В., Королюк А.П., Таранов С.И., Ше-

- Стопалов В.П. Магнитный резонанс в металлических стеклах в миллиметровом диапазоне длин волн // ДАН СССР.- 1990. - т.314, N 2.- с.337 - 339.
16. Vertij A.A., Golik A.V., Korolyuk A.P., Tarapov S.I., Shestopalov V.P. Magnetic Resonance in Amorphous Metals Based on Fe in the Millimeter-Wave Range // Int.J. Infrared & Millimeter Waves. -1989.- v.10, N 12.- p.1451 - 1456.
17. Vertij A.A., Golik A.V., Tarapov S.I. Microwave Magnetic Resonance in Some Quick-Hardened Metal Glasses // Int.J. Infrared & Millimeter Waves. -1991.- v.12, N 10.- p.1222-1231.
18. Golik A.V., Tarapov S.I. Top-Loading High Power Dilution Refrigerator for Radiophysical Studies // Cryogenics. - 1992.- v.33, N 2.- p.330 - 331.
19. Белозоров Д.П., Вертий А.А., Голик А.В., Тарапов С.И. Низкотемпературное магниторезонансное поглощение в аморфных магнетиках на основе железа // ФНТ.- 1993.- т.19, N 7.- с.769-772.
20. Вертий А.А., Голик А.В., Такаев Г.А., Тарапов С.И. Магнитный резонанс в возвратных спиновых стеклах $(\text{Fe}_x\text{Ni}_{100-x})_{77}\text{B}_{13}\text{Si}_{10}$ // Письма в ЖЭТФ.- 1993.- т.57, N 7.- с.436 - 438.
21. Belozorov D.P., Vertij A.A., Golik A.V., Tarapov S.I. Low Temperature FMR Linewidth in Reentrant Magnets // Phys.Lett.A - 1993.- v.180.- p.389-391.
22. Ганзольский Е.М., Голик А.В., Королюк А.П. Квазиоптический метод измерения предельно малых диэлектрических потерь в конденсированных средах // ФНТ.- 1993.- т.19, N 11.- с.1255-1259
23. Бенгус В.З., Дугай П., Королькова Е.Б., Табачникова Е.Д., Голик А.В., Тарапов С.И. Особенность концентрационных зависимостей механических и магниторезонансных свойств металлических стекол Fe-B при низких температурах // ФНТ - 1994.- т.20, N 10.- с.1082 - 1086.
24. Ganzolskii E.M., Golik A.V., Korolyuk A.V. Observation of an Electromagnetic Absorption Peak in the Millimeter Wave Range in Liquid Helium at the Superfluid λ -Transition // Phys.Rev.B.- 1995.- v.51.- N 17.- p.11962-11964.

25. А.с. N 1100560 СССР, МКИ⁴ G 01 N 29/00. Вещество для создания акустического контакта при ультразвуковых измерениях / А.В.Голик, А.П.Королик, В.И.Хивный, опубл. 30.08.84, БИ N 24.
26. А.с. N 1672167 СССР, МКИ⁴ F 25 D 3/0, F 24 J 1/00. Устройство для получения низких температур / А.В.Голик, С.И.Тарапов, опубл. 23.08.91, БИ N 31.
27. Гавриленко М.В., Сурженко А.Б., Таквая Г.А., Вертия А.А., Голик А.В., Тарапов С.И. Возвратные переходы с образованием спинового стекла в аморфных сплавах $(\text{Fe}_x\text{Ni}_{100-x})_{77}\text{-}\cdot\text{B}_{13}\text{Si}_{10}$ и $(\text{Fe}_{100-x}\text{Cr}_x)_{85}\text{B}_{15}$. Препринт ИТО - 92-173.- Киев.: Институт теорфизики АН Украины, 1992.- 28 с.
28. Васильченко В.В., Голик А.В., Мацаков Л.Я., Королик А.П. Исследование упругих характеристик синтетического пьезо-кварца при температуре 4,2 К // Тезисы IV Всесоюзной конференции "Методика и техника ультразвуковой спектроскопии". - Вильнюс, 1980.- С-5.9.- с.74.
29. Голик А.В., Королик А.П., Фалько В.Л., Хивный В.И. Взаимная трансформация электромагнитных и звуковых волн в нормальном магнитном поле в вольфраме при низких температурах // Тезисы 22 Всесоюзного совещания по физике низких температур.- Киевцев, 1982.- часть 2.- ЗЯНТ, М-6.- с.13-14.
30. Голик А.В., Королик А.П., Фалько В.Л., Хивный В.И. Доплер-сдвинутый циклотронный и доплерон-фононный резонансы при электромагнитном возбуждении звука в вольфраме // Материалы XII Всесоюзной конференции по акустоэлектронике и квантовой акустике.- Саратов.: Изд-во ВНИИТИ, 1983.- ч.1.- с.37 - 39.
31. Belozorov D.P., Golik A.V., Tarapov S.I., Vertij A.A. Magnetic Resonance in Reentrant Alloys at Low Temperatures.- Int.Conf. EMMA-93.- Slovakia, Kosice.- 1993.- A-P-03.-p.47.
32. Ганапольский Е.М., Голик А.В., Анцыгина Г.Н. Сверхвысокочастотные "поясковые" колебания в диэлектрическом явном резонаторе миллиметрового диапазона.- Сборник трудов международного симпозиума "Физика и техника миллиметровых и субмиллиметровых волн".- Украина, Харьков.- 1994.- ч.1.- с.128 - 131.

Golick A.V. Propagation and Reciprocal Conversion of High-Frequency Acoustic and Electromagnetic Waves in Dielectric Crystals, Normal Metal and Amorphous Magnetics at Low Temperatures.

The thesis for obtaining the Doctor degree of science, physics and mathematics, speciality 01.04.07 - Solid State Physics, B.I.Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering, Kharkov, Ukraine, 1995.

The thesis contains the methods of one-to-one mappings of a ray movement problems in a bounded double-dimensional region possessing anisotropic properties onto the isotropic billiards. The shapes of caustics formed by a ray flow in dielectric sphere made from optically uniaxial crystal and its spectral properties are investigated also. The investigation of reciprocal conversion of acoustic and electromagnetic waves in a normal metal plate - tungsten, - placed into magnetic field are carried out experimentally. The investigations of metal glasses including reentrant amorphous magnetics are carried out by electron magnetic resonance method.

Голік О.В. "Розповсюдження та взаємне перетворювання високочастотних акустичних та електромагнітних хвиль в діелектричних кристалах, нормальному металі та аморфних магнетиках при низьких температурах".

Дисертація на здобуття вченого ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 - фізика твердого тіла. Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І.Веркіна НАН України. Харків. 1995.

Захищається дисертація, в якій розвинуті методи відображення задач про рух променя у середині двовірної області з анізотропними властивостями на ізотропні більярди. Досліджені типи каустик, утворюваних променем у діелектричній кулі з оптично одноосного кристалу та їх спектральні характеристики. Досліджено взаємне перетворювання акустичних та електромагнітних хвиль в пластині нормального металу - вольфраму, - у магнітному полі. Методом електронного магнітного резонансу виконані дослідження металевих стекол, у тому числі поворотних аморфних магнетиків.

Ключові слова: анізотропія, діелектрик, перетворювання акустичних та електромагнітних хвиль, аморфні магнетикі.

Научное издание

ГОЛИК Александр Вячеславович

Распространение и взаимное преобразование высокочастотных
акустических и электромагнитных волн в диэлектрических
кристаллах, нормальном металле и аморфных магнетиках
при низких температурах

Подп. в печать 14.11.95

Формат 60×84/16

Бум. офс. Офс. печ. Уч. изд. 2 л. Тираж 100 экз.

Заказ № 37 Бесплатно.

Ротапринт ИРЭ НАН Украины

310086, Харьков-86, ул. Акад. Проскуры, 12

AB 33.992

AB 33.992

THE STATE OF CALIFORNIA

LEGISLATIVE COUNSEL BUREAU

OFFICE OF THE ATTORNEY GENERAL
STATE OF CALIFORNIA
SAN FRANCISCO

DATE: 11/11/11
BY: [Signature]

FOR THE ATTORNEY GENERAL

STATE OF CALIFORNIA