

На правах рукописи

ПЛЕШАКОВ Иван Викторович

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ
ОТКЛИКОВ
В МАГНИТОУПОРЯДОЧЕННЫХ МАТЕРИАЛАХ И СВЕРХПРОВОДНИКАХ

Специальность 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

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

Санкт-Петербург
2009

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН

Научный консультант:

доктор физико-математических наук **Фофанов Яков Андреевич**

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,

профессор **Семенов Владимир Васильевич**

доктор физико-математических наук,

профессор **Жолнеров Вадим Степанович**

доктор технических наук,

профессор **Светличный Василий Александрович**

Ведущая организация:

физический факультет Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный университет"

Защита состоится "26" июня 2009 года в 15 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.034.01 при Учреждении Российской академии наук Институте аналитического приборостроения РАН по адресу: 190103, Санкт-Петербург, Рижский пр., 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Института аналитического приборостроения РАН по тому же адресу.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2009 года.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 002.034.01

кандидат физико-математических наук, с.н.с.

А.П. Щербаков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационной работы связана с необходимостью совершенствования метода исследования материалов, представляющих особый интерес как с позиций фундаментальной науки, так и с точки зрения возможных приложений. Экспериментальный подход, заключающийся в наблюдении импульсно возбужденного быстропротекающего процесса - нестационарного отклика (например, в виде сигналов эха и индукции спиновой или магнитоакустической природы) дает о веществе, в котором этот процесс развивается, весьма богатую информацию. В течение многих лет и вплоть до последнего времени он используется для изучения самых разнообразных физических систем – примером может служить нестационарный ядерный магнитный резонанс (ЯМР) в магнитоупорядоченных образцах. При этом следует подчеркнуть, что именно нестационарность ЯМР, т.е. – способность появляться в виде импульсной реакции на импульсное же воздействие, является источником дополнительных, и во многих случаях принципиально важных, данных об изучаемом объекте. Развитие этой методики применительно к средам – носителям уникальных и во многом еще необъясненных свойств – представляет собой современную задачу.

Выбор магнитоупорядоченных веществ в качестве образцов продиктован тем, они занимают значительное место в электронной технике, в том числе, функциональной электронике, обеспечивая во многом ее прогресс. Другой объект исследований - сверхпроводники - является предметом пристального внимания специалистов из разных областей, от теоретической физики до материаловедения и электротехники. Последнее связано, с одной стороны, с большими потенциальными возможностями сверхпроводников, а с другой, с тем, что они, несмотря на огромное количество посвященных им трудов, изучены все же неполно – достаточно сказать, что механизм высокотемпературной сверхпроводимости на сегодняшний день неизвестен. Одновременно с новыми результатами фундаментальных работ появляются также новые материалы, или открываются сверхпроводящие свойства у материалов уже известных. К числу последних относится диборид магния, демонстрирующий весьма необычные свойства, изучение которых может очень многое дать для понимания сверхпроводимости в целом. Применение к перечисленным выше типам соединений методики, способной предоставить новую информацию об их параметрах, необходимо как для создания или совершенствования теории, так и в практических целях.

Упорядоченные электронные состояния конденсированной среды – магнетизм и сверхпроводимость - во многом сходные явления. Известно, например, что в

высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП) переход от одного из них к другому зависит лишь от степени насыщенности материала кислородом, что приводит к появлению присущей данным соединениям диаграммы, отражающей характер возникающего порядка. Более частным, но очень важным является вопрос о сосуществовании в ВТСП магнетизма и сверхпроводимости. По указанным выше причинам получение сведений об особенностях поведения и параметрах материала с тем или иным типом порядка, или же с их сочетанием, представляет для современной науки исключительный интерес. Как будет видно из дальнейшего, эта задача в целом ряде случаев может решаться с помощью близких по экспериментальной реализации способов, связанных единым подходом, основанном на изучении нестационарных откликов. Данные отклики представляют собой слабые импульсные сигналы, возбужденные в некотором веществе, и по характеристикам очень похожие (независимо от их природы, они, как правило, имеют длительности порядка нескольких микросекунд и соизмеримые амплитуды). Поэтому техника проведения опытов, как при наблюдении нестационарного ЯМР, так и в случае регистрации откликов, обязанных своим происхождением упругим колебаниям, принципиально не различается – в целом она основана на импульсном радиоспектрометре, который, конечно, может работать в разных режимах и в ряде случаев дополняться аппаратурой, позволяющей выполнить специальные измерения.

Механизмы же нестационарных откликов, под которыми понимается реакция физической системы на импульсное воздействие в виде сигналов индукции и эха (а также исследованного в диссертации сигнала импульсной параметрической генерации, рассматриваемого в качестве отклика особого вида), являются разными. Хорошо известны спиновые эхо и индукция (нестационарный ЯМР), акустические отклики (фононное эхо) и многие другие. Основное внимание в настоящей работе уделено сигналам магнитоакустической природы, как обладающим высокой степенью общности (они возникают и в магнитоупорядоченных, и в сверхпроводящих веществах), а также тем из них, которые обусловлены связью упругой и спиновой подсистем. Ниже будет показано, что именно в области взаимодействия колебаний ядерных магнитных моментов и ультразвука возникают новые эффекты, достаточно отличающиеся от традиционного ядерно-магнитоакустического резонанса, которые позволяют изучить свойства материала и измерить некоторые его параметры. Сходство в поведении откликов различного типа дает возможность во многом рассматривать их с единых позиций.

При разработке методик регистрации сигнала какого бы то ни было происхождения очень часто одним из основных является вопрос о возможности увеличить его

интенсивность. Особенно это касается сигналов эха и индукции рассмотренного выше типа, которые, как правило, весьма слабы. В рамках настоящей работы особое значение имеет исследование круга явлений, позволяющих осуществить параметрическое воздействие и тем самым усилить нестационарные акустические отклики, выделив их на фоне других сигналов в веществах с сильной магнитоупругой связью.

Среди актуальных вопросов, связанных с применением магнитоупорядоченных материалов, можно назвать задачу исследования механизма фотомагнитного эффекта, заключающегося в изменении магнитных параметров вещества под действием света. Его возможные приложения в настоящее время широко обсуждаются в научной литературе в связи с рассмотрением различных вариантов оптической записи информации на магнитный носитель. Хотя само явление в таких образцах, как, например, борат железа, известно давно и в некоторых отношениях исследовано достаточно подробно, его механизм, а также связь с теми или иными фотоактивными центрами, изучены явно недостаточно. Магнитометрия, которая преимущественно поставляла данные для построения модели этого явления, представляет собой интегральную методику, и не может ответить на некоторые вопросы, например, о поведении намагниченностей отдельных подрешеток под действием света. Использование ЯМР способно дать сведения, которые нужны для уточнения механизма явления, на более локальном уровне и (в сочетании с другими экспериментами) обеспечить получение информации, необходимой для установления природы ответственных за него центров.

Помимо развития методик исследования материалов, у данной работы имеется еще один аспект: создание новых подходов к обработке импульсной информации на основе одной из разновидностей нестационарных откликов - явления эха. Если сигналы такого типа, наблюдаемые в радиочастотном диапазоне, в настоящее время могут рассматриваться в качестве перспективных только для ограниченных применений, фотонные отклики являются весьма многообещающими. В то же время самые общие свойства нестационарных откликов сходны, что дает возможность изучать их, используя, например, спиновое эхо, и распространяя далее результаты на все другие виды эхо-сигналов. При этом, какое бы эхо не использовалось, всегда возникает проблема мешающих откликов и, соответственно, появляется задача их подавления. Ранее она решалась лишь для некоторого класса сигналов в конкретных экспериментальных условиях. Таким образом, рассмотрение принципов управления эхо-процессорами, основанных на универсальных, то есть не зависящих от природы откликов соотношениях, которые позволяют совершать над выходными сигналами

большое количество различных преобразований (в том числе, дает возможность подавлять их определенную группу), несомненно, представляется актуальным.

Целью диссертационной работы является выполнение экспериментальных исследований нестационарных откликов – сигналов эха и индукции магнитоакустической и спиновой природы в системах с магнитным порядком и сверхпроводимостью, создание на этой основе методик изучения материалов, в которых реализуются указанные состояния, а также развитие общего подхода к управлению выходными сигналами эхо-процессоров для расширения возможностей обработки информации в этих устройствах.

Для достижения данных целей необходимо решить следующие задачи:

1. Создать на базе радиоспектроскопического оборудования установку, позволяющую проводить эксперименты по регистрации нестационарных откликов магнитоакустической и спиновой природы, в том числе, с использованием импульсов, оказывающих параметрическое воздействие на образец.
2. Изучить импульсные нестационарные отклики (сигналы индукции, параметрического усиления и эха) магнитоакустической природы в магнитоупорядоченных веществах с сильной магнитоупругой связью.
3. Выполнить исследование эффектов, возникающих в магнитоупорядоченных кристаллах в области взаимодействия упругой и ядерной спиновой систем.
4. Реализовать параметрическое воздействие на магнитоупорядоченные материалы и исследовать возможность его использования для усиления нестационарных откликов.
5. Исследовать эффективность применения нестационарного ЯМР для получения данных о свойствах фотомагнитного эффекта в борате железа.
6. Разработать бесконтактный метод измерения магнитных параметров сверхпроводящих материалов (ВТСП).
7. Исследовать физическую природу и возможности применения радиочастотных откликов в сверхпроводниках для изучения характеристик ВТСП, содержащих магнитные ионы.
8. Провести исследование особенностей формирования фонов эха в дибориде магния.
9. Разработать общие принципы управления выходными сигналами эхо-процессоров и на этой основе создать схему селекции сигналов спинового эха ^{57}Fe в литиевом феррите.

Научная новизна диссертационной работы определяется следующими основными результатами, полученными при решении поставленных в работе задач:

1. Обнаружено явление магнитоакустического параметрического эха на собственных колебаниях кристалла с сильной магнитоупругой связью. Изучены амплитудные и частотные свойства этого сигнала.
2. Впервые наблюдался и был исследован эффект ядерного магнитоупругого резонанса – неоднородного возбуждения ядерной спиновой системы через подсистему магнитоупругих колебаний образца, обладающий собственным коэффициентом усиления и динамическим сдвигом частоты. С его помощью измерено сверхтонкое поле, наводимое ядерной намагниченностью на электронную подсистему.
3. Показано, что отклик в виде ядерного магнитоупругого резонанса представляет собой колебания акустической природы, которые могут быть параметрически усилены. Установлено, что в условиях сильной связи ядерной спиновой и магнитоупругой подсистем включение дополнительного параметрического воздействия приводит к появлению эха на связанных ядерно-упругих колебаниях.
4. Впервые наблюдалось фононное эхо в высокотемпературных сверхпроводниках, содержащих магнитные ионы, что позволило получить сведения об особенностях данных соединений.
5. Методика, использующая фононное эхо, применена к изучению диборида магния, что является первым ультразвуковым исследованием щели в электронном спектре этого материала.
6. Выполнено систематическое исследование фотоманитного эффекта в борате железа методом ЯМР. Прямыми экспериментами установлена природа фотоманитных центров в этом веществе.
7. Предложены новые принципы управления выходными сигналами эхо-процессоров, базирующиеся на универсальных соотношениях для нестационарных откликов в различных физических системах.

Научная значимость диссертационной работы определяется тем, что в ней развит общий подход к изучению магнитоупорядоченных веществ и сверхпроводников на основе возбуждения и регистрации в них нестационарных откликов различной природы. В ходе исследований обнаружены и подробно изучены новые физические явления - параметрическое усиление магнитоакустических нестационарных откликов, параметрическое эхо на собственных колебаниях кристалла, ядерный магнитоупругий резонанс, эхо на связанных ядерно-упругих колебаниях, установлена природа фоточувствительных центров в борате железа. Обнаруженные явления положены в основу методик изучения свойств материалов.

Практическая ценность работы состоит в том, что с помощью разработанных в ней методов определены параметры затухания ультразвука, коэффициент усиления, и другие характеристики магнитных материалов, измерено поле сверхтонкого взаимодействия, наводимое со стороны ядерной спиновой системы на электронную, изучены свойства сверхпроводников – магнитные критические токи и силы пиннинга, оценены величины сверхпроводящей щели в ВТСП и дибориде магния. Кроме того, предложен принцип обработки информации на основе явления эха с использованием его универсальных свойств.

Публикации. По теме диссертации опубликована 31 работа, в том числе, получено два авторских свидетельства на изобретения. Список работ приведен в конце автореферата.

Апробация работы. Материалы работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях, симпозиумах и других научных встречах:

- XVII конференции по физике магнитных явлений (Донецк, 1985);
- IX Школе Ампер (IX Ampere School) (Новосибирск, 1987);
- I Всесоюзном семинаре по высокотемпературной сверхпроводимости (Харьков, 1988);
- II Всесоюзной конференции по высокотемпературной сверхпроводимости (Киев, 1989);
- XII Всесоюзной школе по магнитному резонансу (Пермь, 1991)
- IV Симпозиуме северных стран по сверхпроводимости (IV Nordic Symposium on Superconductivity) (Варберг, Швеция, 1994);
- XII Международном семинаре по критическим токам в сверхпроводниках (XII International Workshop on Critical Currents in Superconductors) (Альпбах, Австрия, 1994);
- IX Латиноамериканском конгрессе по науке о поверхности и ее приложениям (IX Latin American Congress on Surface Science and its Applications) (Гавана, Куба, 1999);
- Международном конгрессе по исследованию материалов (International Materials Research Congress) (Канкун, Мексика, 1999);
- V Симпозиуме по физике материалов (V Simposio en Fisica de Materiales) (Энсенада, Мексика, 2000);
- Московском международном симпозиуме по магнетизму (Moscow International Symposium on Magnetism) (Москва, 2002);
- Международном симпозиуме и летней школе “Ядерный магнитный резонанс в конденсированных средах” (International Symposium and Summer School “Nuclear Magnetic Resonance in Condensed Matter”) (Санкт-Петербург, 2004);

- Международном симпозиуме и летней школе “Ядерный магнитный резонанс в конденсированных средах” (International Symposium and Summer School “Nuclear Magnetic Resonance in Condensed Matter”) (Санкт-Петербург, 2005);
- Семинаре по функциональным материалам (Workshop on Functional Materials) (Афины, Греция, 2005);
- Международном симпозиуме и летней школе “Ядерный магнитный резонанс в конденсированных средах” (International Symposium and Summer School “Nuclear Magnetic Resonance in Condensed Matter”) (Санкт-Петербург, 2006);
- Международном симпозиуме и летней школе “Ядерный магнитный резонанс в конденсированных средах” (International Symposium and Summer School “Nuclear Magnetic Resonance in Condensed Matter”) (Санкт-Петербург, 2007);
- Симпозиуме Северного сообщества по сверхпроводимости (NEMS symposium) (Науво, Финляндия, 2007);
- Конференции по магнитному резонансу EUROMAR-2008 (Magnetic Resonance Conference) (Санкт-Петербург, 2008);
- Симпозиуме Северного сообщества по сверхпроводимости (NEMS symposium), (Бакагорден, Швеция 2008).

Результаты работы также неоднократно обсуждались на семинарах по спиновым волнам (Ленинград, 1984 и 1986), семинарах ”Спиновое эхо – применение для анализа магнитных материалов и создания устройств” (Симферополь, 1984 и 1988), семинарах лаборатории квантовой электроники ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, а также на семинарах СПбГПУ (кафедра квантовой электроники) и СПбГУ (кафедра физики квантовых магнитных явлений).

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, общего списка литературы, списка работ по теме диссертации и приложения. Каждая из глав, посвященных экспериментальным исследованиям, завершается параграфом ”Выводы”, кратко суммирующим полученные в ней результаты.

Работа содержит 49 рисунков, 5 таблиц и 225 наименований в списке литературы. Ее полный объем - 272 страницы.

Личный вклад автора. Содержание диссертации соответствует вкладу автора в опубликованные работы. В статьях, посвященных ядерному магнитоупругому резонансу, теоретическая часть принадлежит А.В. Иванову. В работах, связанных с исследованием магнитных свойств ВТСП, теория разработана Ю.И. Кузьминым. Во всех случаях, однако, автор диссертации принимал участие в обсуждении рассматриваемых моделей, его вклад

выполнение экспериментов был определяющим, а анализ полученных результатов проводился совместно. В ряде публикаций он является единственным автором.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. В материалах с сильными магнитоупругими свойствами существуют нестационарные отклики акустической природы в виде сигналов индукции, параметрической генерации и эха, формирующихся на собственных колебаниях кристалла. На их основе создана методика измерения акустического затухания и магнитокристаллической анизотропии вещества.
2. Нестационарные магнитоакустические отклики, формирующиеся на собственных колебаниях кристалла, обладают свойством усиливаться под действием импульсов на удвоенной несущей частоте. Характеристики магнитоакустического параметрического эха позволяют применять его в устройствах обработки импульсной информации (эхо-процессорах).
3. В веществах с сильной магнитоупругой связью в области взаимодействия акустической и ядерной спиновой систем, наблюдается эффект ядерного магнитоупругого резонанса, характеризующийся собственными коэффициентом усиления и динамическим сдвигом частоты. Это впервые обнаруженное явление позволило определить поле сверхтонкого взаимодействия, которое возникает вследствие воздействия ядерной спиновой системы на электронную.
4. Радиочастотное эхо в высокотемпературных сверхпроводниках имеет магнитоакустическую ангармоническую природу и является способом бесконтактного возбуждения и регистрации ультразвука. С его помощью измерено температурное поведение затухания упругих колебаний и выполнена оценка величины щели в высокотемпературных сверхпроводниках, содержащих магнитные ионы, а также в дибориде магния.
5. Методом ядерного магнитного резонанса в борате железа регистрируются оптически индуцированные эффекты: изменение магнитокристаллической анизотропии и динамическое уменьшение подрешеточной намагниченности под действием света. Фоточувствительные центры, ответственные за эти явления, связаны с существованием в кристалле ионов двухвалентного железа.
6. С использованием амплитудно-фазовых свойств сигналов эха и индукции, общих для всех откликов данного типа, создана универсальная методика временной селекции выходных сигналов эхо-процессоров.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Первая глава носит обзорный характер. В ней рассмотрены нестационарные отклики сигналы эха и индукции) как явления, общие для многих физических систем. Описываются основанные на наблюдении нестационарных откликов методики изучения вещества. Показано, что с использованием эхо-сигналов можно создавать устройства функциональной электроники (эхо-процессоры). Большое внимание уделено специальным вопросам, используемым далее в работе: особенностям наблюдения фонов эха и нестационарных откликов в магнитоупорядоченных материалах, свойствам легкоплоскостных антиферромагнетиков со слабым ферромагнетизмом и анизотропией типа "легкая плоскость" (АФЛП), проблеме применения ЯМР для регистрации фотомагнитного эффекта (ФМЭ) в магнетиках.

Во второй главе описана экспериментальная техника, методика проведения экспериментов и образцы, использованные в работе.

Основным оборудованием был радиоспектрометр – прибор, позволяющий возбуждать, усиливать и регистрировать слабые импульсные сигналы радиодиапазона (нестационарные отклики исследуемого вещества). Их амплитуда, вне зависимости от природы, т.е. от того, имел сигнал магнитоакустическое происхождение, или излучался ядерной спиновой системой, была приблизительно одинакова, и составляла единицы или десятки микровольт на входе приемной части установки. Для воздействия на образец использовались радиочастотные (РЧ) импульсы с длительностями $\sim 1 \div 10$ мкс (в отдельных случаях – до сотен микросекунд), характерные времена сигналов эха и индукции изменялись в пределах $1 \div 100$ мкс. Несущие частоты ω составляли десятки мегагерц. Радиоспектрометр был дополнен специальным параметрическим каналом – устройством формирования импульсов на удвоенной несущей частоте 2ω . Система позволяла создавать многоимпульсные последовательности с возможностью подавать импульсы ω и 2ω в различные моменты времени, и с отдельным регулированием амплитуд по каналам.

В ряде случаев (при исследовании легкоплоскостных антиферромагнетиков) принципиальную роль играли способ размещения образца и геометрия экспериментов, показанные на рис. 1. Предусматривалась возможность расположения образца в изолирующей ампуле, так как существенное влияние на характер откликов оказывала внешняя среда. Монокристаллические образцы, плоскость которых совпадала с плоскостью

легкого намагничивания, ориентировались относительно внешних полей таким образом, как

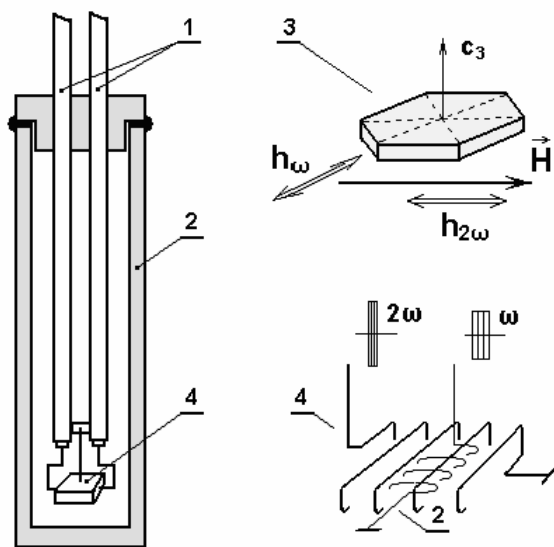


РИСУНОК 1. Схема расположения образца и геометрия эксперимента: 1 – кабели возбуждения, 2 – изолирующая ампула, 3 – ориентация кристалла относительно внешних полей, 4 - система катушек

показано на рис 1-3 (h_ω – РЧ магнитное поле резонансного импульса, $h_{2\omega}$ – РЧ магнитное поле параметрического импульса, \vec{H} – постоянное магнитное поле). РЧ поля создавались системой скрещенных катушек, рис 1-4. Вектор поля \vec{H} можно было вращать без выхода из плоскости.

Фононное эхо в сверхпроводниках изучалось на порошкообразных материалах. Схема опытов в этом случае была проще: последовательности РЧ импульсов $\omega - \omega$ или $\omega - \omega - \omega$ подавались на катушку, ось которой была

перпендикулярна H , и в которой размещалась кварцевая ампула с образцом.

Эксперименты проводились при температурах, изменяемых от гелиевых (2 К) до комнатных, магнитные поля доходили до 50 кЭ.

К дополнительным установкам, использованным в работе, относились оптическая система (позволявшая регистрировать сигналы нестационарного ЯМР одновременно с освещением образца), и система измерения магнитных характеристик вещества с помощью датчика Холла.

В работе были изучены магнитоупорядоченные материалы и сверхпроводники. Первую группу составили антиферромагнетики со слабым ферромагнетизмом и анизотропией типа "легкая плоскость" – FeVO_3 и $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, а также феррит $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$, во вторую вошли ВТСП ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$, $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, $\text{YBa}_2\text{Cu}_{3-x}\text{Fe}_x\text{O}_{7-\delta}$, $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$) и диборид магния (MgB_2).

В третьей главе представлены результаты изучения нестационарных откликов, возбужденных в АФЛП FeVO_3 и $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ импульсами на частотах ω и 2ω , [1 – 7]. Эти сигналы (индукция, эхо, и некоторые другие, обнаруженные в настоящей работе) имеющие магнитоакустическую природу, рассмотрены как информативный способ изучения свойств материалов в широком частотном диапазоне от нескольких десятков до сотен мегагерц. Воздействие оказывалось импульсами РЧ магнитного поля, несущая частота которых соответствовала обычному либо параметрическому резонансу упругих колебаний образца. В

силу существования сильного магнитоупругого взаимодействия, указанные вещества представляли собой удобные объекты для отработки связанной с регистрацией нестационарных откликов методики.

Поле h_{ω} РЧ импульса ω , приложенное к намагниченному до состояния насыщения кристаллу АФЛП приводило к возникновению в нем магнитоупругой волны (при этом наиболее эффективной, с точки зрения интенсивности генерируемого звука, геометрией эксперимента являлась показанная на рис. 1-3). В образце в виде тонкой пластинки таким образом могли быть возбуждены собственные колебания, регистрируемые по спадающему по окончании импульса сигналу индукции. Его характер сильно зависел от того, какая акустическая нагрузка оказывалась на образец. Если он находился в непосредственном контакте с демпфирующей (например, криогенной) жидкостью, подавлялись все моды, кроме основной, отвечающей размерному резонансу по толщине, которая таким образом могла быть легко выделена и изучена. Частотой резонанса Ω , в соответствии с известными свойствами АФЛП, было легко управлять внешним постоянным магнитным полем H . Модуляция H импульсом на частоте 2ω оказывала на образец, являющийся акустическим резонатором, параметрическое воздействие. Оно приводило к усилению уже существующих колебаний, либо, при достаточных длительности/амплитуде импульса, к возникновению параметрической генерации ультразвука, не требующей затравочного сигнала. Последний вариант был удобен тем, что позволял проводить измерения, на которые не влияло "мертвое время" регистрирующей системы, поскольку частота 2ω лежала за пределами полосы приемного устройства, и его перегрузка сильным возбуждающим импульсом отсутствовала. Измерение временных параметров и ориентационных зависимостей нестационарных откликов данного типа позволило определить добротность нагруженного образца и поле его магнитокристаллической анизотропии в базисной плоскости. Была также установлена величина инкремента параметрического усиления.

Снятие акустического демпфирования кардинально изменяло характер откликов. В этом случае индукция представляла собой затухающие за более длительное время нерегулярные осцилляции, соответствующие одновременному возбуждению многих мод и наблюдающиеся непрерывно во всем диапазоне магнитных полей, при которых существенны магнитоупругие явления. Спектр магнитоакустических колебаний свободно подвешенного образца был изучен с помощью методики параметрической генерации; было установлено, что каждая мода, ранее подавленная демпфированием, так же, как и колебание, соответствующее основному размерному резонансу, управляется магнитным полем, то есть, было обнаружено, что собственные колебания ненагруженного кристалла представляют

собой неоднородно уширенную систему осцилляторов, частоты которых зависят от внешнего воздействия. В такой системе могут образовываться отклики в виде сигналов эха.

Экспериментально сигналы магнитоакустического параметрического эха наблюдались в тонких монокристаллах FeVO_3 при отсутствии демпфирования и подаче на образец

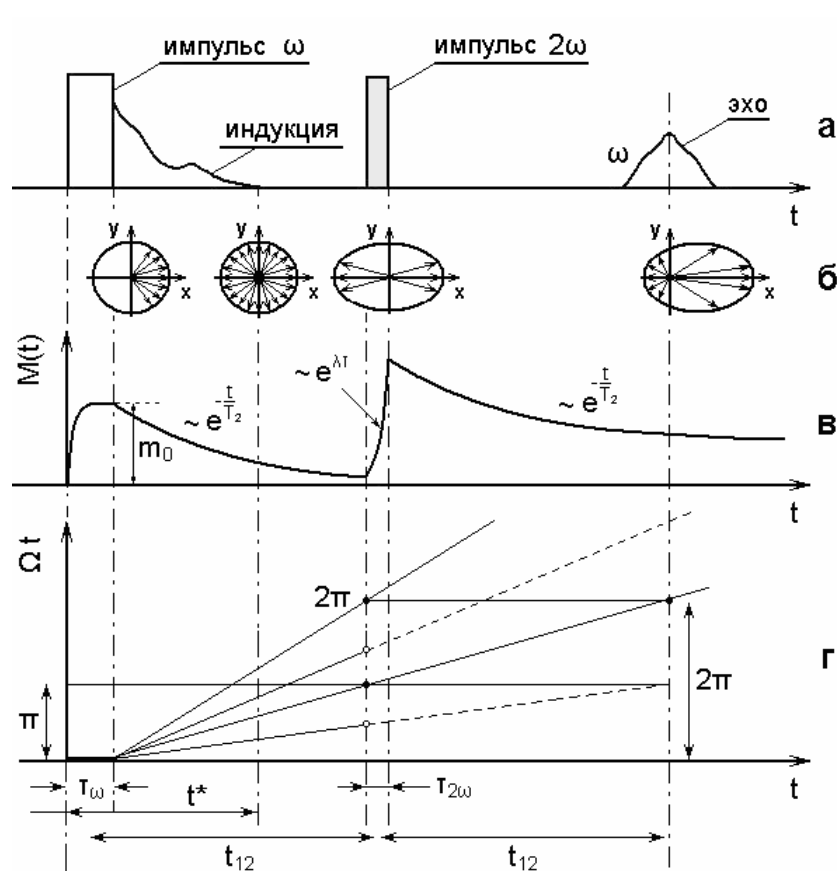


РИСУНОК 2. Схема, поясняющая формирование параметрического эхо-сигнала

образец импульсной последовательности $\omega - 2\omega$.

Механизм возникновения такого отклика поясняется схемой, показанной на рис. 2.

Здесь изображены: а) временная диаграмма возбуждающей импульсной последовательности; б)

амплитуды различающихся по частоте колебаний неоднородно уширенного спектра на комплексной плоскости; в) поведение отдельной (усиливающейся под

действием параметрического импульса гармоники $M(t)$; и г)

плоскость $(\Omega t, t)$, на которой показано изменение фаз гармоник во времени. (Обозначения длительностей импульсов и других характерных времен ясны из рисунка.) Из схемы видно, что после резонансного возбуждения происходит расфазировка колебаний, и после исчезновения создаваемой ими суммарной переменной намагниченности сигнал индукции перестает наблюдаться. Отдельные гармоники, однако, продолжают эволюционировать, убывая с характерным временем затухания ультразвука. Воздействие на них поданного в момент времени t_{12} параметрического импульса оказывается избирательным и зависящим от соотношения фаз: часть их усиливается, другие, с фазой, отличающейся на $\pi/2$, ослабляются; произвольная гармоника может быть разложена на усиливаемую и ослабляемую составляющие. Дальнейшая эволюция происходит таким образом, что, как это следует из рис. 2г, в момент времени $2t_{12}$, усиленные и ослабленные составляющие

складываются, порождая, вследствие разницы их величин, ненулевую намагниченность, индуцирующую эхо-сигнал.

С использованием данной модели было получено выражение для амплитуды эхо-сигнала I_e :

$$I_e = I_{e0} \exp(-2t_{12}/T_2) sh \lambda \tau_{2\omega}. \quad (1)$$

Здесь I_{e0} - параметр, определяющийся интенсивностью резонансно возбужденных магнитоупругих колебаний, λ - параметрический инкремент (зависящий от характеристик материала и амплитуды второго импульса $h_{2\omega}$), T_2 - время затухания ультразвука. Было также установлено, что в малосигнальном приближении (т.е. таком, когда амплитуда отклика линейно зависит от амплитуд возбуждающих импульсов), для фурье-образа эха $\bar{F}_e(\omega)$ можно считать справедливым соотношение

$$\bar{F}_e(\omega) = g(\omega) \bar{F}_1^*(\omega) \bar{F}_2(2\omega), \quad (2)$$

где $\bar{F}_1(\omega)$ и $\bar{F}_2(2\omega)$ - фурье-образы резонансного и параметрического импульсов соответственно, $g(\omega)$ - функция формы линии магнитоакустического резонанса, * - знак комплексного сопряжения. Выражение (2) во временной области имеет форму свертки, что позволяет проводить операции обработки входных сигналов.

Модель формирования параметрического эхо-сигнала была всесторонне проверена

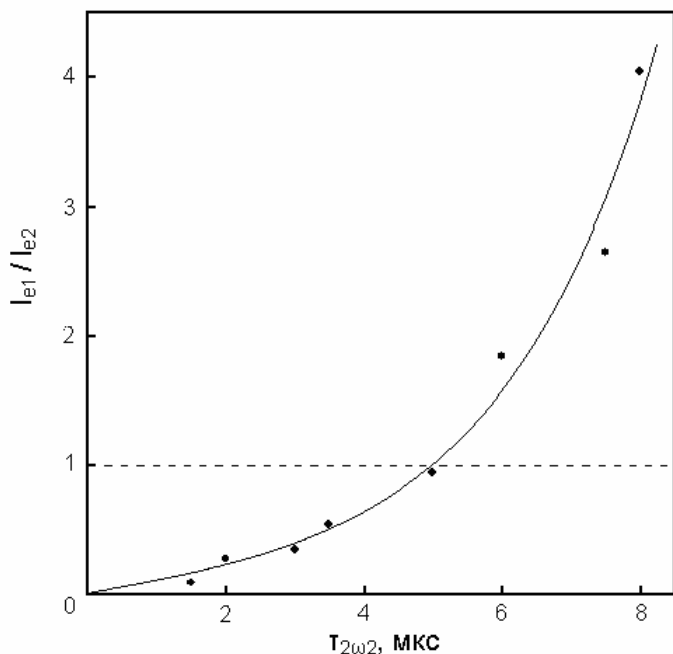


РИСУНОК 3. Эхо в последовательности $\omega - 2\omega - 2\omega$ (усилительные свойства; $FeVO_3$, $T = 77$ К)

экспериментами. Согласно (1) интенсивность этого отклика экспоненциально растет с увеличением $h_{2\omega}$ - это связано с процессом параметрической перекачки энергии из второго импульса в эхо и означает, что природа явления принципиально связана с некоторым усилительным механизмом. Данный эффект наблюдался на опыте. Подача дополнительного импульса на частоте 2ω приводила к возникновению еще одного эхо-сигнала; параметры этого воздействия можно было подобрать

таким образом, что амплитуда вторичного эха становилась больше, чем первичного. Это иллюстрируется рис. 3, на котором показано, как изменяется отношение амплитуд этих

сигналов I_{e2}/I_{e1} в зависимости от длительности второго параметрического импульса $\tau_{2\omega_2}$. Частотные характеристики $I_e = I_e(\omega), I_e(2\omega)$, снятые в режиме малого отклика, продемонстрировали удовлетворительное соответствие выражению (2).

С помощью параметрического эха было измерено время затухания упругих мод в свободно подвешенном монокристалле, которое возросло по сравнению с соответствующим параметром демпфированного образца более, чем на порядок. Оценка добротности колебаний в этом случае дала величину $\sim 10^4$.

Таким образом, в третьей главе приводятся данные исследования физических явлений в магнитоупругой системе АФЛП, которые могут быть положены в основу создания методик исследования материалов. Описан впервые обнаруженный в работе эффект – параметрическое эхо на собственных магнитоакустических колебаниях кристаллов, свойства которого делают возможным его использование в устройствах функциональной электроники.

В четвертой главе рассматривается ситуация, в которой магнитоупругие колебания приводится во взаимодействие с ядерной намагниченностью, [4, 8 – 12]. На эксперименте это достигается следующим образом: несущая частота импульсов выставляется равной, или близкой к частоте ядерного магнитного резонанса (ЯМР) ω_n , а период повторения возбуждающей последовательности делается таким, чтобы насыщение в ядерной спиновой системе отсутствовало. Поскольку опыты выполнялись на кристаллах FeVO_3 , и наблюдался ЯМР ^{57}Fe , $\omega_n = 75.4$ МГц (температура жидкого азота, $T = 77$ К).

Согласно результатам третьей главы, собственной частотой магнитоакустического резонатора (т.е. образца) можно управлять с помощью внешнего постоянного магнитного поля H , и, при заданной частоте ω_n , изменяя H , кристалл легко привести в условия, близкие к резонансным (при демпфировании дополнительных мод криогенной жидкостью). Показано, что в данном случае ядерная спиновая система будет возбуждаться пространственно неоднородным образом через магнитоупругую волну, причем для описания этого взаимодействия можно ввести коэффициент усиления η_κ и динамический сдвиг частоты (ДСЧ) $\Delta\omega_{n\kappa}$:

$$\eta_\kappa = \frac{H_n}{\sqrt{(H - H_\kappa)^2 + \Delta H_\kappa^2}}, \quad \Delta\omega_{n\kappa} = -\frac{\omega_n}{2} \frac{\tilde{H}_{hf}(H - H_\kappa)}{(H - H_\kappa)^2 + \Delta H_\kappa^2}. \quad (3)$$

Здесь H_κ - значение поля, при котором для частоты ω_n достигается резонанс, H_n - сверхтонкое поле на ядре магнитного иона, \tilde{H}_{hf} - обменно-усиленное поле сверхтонкого взаимодействия (эффективное поле, создаваемое ядерной намагниченностью m , и

воздействующее на электронную спиновую систему: $H_{hf} = At$, где A - постоянная сверхтонкого взаимодействия), ΔH_k - ширина магнитоакустического резонанса, выраженная в единицах поля. Из выражений (3) видно, что параметры, характеризующие эффект, отличаются от аналогичных, используемых в обычном ЯМР в магнитоупорядоченных материалах. Оценки показали, что их величина может быть значительно больше, чем в последнем случае. Излучение ядерной спиновой системы также будет происходить через возбуждение магнитоупругой волны неоднородной прецессией ядерной намагниченности, при этом затухание сигнала τ_{nk} будет зависеть от поля H , и быстро нарастать с приближением H_k . Совокупность данных особенностей позволила выделить описываемое явление в особый вид ядерного магнитоакустического резонанса – ядерный магнитоупругий резонанс (ЯМУР).

Эксперименты, проверяющие положения теории ЯМУР, были выполнены путем наблюдения ядерной индукции в акустически демпфированном кристалле при перестраиваемом H . Когда поле сближалось с резонансным, в отклике регистрировались

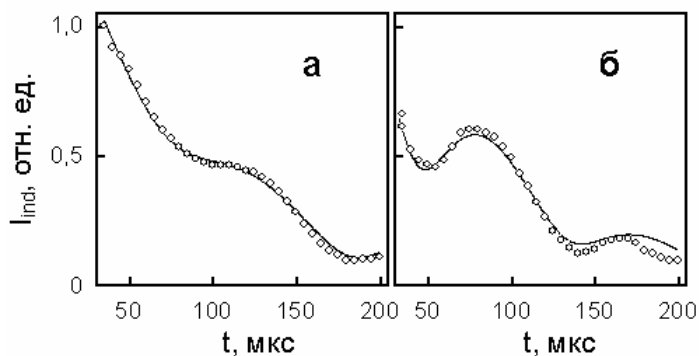


РИСУНОК 4. Осциллирующий сигнал индукции I_{ind} . Точки – эксперимент, сплошная линия – подгоночная функция. а) $H = 150$ Э, б) $H = 165$ Э ($H_k = 188$ Э).

сильные осцилляции, представляющие собой биения сигналов ЯМУР и обычного ЯМР. Таким образом, последний служил эталонным сигналом, на фоне и с помощью которого выделялся особый отклик, связанный с совместными колебаниями ядерной спиновой и магнитоупругой подсистем. Обработка осциллирующего сигнала, пример которой показан на

рис. 4, позволила выделить ЯМУР и исследовать его характеристики. Согласно выражению (3) в величину ДСЧ входит поле сверхтонкого взаимодействия – подлежащий определению параметр материала. Следовательно, изучение поведения ДСЧ представляет собой методику измерения данной величины. На рис. 5 приведены данные, относящиеся к нескольким магнитоакустическим резонансам (точки разного цвета) и подгоночная функция $\Delta\omega_{nk}(H - H_k)$, из которой извлечено значение \tilde{H}_{hf} . (Обозначены также ширина линии ЯМР $\Delta\omega_n$, и ΔH_k). При данных условиях $\tilde{H}_{hf} = 0.64 \cdot 10^{-2}$ Э, [4]. Столь малая величина другими способами не определяется, в последнем же случае измерение выполняется достаточно просто и с высокой точностью, поскольку здесь используется частотный метод. Результаты

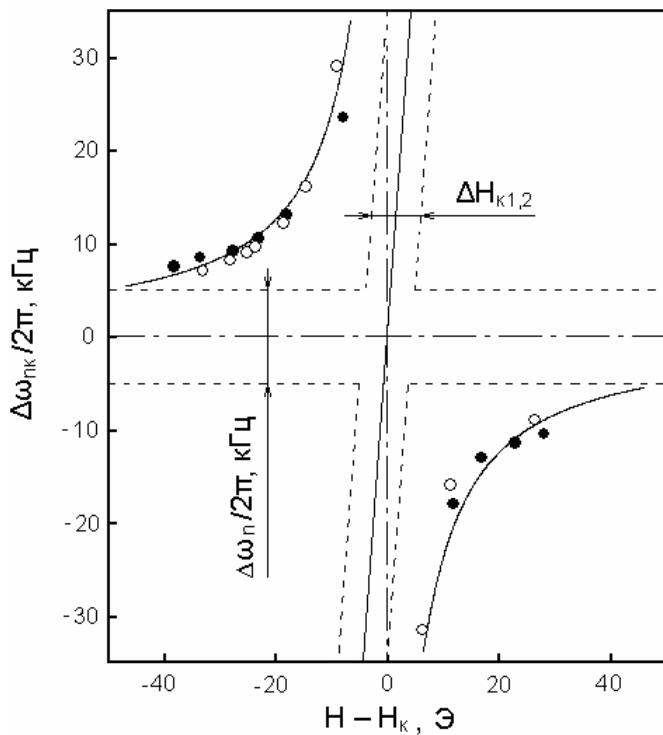


РИСУНОК 5. ДСЧ в зависимости от магнитного поля

наблюдался [9], и был использован для изучения затухания [11]. Величина усиления достигала $\sim 10^2$.

Анализ осциллирующего сигнала позволил получить сведения обо всех характеристиках ЯМУР: коэффициенте усиления, зависимости ДСЧ от относительной

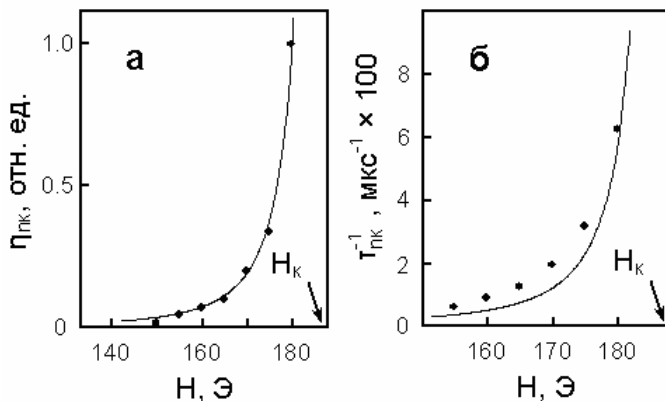


РИСУНОК 6. Зависимости параметров ЯМУР от магнитного поля: а) коэффициент усиления; б) скорость релаксации

величины ядерной намагниченности и скорости релаксации, [4, 9, 10], то есть было осуществлено полное экспериментальное подтверждение модели явления. В качестве примера на рис. 6 показаны хорошо согласующиеся с теорией зависимости η_k и $1/\tau_{нк}$ от магнитного поля.

При снятии акустического демпфирования взаимодействие между магнитоупругими волнами и ядерными спинами становится настолько сильным, что в области пересечения соответствующих дисперсионных кривых система совершает единое ядерно-упругое колебание, у которого имеется зависимость частоты от внешнего магнитного поля. Последнее обстоятельство давало возможность возбуждать ядерно-упругое параметрическое эхо по схеме,

этого раздела работы отражены в международной справочной литературе по материалам (Burzo E. FeBO₃ and other MBO₃-based compounds. In: Llandolt-Börnstein Handbook, Group III Condensed Matter, V. 27h. – Springer-Verlag, 1993. – P. 58 - 64.).

Поскольку сигнал ЯМУР представляет собой индуцированные движением ядерной намагниченности магнитоупругие колебания, он, так же, как и любой другой отклик такой природы, может быть усилен параметрическим импульсом на удвоенной несущей частоте. Этот эффект

наблюдался [9], и был использован для изучения затухания [11]. Величина усиления достигала $\sim 10^2$.

При снятии акустического демпфирования взаимодействие между магнитоупругими волнами и ядерными

рассмотренной в третьей главе. Одно из проявлений данного эффекта состояло в увеличении времени релаксации, измеренному по эхо-сигналу, [12].

Нестационарный ЯМР был использован в работе для изучения ФМЭ в FeVO_3 . Этот материал до высоких температур ($T_N = 348 \text{ K}$) сохраняет магнитную упорядоченность и прозрачность в видимом диапазоне, что делает его уникальным модельным объектом для

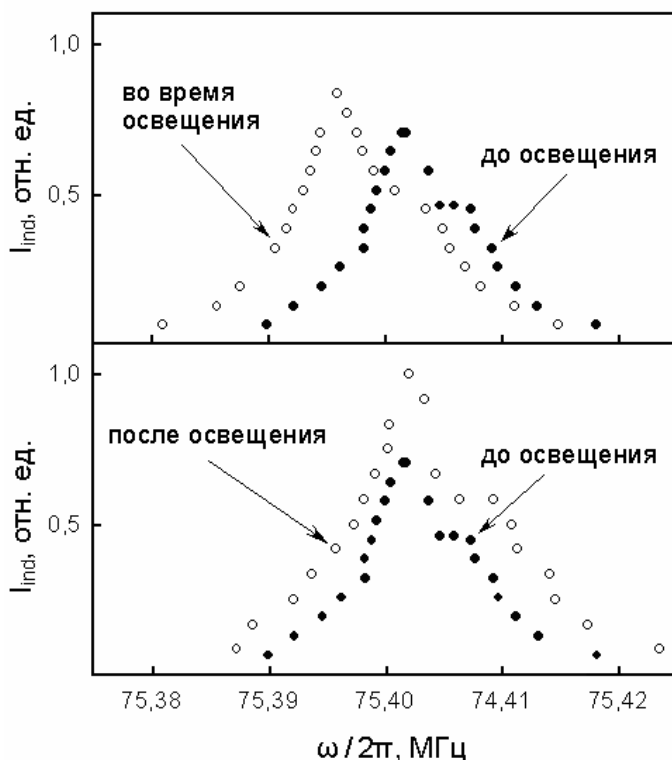


РИСУНОК 7. Детектирование фотомагнитного эффекта методом ЯМР: сдвиг частоты и изменение параметров резонансной линии ^{57}Fe $I_{\text{ind}}(\omega)$ под действием лазерного излучения ($\lambda = 633 \text{ nm}$).

отработки методов исследования индуцированных светом изменений намагниченности. Кроме того, он представляет самостоятельный интерес как материал для записи оптической информации. Было установлено, что при освещении кристалла происходит сдвиг линии ЯМР и увеличение интенсивности отклика, связанное с понижением поля магнитокристаллической анизотропии (это иллюстрируется рис. 7). Первый из эффектов (указывающий на изменение подрешеточной намагниченности), существует только в процессе освещения, а второй носит долговременный характер (это наблюдалось также акустическим методом - по длительному сохранению

измененного порога параметрической генерации). В сочетании с изучением спектров пропускания образцов, отожженных в вакууме при различных температурах, с помощью ЯМР удалось показать, что фоточувствительные центры, ответственные за ФМЭ, содержат ионы двухвалентного железа.

Пятая глава диссертации посвящена описанию методики, разработанной для измерения магнитных параметров сверхпроводящих материалов. Магнитное поле принципиально важно при образовании нестационарных откликов сверхпроводников. В ВТСП, в силу сложности строения этих материалов, процесс намагничивания отличается рядом важных специфических черт, которые при рассмотрении в данных веществах эффектов магнитоакустической природы должны быть приняты во внимание.

Необходимость характеристики образцов и выяснения роли тех особенностей ВТСП, которые существенны для процесса формирования в этих материалах фононного эха, поставили задачу отдельного изучения их магнитных свойств. В настоящей работе эти исследования рассматривались как вспомогательные, однако они дали важную информацию о параметрах вещества, имеющую также самостоятельное значение.

Измерения проводилось датчиком Холла, расположенным в непосредственной близости от поверхности образца, и измеряющим индукцию B при приложении внешнего

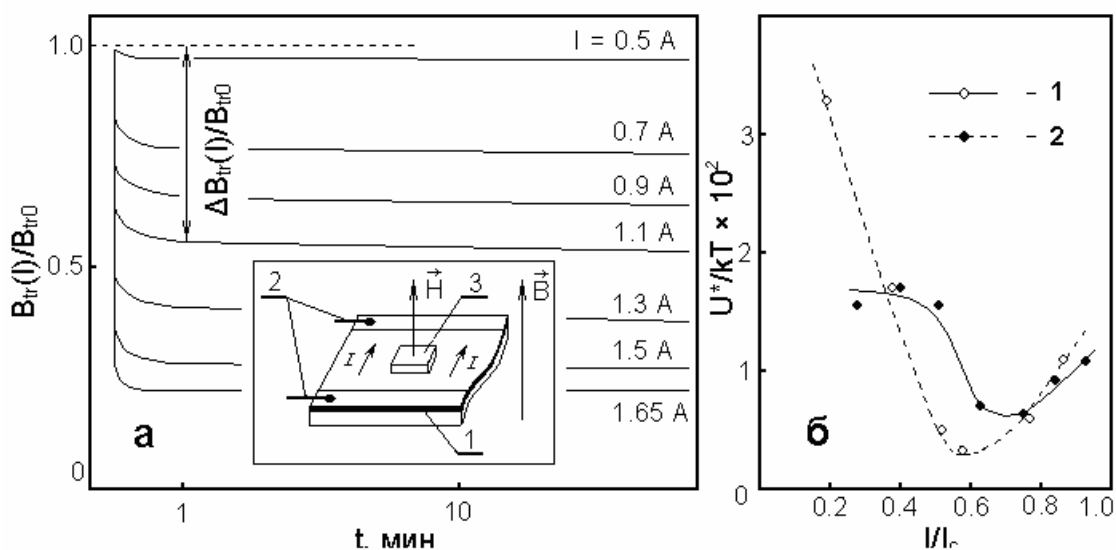


РИСУНОК 8. Свойства центров пиннинга в тонкой пленке $YBa_2Cu_3O_{7.8}$ ($T = 4.2$ K).

- а) Релаксация захваченного потока под действием транспортного тока. На вставке: геометрия эксперимента. 1 – образец, 2 – контакты, 3 – датчик Холла.
 б) Эффективный потенциал пиннинга как функция транспортного тока. 1 и 2 – номера образцов (Таблица).

поля H , [16 – 18]. Анализ кривых намагничивания $B(H)$, проведенный на основе модели критического состояния, позволил получить значения плотности магнитных критических токов j_{cm} и их зависимости от H . Было показано, что, использование понятия размагничивающих факторов в случае неоднородного проникновения магнитного потока в образец не является строгим; для вычисления j_{cm} получена приближенная формула.

Особенности поведения магнитного потока в образцах $YBa_2Cu_3O_{7.8}$ изучены как на поликристаллах, так и на модельных объектах, в качестве которых использованы тонкие сверхпроводящие пленки, [19 – 23]. Релаксация захваченного потока (регистрируемая по индукции B_{tr}) под действием транспортного тока I дала возможность исследовать

эффективный потенциал пиннинга U^* . Эта методика иллюстрируется рис. 8. Введение дополнительного внешнего воздействия на вихри захваченного потока позволило изучить статистические свойства центров пиннинга и распределение магнитных критических токов в ВТСП различной морфологии. Получены численные оценки для сил пиннинга в некоторых практически важных случаях. Некоторые примеры таких данных сведены в Таблицу (в ней

ТАБЛИЦА

Образец, № п/п	L , нм	I_c , А	j_c , 10^5 А/см ²	f 10^{-3} , дин/см
1	100	1.7	2.5	5.2
2	70	0.5	1.6	3.3
3	100	0.3	0.6	1.2

использованы следующие обозначения: L – толщина пленки, I_c – транспортный критический ток, j_c – плотность транспортного критического тока, j_c – линейная плотность силы пиннинга). Показано, что существенную роль в магнитных свойствах ВТСП играют протяженные дефекты.

Результаты, полученные в пятой главе, являются исходным материалом, необходимым при обсуждении особенностей формирования фононного эхо-сигнала в сверхпроводящих системах.

В шестой главе методика изучения материалов по нестационарным откликам распространена на изучение сверхпроводников, [24 – 28]. Их возбуждение потребовало приложения более мощных РЧ импульсов, чем в предыдущих случаях и использования температур ниже температуры сверхпроводящего перехода T_c . Наблюдавшееся в последовательностях $\omega - \omega$ и $\omega - \omega - \omega$ радиочастотное эхо было подробно исследовано в ВТСП $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ и $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_y$ (параметрически в этих веществах эхо возбуждаться не может), [24, 25]. Измерение зависимости амплитуды сигнала от давления было прямым экспериментом, демонстрирующим его акустическую природу, то есть то, что отклик является т.н. сигналом фононного эха. Изучение характера его поведения во внешнем постоянном магнитном поле и при разных интенсивностях РЧ импульсов позволили сделать заключение, что эхо возникает по ангармоническому магнитоакустическому механизму в режиме большого сигнала.

Поскольку особый интерес при изучении высокотемпературной сверхпроводимости представляют материалы, в которых присутствуют ионы, формирующие, или способные

сформировать магнитную подрешетку, фононное эхо было изучено в следующих соединениях: $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ и $\text{YBa}_2\text{Cu}_{3-x}\text{Fe}_x\text{O}_{7-\delta}$, [26, 27]. Причины их избрания в качестве объектов исследования были следующими. Известно, что среди соединений с полным замещением иттрия на редкоземельный элемент наибольшей температурой антиферромагнитного перехода обладает сверхпроводник с гадолинием. Транспортные же характеристики $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ остаются практически теми же, что и у обычного ВТСП, и

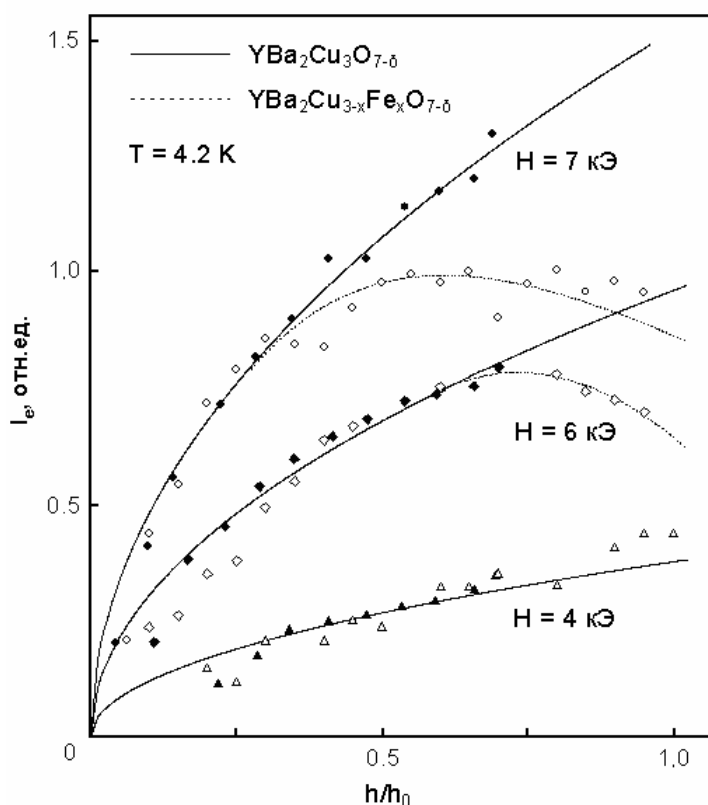


РИСУНОК 9. Зависимость амплитуды сигнала эха от относительной амплитуды РЧ импульсов

поэтому данный материал удобен для сравнения с другими. Что касается железосодержащего образца, то его магнитные свойства сложнее, и, в силу того, что замещается медь (причем, по ряду источников, и в цепочках, и в плоскостях) здесь реализуется вариант, противоположный предыдущему — магнитный ион попадает в позиции, связанные с переносом тока. На эксперименте была отмечена существенная разница в температурном поведении амплитуды эхо-сигнала в этих веществах. Гадолиниевый материал продемонстрировал сходство с иттриевым — в нем сигнал быстро

спадал при подходе к T_c , а в железосодержащем, до температуры перехода (по сравнению с $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ значительно понизившейся), отклик оставался почти постоянным и очень интенсивным. Зависимости амплитуды сигнала от амплитуды возбуждающих импульсов h в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ и $\text{YBa}_2\text{Cu}_{3-x}\text{Fe}_x\text{O}_{7-\delta}$ различались (рис. 9); в последнем случае при больших уровнях отклика наблюдалось его снижение. Анализ результатов (в т.ч. с привлечением данных пятой главы) позволил связать anomальное поведение эха в железосодержащем материале с возрастанием эффективного параметра, характеризующего упругую нелинейность, и возможным формированием кластеров.

Фононное эхо фактически представляет собой методику бесконтактного возбуждения и регистрации ультразвука. В качестве таковой оно было использовано для акустического

исследования щели $\Delta(T)$ в различных сверхпроводниках, [27, 28]. При этом, путем измерения времени релаксации двухимпульсного эхо-сигнала, определялось характерное

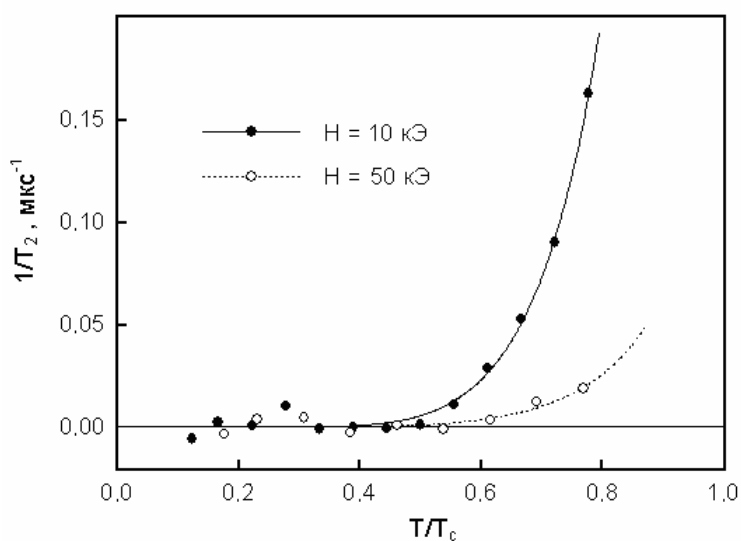


РИСУНОК 10. Электронная часть скорости релаксации в дибориде магния как функция относительной температуры

время затухания упругих колебаний.

Такого рода эксперименты дают оценку для усредненного значения щели, тем не менее, с их помощью было установлено, что и в обычных ВТСП, и в материалах, содержащих магнитные ионы, ее величина приблизительно одинакова, и составляет $2\Delta(0) \cong (4-5)kT_c$. (Это подтверждает предположение об образовании кластеров в железосодержащем ВТСП.) В материале другого состава и с другими электронными свойствами –

дибориде магния, MgB_2 , результат оказался несколько иным. Несмотря на ожидаемые особенности поведения затухания в двухщелевом сверхпроводнике, на эксперименте наблюдался температурный ход электронного затухания (показанный на рис. 10), описываемый одним параметром Δ , для которого было получено значение $2\Delta(0) \cong 7kT_c$. Следует отметить, что это первое применение ультразвуковой методики к исследованию щели в дибориде магния.

В седьмой главе, которая является завершающей, дается общая оценка результатов работы с точки зрения их практической применимости. Показано, что эффекты, наблюдавшиеся в легкоплоскостных антиферромагнетиках, при определенных условиях пригодны для использования в датчиках ряда физических величин. Существенными преимуществами перед известными сенсорами, будут обладать, скорее всего, созданные на этой основе устройства, чувствительные к РЧ полю.

Параметрическое эхо, формирующееся на собственных магнитоупругих колебаниях кристалла, обладает свойствами, которые делают возможным его применение в устройствах функциональной электроники (эхо-процессорах). То, что оно, при определенном приближении, представляет собой свертку входных сигналов, является необходимым требованием для таких систем. Материалы с сильными магнитоупругими свойствами, в которых эхо возникает, обладают высокой чувствительностью к резонансному воздействию,

и, кроме того, отклик может быть усилен импульсом на удвоенной несущей частоте. Это принципиально позволяет создать эхо-процессор, рабочий элемент которого, служащий для преобразования сигнала, одновременно является параметрическим усилителем, [29].

В ходе решения задачи по разработке способов управления эхо-процессором (с целью подавления паразитных сигналов), была создана универсальная методика регистрации нестационарных откликов физической системы, не зависящая от конкретного механизма их формирования, и базирующаяся на общих для них амплитудно-фазовых соотношениях, [30]. Ее идея основана на разделении рабочего вещества на несколько секций, в каждой из которых отклики возбуждаются импульсами с измененными по заранее заданному закону амплитудами и фазами. Показано, что при выполнении необходимых соотношений, выходной сигнал такой системы, образованный суммированием откликов всех секций, будет представлять собой желательную выборку из полной совокупности откликов.

Изготовленная установка селекции сигналов спинового эха ^{57}Fe в литиевом феррите позволила выполнить экспериментальную проверку данного подхода и показать его работоспособность, [31].

В заключении перечислены основные результаты, полученные в ходе выполнения настоящей диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. В материалах с сильной магнитоупругой связью изучены импульсные нестационарные отклики магнитоакустической природы и с их помощью выполнены измерения характеристик легкоплоскостных антиферромагнетиков FeBO_3 , $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Обнаружено явление магнитоакустического параметрического эха на собственных колебаниях кристалла бората железа. Показано, что механизм формирования эха связан с усилением магнитоупругих колебаний. Изучены свойства этого сигнала, и сделан вывод о возможности его использования в устройствах обработки информации.
2. Исследованы эффекты, возникающих в магнитоупорядоченных кристаллах в области взаимодействия упругой и ядерной спиновой систем. Реализованы условия, при которых наблюдается ядерный магнитоупругий резонанс – неоднородное возбуждение ядерной спиновой системы через подсистему магнитоупругих колебаний образца, характеризующееся коэффициентом усиления и динамическим

сдвигом частоты, отличными от соответствующих параметров, описывающих обычный ЯМР в магнитоупорядоченных веществах. С его помощью измерено сверхтонкое поле, наводимое ядерной намагниченностью на электронную подсистему.

3. При параметрическом воздействии на магнитоупорядоченные материалы обнаружены эффекты усиления импульсных откликов упругой подсистемы (сигналов индукции и эха), и ядерного магнитоупругого резонанса. Наибольшая величина усиления, достигнутая в экспериментах, составила $\sim 10^2$. Было установлено, что в условиях сильной связи ядерной спиновой и магнитоупругой подсистем включение дополнительного параметрического воздействия приводит к появлению эха на ядерно-упругих колебаниях.
4. Методом ЯМР ^{57}Fe выполнено систематическое исследование фотомагнитного эффекта в FeVO_3 , позволившее получить дополнительные сведения об изучаемом явлении. Прямыми экспериментами установлена природа фотомагнитных центров в этом веществе. Таким образом продемонстрировано, что наблюдение нестационарного ЯМР является эффективным инструментом изучения фотомагнитных явлений.
5. Разработан бесконтактный метод измерения магнитных параметров сверхпроводящих материалов на основе датчика Холла. Дополнение его внешним воздействием в виде транспортного тока, управляющего магнитным потоком, захваченным в образце, позволило изучить свойства центров пиннинга и распределение магнитных критических токов в ВТСП различной морфологии.
6. Подробно изучено фоновое эхо в сверхпроводниках разного состава. Методика, использующая явление фононного эха, применена к изучению характеристик ВТСП, содержащих магнитные ионы ($\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, $\text{YBa}_2\text{Cu}_{3-x}\text{Fe}_x\text{O}_{7-\delta}$). Измерена усредненная величина сверхпроводящей щели в этих материалах. На основе анализа параметров сигнала продемонстрировано, что в железосодержащем ВТСП сильно выражены нелинейные свойства упругой подсистемы, и имеется тенденция к образованию кластеров.
7. Впервые обнаружено и исследовано фононное эхо в дибориде магния. Установлено, что оно обладает рядом существенных особенностей, в частности, необычным поведением затухания в области низких температур. Для этого материала выполнена оценка сверхпроводящей щели.

8. Разработан принцип управления выходными сигналами эхо-процессора, основанный на амплитудно-фазовых соотношениях, свойственных нестационарным откликам любой природы. С его использованием создано устройство, позволяющее проводить временную селекцию сигналов спинового эха ^{57}Fe в литиевом феррите.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Паугурт А.П., Плешаков И.В., Иванов А.В. Импульсное возбуждение магнитоупругих колебаний и акустическое эхо в FeVO_3 . // ФТТ. – 1987. – Т. 29. – № 10. – С. 2959 – 2965.
2. Петров М.П., Паугурт А.П., Плешаков И.В., Иванов А.В. Магнитоупругие колебания и параметрическое эхо в тонких пластинах бората железа. // Письма в ЖТФ. – 1985. – т. 11. – № 19. – С. 1204 – 1207.
3. Плешаков И.В. Параметрическое возбуждение магнитоупругих колебаний монокристаллов гематита в слабых магнитных полях. // ФТТ. – 2005. – т. 47. – № 9. – С. 1692 – 1696.
4. Петров М.П., Иванов А.В., Паугурт А.П., Плешаков И.В. ЯМР и магнитоупругое взаимодействие в FeVO_3 . // ФТТ. – 1987. – Т. 29. – № 6. – С. 1819 – 1825.
5. Нестеров М.М., Плешаков И.В., Фофанов Я.А. Информационно-физические свойства нестационарных откликов в системах обработки импульсных сигналов. // Научное приборостроение. – 2006. – Т. 16. – № 2. – С. 3 – 21.
6. Нестеров М.М., Плешаков И.В., Фофанов Я.А. Амплитудные и частотные свойства параметрического эхо-сигнала в информационных системах. // Научное приборостроение. – 2006. – Т. 16. – № 1. – С. 64 – 71.
7. Плешаков И.В., Фофанов Я.А. Об эффекте усиления при возбуждении и регистрации параметрических эхо-сигналов. // Научное приборостроение. – 2007. – Т. 17. – № 2. – С. 35 – 38.
8. Андреева Г.Т., Иванов А.В., Паугурт А.П., Петров М.П., Плешаков И.В. Осцилляции в сигнале индукции и магнитоупругий ЯМР. // Тезисы XVII конференции по физике магнитных явлений. – Донецк, 1985, с. 338 – 339.
9. Петров М.П., Паугурт А.П., Плешаков И.В., Иванов А.В. Сигнал ядерной индукции в FeVO_3 при совмещении частот акустического и ядерного резонансов. // Письма в ЖТФ. – 1987. – т. 13 – № 4. – С. 193 – 196.

10. Плешаков И.В. Динамический сдвиг частоты ядерного магнитоупругого резонанса ^{57}Fe в борате железа. // ФТТ. – 2003. – Т. 45. – № 4. – С. 673 – 675.
11. Иванов А.В., Корнеев В.Р., Паугурт А.П., Плешаков И.В. Затухание магнитоупругого ЯМР в FeVO_3 . // Письма в ЖТФ. – 1988. – Т. 14. – № 22. – С. 2049 – 2052.
12. Паугурт А.П., Плешаков И.В., Хомченков И.М., Иванов А.В. Влияние ядерной спиновой системы на затухание магнитоупругих волн в FeVO_3 . // Письма в ЖТФ. – 1987. – Т. 13. – № 10. – С. 587 – 590.
13. Плешаков И.В. Регистрация фотомангнитного эффекта методом ядерного магнитного резонанса. // Письма в ЖТФ. – 2003. – Т. 29. – № 6. – С. 65 – 71.
14. Pleshakov I.V., Matveev V.V. Nuclear magnetic resonance investigation of photomagnetic phenomena in FeVO_3 . // Journal of Physics: Cond. Matter. – 2004. – V. 16. – P. 1725 – 1731.
15. Плешаков И.В., Нечитайлов А.А., Паугурт А.П., Матвеев В.В. Ядерный магнитный резонанс и фотоиндуцированные эффекты в кислорододефицитном борате железа. // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т. 31. – № 24. – С. 24 – 29.
16. Кузьмин Ю.И., Плешаков И.В. Намагничивание и критические токи керамических сверхпроводников. // Письма в ЖТФ. – 1989. – Т. 15. – № 11. – С. 30 – 35.
17. Петров М.П., Красинькова М.В., Кузьмин Ю. И., Плешаков И.В. Бесконтактные измерения критических токов в сверхпроводящих пластинах и пленках. // ФТТ. – 1990. – Т. 32. – № 2. – С. 379 – 383.
18. Petrov M.P., Krasinkova M.V., Kuzmin Yu.I., Pleshakov I.V. Magnetization and critical current in high-Tc ceramic superconductors. // In: Physical Properties of High Temperature Superconductors. – N.Y.: Nova Science Publishers Inc., 1993, P. 1 – 19.
19. Kuzmin Yu.I., Paugurt A.P., Pleshakov I.V., Razumov S.V. Transport current-activated flux creep in high-Tc superconductor thin films. // Supercond. Sci. and Technol. – 1994. – V. 7. – N 1. – P. 41 – 44.
20. Pleshakov I.V., Lasarev D.A., Grachev A.I., Paugurt A.P., Shulman S.G. Photoresponse of granular YBaCuO thin film. // Supercond. Sci. Technol. – 1996. – V. 9. – N 1. – P. 155 – 160.
21. Кузьмин Ю.И., Плешаков И.В. Статистика кластеров нормальной фазы и захват магнитного потока в пленках высокотемпературных сверхпроводников. // Письма в ЖТФ. – 1999. – Т. 25. – № 12. – С. 475 – 479.
22. Кузьмин Ю.И., Плешаков И.В., Разумов С.В. Статистическое распределение магнитных критических токов, определяемое морфологией пленок

- высокотемпературных сверхпроводников. // ФТТ. – 1999. – Т. 41. – № 10. – С. 1594 – 1599.
23. Gonzales Rodriguez G., Pleshakov I.V., Kuzmin Yu. I. Magnetic relaxation and critical currents in high- T_c superconducting thin films with a special morphology. // In: Surface science and its applications. Proceedings of 9th Latin American Congress. – Singapore, New Jersey, London, Hong Kong: Word Scientific, 1999, P. 359 – 364.
 24. Петров М.П., Дядюшкин Д.В., Иванов А.В., Красинькова М.В., Нечитайлов А.А., Паугурт А.П., Плешаков И.В. Радиочастотное эхо в иттрий- и висмутсодержащих высокотемпературных сверхпроводниках. // Сверхпроводимость: Физика, Химия, Техника. – 1990. – Т. 3. – № 10 (ч. 2). – С. 2363 – 2366.
 25. Petrov M.P., Pleshakov I.V., Paugurt A.P., Krasinkova M.V., Nechitailov A.A., Melech B.T. Radio-frequency echo in high- T_c superconductors $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ and $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$. // Solid. State Commun. – 1991. – V. 78. – N 10. – P. 893 – 895.
 26. Плешаков И.В., Нечитайлов А.А., Паугурт А.П. Фононное эхо в сверхпроводниках, содержащих магнитные ионы. // Прикладная физика. – 2005. – № 3. – С. 21 – 24.
 27. Плешаков И.В., Нечитайлов А.А., Паугурт А.П., Матвеев В.В., Фофанов Я.А., Eero Ylinen. Исследование высокотемпературных сверхпроводников, содержащих магнитные ионы, методом фононного эха. // Письма в ЖТФ. – 2007. – Т. 33. – № 24. – С. 38 – 45.
 28. Pleshakov I.V., Matveev V.V., Ylinen E., Paturi P., Laiho R. Investigation of superconducting MgB_2 by the phonon echo method. // Proceedings of NEMS symposium. – Backagården, Sweden, 2008, p. 30.
 29. Паугурт А.П., Иванов А.В., Плешаков И.В. Устройство для обработки сигналов. Авторское свидетельство СССР № 1545915, 1989 (приоритет от 10.04.1986).
 30. Иванов А.В., Паугурт А.П., Плешаков И.В. Способ управления спиновым эхопроцессором. Авторское свидетельство СССР № 1248436, 1986 (приоритет от 14.01.1983).
 31. Петров М.П., Паугурт А.П., Иванов А.В., Плешаков И.В. Использование фазовых соотношений при регистрации откликов спиновой системы. // Письма в ЖТФ. – 1986. – Т. 12. – № 14. – С. 833 – 837.