

На правах рукописи

Саласюк Алексей Сергеевич

**Гигагерцовые резонансные акустические эффекты
в тонких плёнках ферромагнитных полупроводников и опалов.**

Специальность: 01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург - 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Научный руководитель:

старший научный сотрудник к.ф.-м.н Щербаков Алексей Валерьевич.

Официальные оппоненты:

Павлов Виктор Владимирович, д.ф.-м.н., Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, с.н.с.

Вербин Сергей Юрьевич, д.ф.-м.н., проф., Санкт-Петербургский государственный университет.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Защита состоится 21 февраля 2013г. в 16:30 час. на заседании диссертационного совета Д002.205.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук по адресу 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая д. 26, ФТИ им. А. Ф. Иоффе.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А. Ф. Иоффе

Автореферат разослан « 14 » января 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, к. ф.-м. н.

А. А. Петров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы. Развитие электроники, которое в последнее десятилетие характеризуется стремительным ростом быстродействия и объема обрабатываемой информации, задает современной науке жёсткие требования по выбору объектов и методов исследований. В настоящее время одной из наиболее актуальных проблем физики твёрдого тела является поиск методов управления магнитными состояниями на сверхкоротких временах. В первую очередь это связано с тем, что классические магнитные устройства хранения информации, принцип работы которых основан на управлении локальной намагниченностью ферромагнитной плёнки при помощи внешнего магнитного поля, достигли предела своего быстродействия. В таких устройствах характерное время перемагничивания магнитного домена определяется релаксационными процессами и не может быть короче 1 наносекунды. Ближайшей целью современных исследований является реализация резонансного метода управления намагниченностью, когда вызванные внешним воздействием изменения происходят на частоте ферромагнитного резонанса с характерными временами на несколько порядков короче.

В настоящее время рассматриваются различные подходы к управлению магнитным порядком ферромагнетиков, альтернативные воздействию внешнего магнитного поля. Так сверхбыстрые изменения намагниченности могут происходить под действием сверхкоротких световых импульсов, которые, однако, вносят существенное возбуждение в другие подсистемы ферромагнетика. Другой способ управления, подтвердивший свою эффективность в стационарных экспериментах, основан на чувствительности намагниченности к деформации. *Методы пикосекундной акустики*, которые позволяют оптически генерировать в твёрдых телах пикосекундные импульсы деформации большой амплитуды, являются уникальным сочетанием этих двух различных подходов и могут стать эффективным инструментом по сверхбыстрому управлению намагниченностью в тонких пленках ферромагнетиков. До настоящего времени при исследовании сверхбыстрых динамических магнитных процессов в ферромагнитных структурах методы пикосекундной акустики не применялись.

Эффективность воздействия импульсов деформации, которые являются когерентными акустическими волновыми пакетами с широким спектром, на магнитную подсистему ферромагнетика определяется плотностью состояний акустических колебаний на частоте ферромагнитного резонанса. Способностью выделять из широкого акустического спектра когерентные упругие колебания гигагерцовых частот обладают структуры, получившие название гиперзвуковых фононных кристаллов. В таких структурах периодическая модуляция акустического импеданса с пространственным периодом ~ 100 нм приводит к формированию запрещённых фононных зон, и локализованные колебания с соответствующей частотой могут демонстрировать аномально высокую спектральную плотность. Однако до настоящего времени кинетика возбуждения и распространения упругих колебаний в трёхмерных гиперзвуковых фононных кристаллах оставалась не изученной.

Таким образом, **целью работы** является исследование динамических магнитных эффектов, индуцированных пикосекундными импульсами деформации в тонких ферромагнитных плёнках, а также изучение кинетики возбуждения и распространения когерентных упругих колебаний в плёнках трёхмерных фононных кристаллов. В качестве модельных объектов для исследования были выбраны плёнки ферромагнитных полупроводников, демонстрирующие высокую чувствительность магнитных свойств к деформации, и плёнки синтетических опалов, проявляющие уникальное сочетание свойств фононных и фотонных кристаллов.

Научная новизна работы определяется тем, что в ней впервые:

1. динамические магнитные свойства ферромагнетика исследуются сочетанием методов пикосекундной акустики и сверхбыстрой магнитооптической спектроскопии;

2. осуществлена сверхбыстрая модуляция намагниченности ферромагнитной плёнки под действием пикосекундного импульса деформации;

3. осуществлено селективное возбуждение стоячей спиновой волны под действием когерентного акустического волнового пакета с широким спектром;

4. в трёхмерном гиперзвуковом фононном кристалле в реальном времени зафиксирован процесс выделения из широкого акустического спектра локализованных когерентных упругих колебаний гигагерцовых частот.

Научное и практическое значение работы состоит в том, что в ней экспериментально продемонстрирован новый способ сверхбыстрой модуляции намагниченности ферромагнетиков, который может стать основой для создания сверхбыстрого метода управления намагниченностью в устройствах хранения информации. Помимо этого предложенные в работе подходы и решения позволяют исследовать динамические магнитные свойства ферромагнитных материалов с высоким временным разрешением. Получена принципиально важная информация о механизмах взаимодействия когерентных гиперзвуковых колебаний с магнитной подсистемой ферромагнитных полупроводников, которая при этом отражает общие закономерности резонансных магнитоакустических процессов в ферромагнетиках. Принципиально важным является также экспериментальное подтверждение существования полной запрещённой фононной зоны в плёнках синтетических опалов, что открывает широкие перспективы по управлению резонансными акустическими явлениями в гигагерцовом и субтерагерцовом диапазонах.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Разработан экспериментальный метод исследования резонансного взаимодействия когерентных ГГц акустических волн и магнитной подсистемы в нанометровых ферромагнитных плёнках, основанный на сочетании методов пикосекундной акустики и сверхбыстрой магнитооптической спектроскопии. Разработанный метод позволяет получать новую информацию о магнитоакустическом взаимодействии и является основой для сверхбыстрого управления намагниченностью ферромагнитных наноструктур.

- Инжектированный в плёнку ферромагнитного полупроводника (Ga,Mn)As, пикосекундный импульс деформации вызывает сверхбыструю модуляцию магнитокристаллической анизотропии, что приводит к когерентной прецессии намагниченности на частоте ферромагнитного резонанса.
- При приложении внешнего магнитного поля перпендикулярно плоскости ферромагнитной плёнки (Ga,Mn)As кинетика намагниченности описывается с высокой точностью численной моделью, в которой деформация вдоль оси роста структуры вызывает прямопропорциональное изменение перпендикулярного одноосного поля анизотропии.
- Кинетический сигнал полярного керровского вращения, измеренный в ферромагнитном (Ga,Mn)As и обусловленный прецессией намагниченности, содержит вклад от гигантского магнитного линейного дихроизма, присущего (Ga,Mn)As. В результате временная эволюция керровского сигнала зависит от взаимной ориентации плоскости поляризации пробирающего света и стационарной ориентации намагниченности в плоскости ферромагнитного слоя.
- Экспериментально продемонстрировано селективное возбуждение стоячих спиновых волн в нанометровых ферромагнитных слоях под действием субтерагерцовых акустических волновых пакетов с широким спектром. Селективное возбуждение одиночной спиновой моды обусловлено пространственным перекрытием волновых функций спиновой волны и резонансной с ней по частоте фононной моды.
- При возбуждении когерентного акустического волнового пакета в плёнках синтетических опалов наблюдается аномально долгое время жизни упругих колебаний кварцевых сфер на определённой частоте. Это является экспериментальным доказательством наличия полной запрещённой фононной зоны, приводящей к локализации у поверхности упругих мод с частотой, соответствующей её спектральному положению.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены на научных семинарах в ФТИ им. А.Ф. Иоффе (лаб. Каплянскогo, лаб. Кусраева, низкоразмерный семинар), СПбГУ и TU Dortmund (Германия), а также на следующих российских и международных конференциях: Российская молодёжная конференция по физике и астрономии "ФизикА.СПб" (Санкт Петербург, 2009); 13-я и 14-я Международные конференции по рассеянию фононов в твёрдых телах "Phonons 2010, 2012" (Тайпей, Тайвань, 2010 и Эн Арбор, США, 2012); Международная летняя школа "Son et Lumier (Свет и звук)" 2010 (Каржез, Франция) и 2012 (Лезуш, Франция); Международная летняя школа "Наноматериалы на основе неорганических материалов" (Каржез, Франция, 2011), Научное совещание «Опалоподобные структуры» (Санкт-Петербург, 2010; работа отмечена призом за лучший доклад среди молодых учёных).

Публикации. Основные результаты проведённых исследований опубликованы в 6-ти печатных работах, список которых приведён в конце диссертации.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы из 210 наименований. Общий объём работы – 158 страниц машинописного текста, включая 31 рисунок.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулирована основная цель работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава носит обзорный характер. В ней рассмотрены основные методы пикосекундной акустики и основные результаты, полученные при исследовании гетеро- и наноструктур этими методами, а также основные свойства плёнок разбавленных ферромагнитных полупроводников.

Во второй главе подробно представлен разработанный в рамках диссертации метод возбуждения когерентной прецессии намагниченности ферромагнитных полупроводников пикосекундными импульсами деформации, и приведены результаты экспериментов с плёнками ферромагнитного (Ga,Mn)As.

В экспериментах исследовались три плёнки ферромагнитного (Ga,Mn)As, у которых отличались толщина (100, 200 и 300 нм) и доля марганца (2.5%, 5% и 2.5% соответственно). Все структуры были выращены методом низкотемпературной молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках GaAs.

Магнитокристаллическая анизотропия исследуемых плёнок описывается разложением свободной энергии по направлениям намагниченности. В состав разложения входят поля кубической и одноосной анизотропии, значения которых определяются симметрией кристалла и изменяются под воздействием приложенной деформации. Направления, соответствующие минимумам свободной энергии в отсутствие внешнего магнитного поля, называются лёгкими осями намагничивания, а максимумам – трудными осями намагничивания. Обычно в плёнках (Ga,Mn)As с умеренным содержанием Mn, выращенных на подложках GaAs, лёгкие оси лежат в плоскости слоя вдоль направлений [100] и [010], а трудная ось – вдоль направления [001] по нормали к плоскости. Такой характер магнитной анизотропии имели все исследуемые в работе ферромагнитные плёнки, что подтверждено экспериментально измеренными стационарными кривыми намагничивания.

Внешнее магнитное поле \vec{B} , приложенное по нормали к плёнке вдоль оси трудного намагничивания, выводит намагниченность \vec{M} из плоскости, и направление \vec{M} задаётся полярным углом θ (см. Рис. 1(а)). Можно ввести эффективное магнитное поле $\vec{B}_{эфф}$, вдоль которого в равновесии направлена намагниченность. Направление $\vec{B}_{эфф}$ определяется балансом между внешним полем \vec{B} и полями магнитокристаллической анизотропии. Идея эксперимента заключается в том, чтобы инжектировать в образец пикосекундный импульс деформации и вызвать сверхбыстрые изменения полей магнитокристаллической ани-

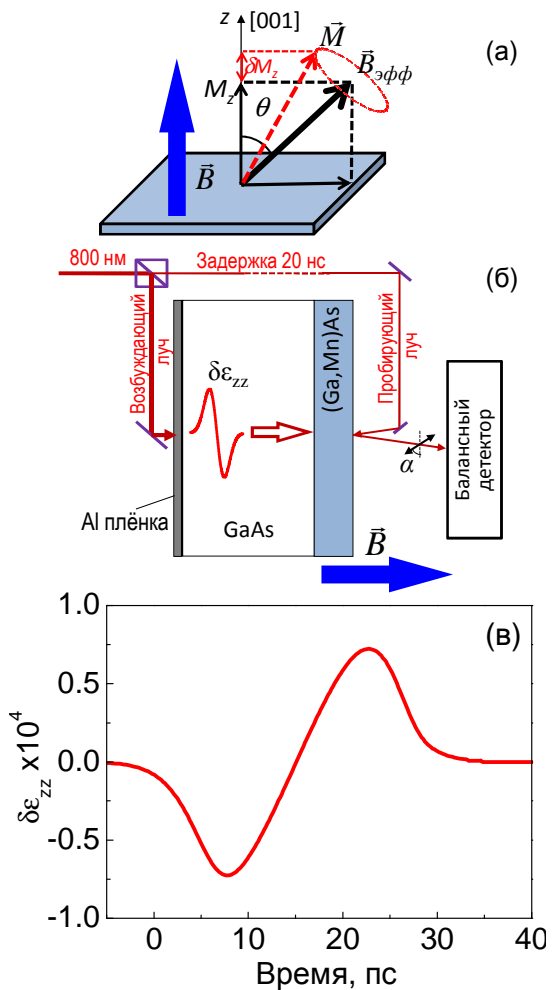


Рис. 1. а) Геометрия эксперимента; б) схема эксперимента; в) временной профиль импульса деформации.

Характерное время распространения импульса деформации в ферромагнитной плёнке составляло $\sim 10 \div 100$ пс.

Вызванные импульсом деформации сверхбыстрые изменения магнитокристаллической анизотропии приводили к возбуждению когерентной прецессии намагниченности (Рис. 1(а)), которая детектировалась оптически с субпикосекундным временным разрешением. Принцип детектирования основан на магнитооптическом эффекте Керра, при котором плоскость поляризации лазерного луча, отражённого от (Ga,Mn)As, поворачивалась на угол, пропорциональный нормальной компоненте намагниченности. Детектирующий луч был отведён от того же лазера, что и возбуждающий, и фокусировался на поверхности (Ga,Mn)As точно напротив фокусного пятна возбуждающего луча. Временное разрешение было реализовано путём изменения задержки между импульсами возбуждающего и детектирующего лучей. Во время измерений образец находился в оптическом гелиевом криостате при постоянной температуре 6К. Внешнее магнитное поле создавалось сверхпроводящим соленоидом.

На Рис. 2(а) показан экспериментальный кинетический сигнал – зависимость угла поворота плоскости поляризации, α , от времени задержки. За точку отсчёта принят момент входа импульса деформации в ферромагнитный слой.

зотропии и, соответственно, направления $\vec{B}_{эфф}$. Изменение направления эффективного поля вызовет прецессию намагниченности.

В приведённых исследованиях пикосекундные импульсы деформации генерировались оптически с использованием известных методов пикосекундной акустики [1]. Схема опыта показана на Рис. 1(б). Роль оптоакустического преобразователя играла алюминиевая плёнка толщиной 100 нм, напылённая на обратную сторону образца. Луч фемтосекундного лазера с длиной волны 800 нм, длительностью импульсов 200 фс, частотой повторений 100 кГц и плотностью возбуждения 3 мДж/см², сфокусированный на алюминиевой плёнке, возбуждал в ней пикосекундные импульсы деформации $\delta\epsilon_{zz}(t)$ амплитудой до 10^{-4} и длительностью ~ 10 пс (Рис. 1(в)), которые впрыскивались в подложку и распространялись в сторону ферромагнитной плёнки со скоростью продольного звука. Достигая (Ga,Mn)As, импульсы деформации проходили в магнитную плёнку, доходили до ее открытой границы, отражались и уходили обратно в подложку.

Сигнал может быть разделён на три интервала, на каждом из которых наблюдается различный характер колебаний. Колебания, наблюдаемые до того, как импульс деформации вошёл в ферромагнитный слой, вызваны бриллюэновским рассеянием света на распространяющемся импульсе деформации. Их вклад в сигнал обусловлен магнитным циркулярным дихроизмом подложки. Подобную природу имеют и осцилляции, наблюдаемые на временном интервале от нуля до 120 пс, когда импульс деформации распространяется в ферромагнитном слое. Описанные составляющие сигнала не связаны с кинетикой намагниченности и подробно обсуждаются в работе [2]. В настоящей работе производится анализ экспериментальных сигналов на временном интервале $t > 120$ пс после того, как импульс деформации покинул ферромагнитный слой. Наблюдаемые на данном интервале долгоживущие низкочастотные осцилляции обусловлены исключительно прецессией намагниченности.

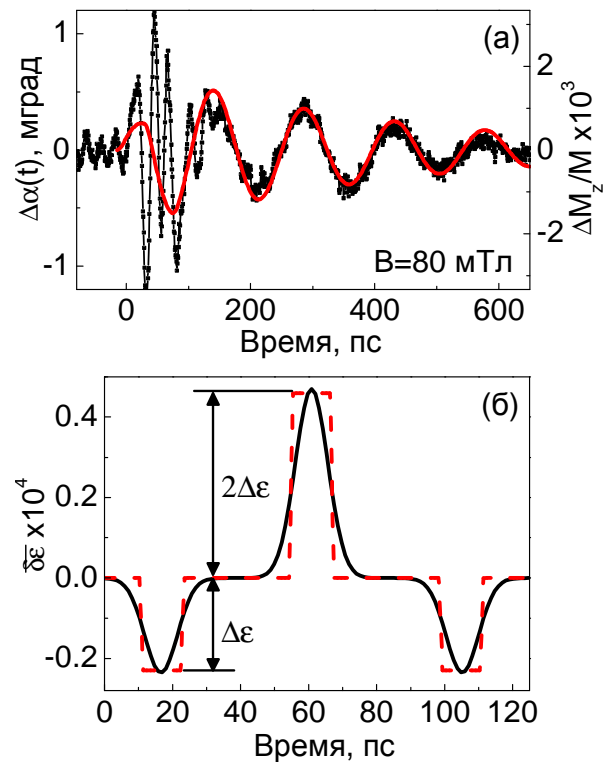


Рис. 2. а) Кинетический сигнал керовского вращения, полученный от плёнки $\text{Ga}_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{As}$ толщиной 200 нм в магнитном поле $B=80$ мТл. б) Изменения деформации плёнки во времени. Штриховой линией показана аппроксимация ступенчатыми функциями.

Кинетические сигналы были измерены во всех исследуемых структурах при разных значениях внешнего поля, плотности возбуждения, температуры. Проведённые исследования однозначно показывают, что *когерентная прецессия намагниченности индуцирована импульсом деформации*. Качественно сигналы, полученные на различных структурах при идентичных экспериментальных условиях, не отличаются. Незначительно отличаются лишь частота и амплитуда колебаний, обусловленных прецессией намагниченности. Различия связаны с особенностями магнитокристаллической анизотропии структур, которая изменяется в зависимости от концентрации марганца и толщины ферромагнитной плёнки.

Анализ воздействия импульса деформации на магнитокристаллическую анизотропию ферромагнитного $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$ сводится к тому, чтобы определить, на какой угол отклоняется эффективное поле под действием динамической деформации, и какова реакция намагниченности на это отклонение. Для этого была предложена численная модель, в которой *распространение импульса деформации в $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$ рассматривается как изменение во времени деформации всей плёнки*: $\delta\epsilon(t) = \frac{\Delta d(t)}{d} = \frac{1}{d} \int_0^d \delta\epsilon_{zz}(z,t) dz$ (Рис. 2(б)). Для упрощения ана-

$$\delta\epsilon(t) = \frac{\Delta d(t)}{d} = \frac{1}{d} \int_0^d \delta\epsilon_{zz}(z,t) dz \quad (\text{Рис. 2(б)}).$$

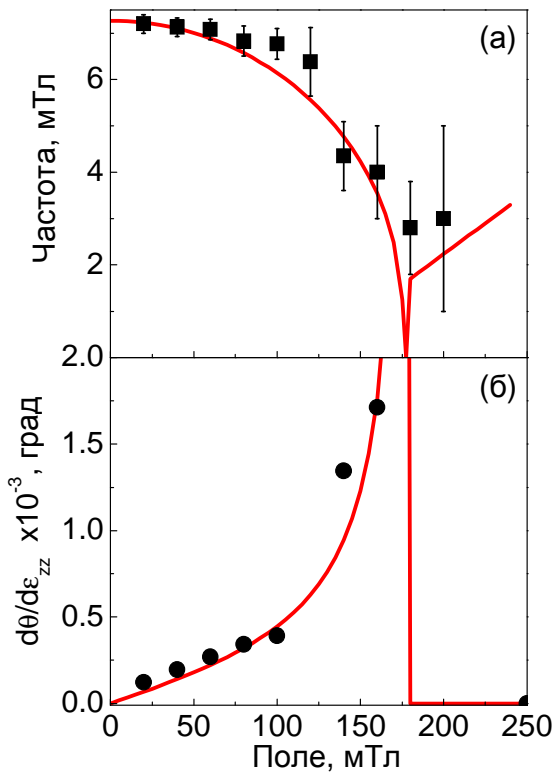


Рис. 3. а) Полевые зависимости частоты ферромагнитного резонанса, рассчитанной из параметров магнитокристаллической анизотропии исследуемой структуры (сплошная), и частоты прецессии намагниченности, полученной из эксперимента (точки); б) экспериментальная (точки) и расчётная (сплошная) полевые зависимости коэффициента отклонения $B_{эфф}$ вдоль оси роста структуры.

Таким образом, всё время, пока импульс деформации находится в слое (Ga,Mn)As, прецессионное движение намагниченности имеет довольно сложную траекторию. Лишь после того, как импульс покинет слой, и эффективное поле вернется к своему равновесному направлению, будет наблюдаться затухающая прецессия намагниченности, по завершению которой намагниченность вновь выстроится параллельно эффективному полю.

Аппроксимация экспериментальных сигналов кривыми, полученными в результате моделирования кинетики намагниченности, показана красной линией на Рис 2(а). Задачей анализа было нахождение для каждого экспериментального сигнала частоты прецессии и величины коэффициента $d\theta/d\varepsilon_{zz}$, связывающего отклонение $\vec{B}_{эфф}$ с величиной приложенной деформации $\Delta\varepsilon$. Полевые зависимости частоты прецессии и коэффициента $d\theta/d\varepsilon_{zz}$, полученные с использованием предложенной модели, имеют хорошее согласие с результатами расчётов, проведённых в рамках феноменологического подхода [3], и представлены на Рис. 3. Сплошными кривыми на Рис. 3(а) и 3(б) показаны расчетные зависимости, полученные из стационарных измерений кривых намагничивания и ферромагнитного резонанса. Наблюдается прекрасное согласие результатов кинетических и стационарных измерений. Таким образом, можно утверждать, что во внешнем магнитном поле, приложенном перпендикулярно плоскости плён-

лиза эти временные изменения аппроксимированы набором ступенчатых функций, как показано штриховой линией на Рис. 2(б).

В тот момент, когда деформация плёнки вдоль оси роста изменяется скачком на величину $\Delta\varepsilon$, эффективное поле отклоняется вертикально на угол $\Delta\theta = \frac{d\theta}{d\varepsilon_{zz}} \Delta\varepsilon$, про-

порциональный приложенной деформации. Такой характер модуляции эффективного поля соответствует изменению под действием деформации только одного параметра магнитокристаллической анизотропии: поля одноосной перпендикулярной анизотропии. В результате такого отклонения вектора $\vec{B}_{эфф}$ и \vec{M} оказываются неколлинеарны, и намагниченность начинает прецессировать вокруг $\vec{B}_{эфф}$. Прецессия вокруг этой оси продолжается до тех пор, пока деформация не изменит своего значения. Это приведёт к изменению положения $\vec{B}_{эфф}$, а значит, и оси прецессии намагниченности.

ки, кинетика намагниченности, вызванная импульсом деформации, определяется изменением только перпендикулярного одноосного поля анизотропии.

Как видно из Рис. 3(а), частота прецессии, возбуждаемой импульсом деформации, совпадает с частотой ферромагнитного резонанса в исследуемой структуре. Можно сказать, что *когерентная прецессия намагниченности возбуждается резонансными акустическими колебаниями, входящими в когерентный волновой пакет пикосекундного импульса деформации*, и частота этих колебаний совпадает с частотой ферромагнитного резонанса [3]. При низкой частоте прецессии, когда длина волны резонансного фонона значительно превышает толщину ферромагнитной плёнки, воздействие импульса деформации может сводиться к модуляции толщины плёнки, и предложенная в данной главе модель хорошо описывает экспериментальные результаты. Однако, в случае прецессии с высокой частотой, когда длины волн резонансных фононов сравнимы с толщиной ферромагнитной плёнки, становятся важными волновые свойства импульса деформации и магнитных возбуждений. Процесс возбуждения прецессии намагниченности в данном случае потребует изучения механизмов взаимодействия резонансных фононов со стоячими спиновыми волнами в плёнках (Ga,Mn)As.

Этой задаче посвящена **третья глава** настоящей диссертации. В данной главе представлены результаты экспериментов по возбуждению прецессии намагниченности, когда внешнее поле приложено в плоскости ферромагнитной плёнки вдоль лёгкой оси в направлении [100]. В такой экспериментальной геометрии частота ферромагнитного резонанса растёт вместе с приложенным полем. При этом амплитуда прецессии остается значительной, что позволяет исследовать отклик магнитной системы в широком диапазоне магнитных полей и резонансных частот.

В проведённых экспериментах использовалась плёнка $\text{Ga}_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{As}$ толщиной 200 нм. Генерация импульсов деформации осуществлялась с использованием описанных выше методов пикосекундной акустики, а детектирование кинетики намагниченности осуществлялось оптически. Однако, при такой экспериментальной геометрии поворот плоскости поляризации отражённого света обусловлен не только магнитным циркулярным дихроизмом, но и содержит вклад гигантского магнитного линейного дихроизма, присущего (Ga,Mn)As [4]. В результате вклад в детектируемый сигнал даёт не только модуляция нормальной компоненты намагниченности, но и модуляция проекции намагниченности в плоскости слоя. *Вклад в кинетический сигнал, обусловленный гигантским линейным дихроизмом, определяется взаимной ориентацией намагниченности и электрического поля световой волны* пробирающего импульса, поэтому сигналы керровского вращения, измеренные при четырех различных взаимных ориентациях намагниченности и плоскости поляризации, позволяют *разделить кинетику нормальной и продольной компонент намагниченности*.

В измеренных кинетических сигналах, один из которых представлен на Рис. 4(а), заметны биения, свидетельствующие о наличии нескольких частот

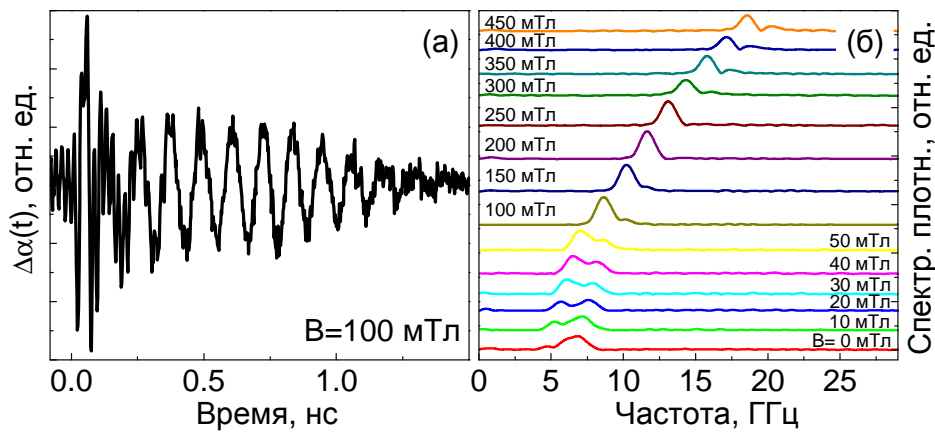


Рис. 4. а) Кинетический сигнал, измеренный в поле $B=100$ мТл, приложенном в плоскости слоя, когда вектор электрического поля пробирующего луча параллелен намагниченности. б) Полевая зависимость Фурье-спектров кинетических сигналов.

прецессии намагниченности. Фурье-анализ наблюдаемых осцилляций показал наличие в спектре двух линий, частота которых растёт с приложенным полем, как видно на Рис. 4(б). Расщепление между линиями остаётся постоянным во всём диапазоне полей. Главным результатом измерений является наблюдение в поле $B \approx 225 \pm 25$ мТл лишь одного низкочастотного пика на частоте 12 ГГц в то время, как спектральная амплитуда второго пика равна нулю.

Наличие нескольких спектральных линий может быть объяснено возбуждением в ферромагнитной пленке нескольких стоячих спиновых волн пикосекундным импульсом деформации. При этом каждый пик может быть соотнесён с определённой спиновой модой. Подобное возбуждение спиновых волн в (Ga,Mn)As было осуществлено оптическими методами ранее в работе [5], однако в этой работе не наблюдалось зависимости относительных амплитуд спиновых волн от поля: они оставались постоянными во всем диапазоне полей.

Для объяснения экспериментальных результатов необходимо решить уравнение Ландау-Лифшица с учетом обменного взаимодействия. Для решения был использован формализм модового разложения намагниченности. Расчёт показывает, что *амплитуда возбуждаемых спиновых волн пропорциональна интегралу пространственного перекрытия волновых функций спиновой волны и фона, резонансного с ней*. Волновые функции спиновых волн определяются граничными условиями, задающими положение намагниченности на границах ферромагнитной пленки. Известно несколько типов таких условий, однако вопрос о применимости того или иного типа остаётся открытым. В настоящей диссертации рассмотрены основные известные граничные условия, однако селективность возбуждения спиновых волн пикосекундным импульсом деформации наилучшим образом описывается при использовании граничных условий закрепления, при которых волновые функции спиновых волн имеют узлы на границах ферромагнитной плёнки, как показано на Рис. 5(б)-(г) для трех низших спиновых мод с номерами $n=0,1,2$. При этом узел на открытой границе ферромагнитной плёнки имеют и все спектральные компоненты импульса деформации.

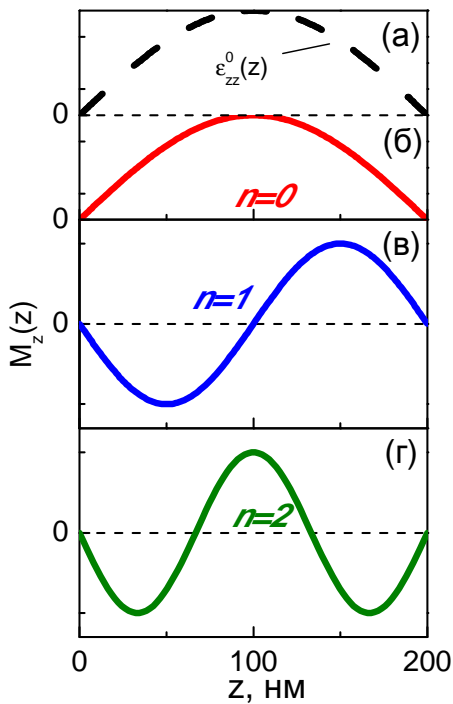


Рис. 5. а) Пространственный профиль упругой волны на частоте 12 ГГц, на которой происходит селективное возбуждение спиновых волн; (б)-(г) пространственные профили спиновых волн с разными номерами, рассчитанные с учётом граничных условий закрепления.

В граничных условиях закрепления намагниченности величина расщепления спиновых мод пренебрежимо мала по сравнению с частотой нижней спиновой моды, и можно принять, что спиновые моды высших порядков имеют ту же частоту, что и нижайшая мода. Таким образом, фоновый на частоте нижней спиновой моды должен возбудить все спиновые моды, с которыми его волновая функция имеет ненулевой интеграл перекрытия. Частота возбуждаемых спиновых волн, а значит и частота резонансного с ними фонона, определяются величиной магнитного поля. И при определённом значении магнитного поля волновая функция резонансного фонона будет иметь узлы на двух границах ферромагнитной плёнки, как показано штриховой линией на Рис 5(а). В таком случае интеграл перекрытия будет ненулевым только для одной спиновой волны (для случая, представленного на Рис. 5, спиновая волна $n=0$), а значит, только эта спиновая волна будет возбуждена импульсом деформации. В исследуемой плёнке толщиной 200 нм такое пространственное распределение в ферромагнитном

слое имеет спектральная компонента импульса деформации с частотой 12 ГГц. Именно при такой частоте прецессии наблюдается одиночная линия в Фурье-спектрах керровского сигнала, что подтверждает предложенную модель селективного возбуждения.

Таким образом показано, что *пикосекундный импульс деформации с широким акустическим спектром возбуждает спиновые волны в ферромагнитном (Ga,Mn)As*. Амплитуда возбуждаемых спиновых волн зависит от пространственного перекрытия волновых функций спиновой волны и резонансного фонона, что приводит в определённых условиях к селективному возбуждению одной спиновой моды.

С учетом резонансного характера взаимодействия пикосекундного импульса деформации с намагниченностью ферромагнитных полупроводниковых слоев, можно ожидать высокую эффективность такого взаимодействия, если спектральная плотность упругих колебаний генерируемого волнового пакета на резонансной частоте будет максимальной. Способностью выделять из широкого акустического спектра узкую спектральную линию обладают периодические резонансные фоновые структуры – фоновые кристаллы. Наибольшей эффективностью при этом обладают трёхмерные структуры, в которых возможно формирование полной запрещённой фоновой зоны. К таким структурам относятся синтетические опалы, в которых период модуляции акустического импеданса в несколько сотен нанометров приводит к возникновению фоновых

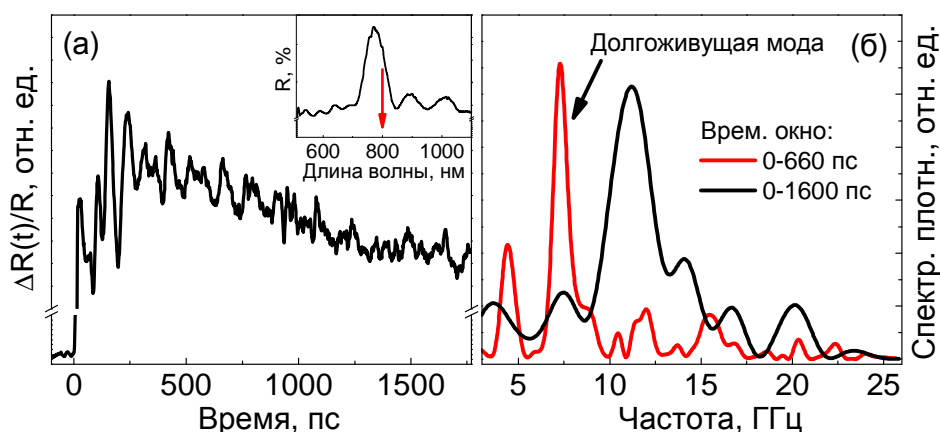


Рис. 6. а) Экспериментальный сигнал, представленный как временная зависимость относительных изменений интенсивности отражённого света. На вкладке показан оптический спектр отражения исследуемой опаловой плёнки, измеренный под углом падения 13° . Длина волны используемого лазера, 800 нм, попадает на крыло фотонной стоп-зоны. б) Фурье-спектры экспериментальных сигналов, рассчитанные на отрезках 0-660 пс (чёрная кривая) и 0-1600 пс (красная кривая).

стоп-зон в гигагерцовой области частот, что совпадает с характерной частотой ферромагнитного резонанса большинства ферромагнитных структур. В работе [6] было теоретически показано, что в плёнках синтетических опалов возможно наличие *полной запрещённой фонной зоны* на частоте ≈ 10 ГГц. Таким образом, становится актуальным исследование генерации и распространения пикосекундных импульсов деформации в пространственно-периодических фонных структурах с периодом ~ 100 нм.

Глава 4 посвящена исследованию генерации и распространению гиперзвуковых колебаний в плёнках синтетических опалов. Синтетический опал состоит из слоев плотноупакованных сфер SiO_2 . Для формирования запрещённой фонной зоны в опале необходимы регулярные механические связи между сферами, потому для исследований было выращено 10 плёночных синтетических опалов с различными коэффициентами спекания (синтерингом) $\chi = D/2a - 1$, определяющими степень взаимного проникновения сфер друг в друга, где D – диаметр сфер, $2a$ – расстояние между центрами соседних сфер. Из [6] известно, что с ростом синтеринга ширина полной фонной зоны снижается, а после определённого значения фонные зоны исчезают вовсе, т.к. с повышением степени спекания акустические свойства опала всё больше приближаются к свойствам объёмного SiO_2 .

Исследуемые образцы плёнок синтетических опалов состояли из сфер $\alpha\text{-SiO}_2$ диаметром 350 нм, осаждённых на стеклянные подложки. Структуры содержали 5-10 плотноупакованных слоёв сфер. Для инжектирования импульсов деформации алюминиевая плёнка наносилась непосредственно на поверхность опала, а детектирование осуществлялось со стороны прозрачной подложки. Принцип детектирования основан на том, что опал является фотонным кристаллом, то есть в спектре его оптического отражения присутствуют фотонные стоп-зоны, положение которых определяется размером шаров. Упругие колебания изменяют размеры шаров и, как следствие, приводят к модуляции оптических свойств опала. Эта модуляция может быть зафиксирована по изменению

отражения света с длиной волны, соответствующей фотонной стоп-зоне. Максимальная чувствительность детектирования возможна, когда длина волны пробирующего лазера попадает на крыло фотонной стоп-зоны. Характерный спектр отражения исследуемой структуры показан на вставке в Рис. 6(а).

На Рис. 6(а) показан кинетический сигнал, измеренный в структуре с минимальным коэффициентом спекания $\chi = 4.6 \times 10^{-3}$. Нулевой момент времени соответствует приходу возбуждающего импульса в алюминиевую плёнку, после чего наблюдается колебательное поведение интенсивности. Форма кинетического сигнала не зависит от параметров эксперимента таких, как плотность возбуждения, число слоёв, угол падения пробирующего луча, а зависит лишь от параметров образца. Независимость формы сигнала от угла падения говорит о том, что основной вклад в процесс детектирования дают колебания приповерхностных сфер вблизи алюминиевой плёнки.

Чтобы определить частотный состав возбуждаемых колебаний, были рассчитаны их Фурье-спектры. При этом Фурье-анализ производился как для всего временного диапазона, так и в выбранном узком временном интервале. В начальный момент времени (до 660 пс, чёрная линия на Рис. 6(б)) возбуждается широкий спектр колебаний с центральной частотой 10-12 ГГц. Это частота хорошо согласуется с частотой лэмбовской колебательной моды одиночных сфер [6]. В спектре на большом временном окне шириной 1600 пс, видна узкая интенсивная линия на частоте 7.5 ГГц, а колебаний на частоте 10-12 ГГц не наблюдается. Мы можем сделать вывод, что высокочастотные колебания, возбуждаемые в начальный момент времени, быстро покидают поверхность и распространяются в объём опала, где затухают. А мода на частоте 7.5 ГГц оказывается локализованной у поверхности и имеет значительно большее время жизни.

Сравнение экспериментальных результатов с теоретическими, представленными в работе [6] для плёнок идеального опала, говорит о том, что *частота долгоживущей моды, обнаруженной в эксперименте, совпадает с расчетным положением запрещённой фононной зоны*. Это подтверждает предположение о локализации вблизи поверхности моды на 7.5 ГГц. Также в пользу локализации колебаний говорит и то, что в реальном опале всегда присутствует доля разупорядоченности и нерегулярностей связей, что приводит к быстрой потере когерентности и затуханию распространяющихся мод. Следовательно, долгое время жизни может наблюдаться лишь у локализованных упругих колебаний. В структурах с большим коэффициентом синтеринга, при котором полная фононная зона не формируется, долгоживущих поверхностных колебаний не обнаружено.

Таким образом, в плёнках синтетических опалов с малым коэффициентом синтеринга была экспериментально показана возможность локализации гигагерцовых упругих колебаний, частота которых лежит в том же диапазоне, что и частота ферромагнитного резонанса многих ферромагнетиков.

В заключении приводятся основные выводы работы, которые также даны в конце каждой главы.

Библиография разделена на две части: в первой представлены работы автора, в которых опубликованы основные результаты исследований по теме диссертации, а во второй части приведена цитируемая литература.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Разработан метод возбуждения когерентной прецессии намагниченности плёнок ферромагнитного (Ga,Mn)As при помощи пикосекундных импульсов деформации. Метод может стать основой для сверхбыстрого управления магнитным порядком ферромагнитных наноструктур. Также с использованием этого метода может быть получена информация о динамических магнитных свойствах ферромагнитных полупроводников.
2. Показано, что при приложении внешнего магнитного поля перпендикулярно плоскости слоя, кинетика намагниченности, вызванная воздействием пикосекундного импульса деформации, обусловлена изменением величины поля одноосной перпендикулярной анизотропии.
3. Впервые при помощи пикосекундных акустических импульсов были возбуждены стоячие спиновые волны в ферромагнитном (Ga,Mn)As. Амплитуда спиновых волн определяется пространственным перекрытием волновых функций спиновой волны и резонансного фонона на частоте спиновой волны, что допускает возможность селективного возбуждения спиной волны акустическим импульсом с широким спектром.
4. Обнаружены долгоживущие упругие колебания в плёнках синтетического опала, локализованные на поверхности либо дефекте вблизи поверхности плёнки, что является первым экспериментальным подтверждением наличия в синтетическом опале полной запрещённой фононной зоны в гигагерцовой области частот.

Основные результаты диссертации отражены в работах:

- 1А. Salasyuk A. S., Scherbakov A. V., Yakovlev D. R. et al. Filtering of Elastic Waves by Opal-Based Hypersonic Crystal // *Nanoletters*. 2010. Vol. 10. P. 1319-1323.
- 2А. Scherbakov A. V., Salasyuk A. S., Akimov A. V. et al. Coherent Magnetization Precession in Ferromagnetic (Ga,Mn)As Induced by Picosecond Acoustic Pulses // *Physical Review Letters*. 2010. Vol. 105. P. 117204.
- 3А. Саласюк А. С., Щербаков А. В., Акимов А. В. и др. Оптические свойства пленок синтетического опала с подрешеткой пор, заполненных медью // *Физика твёрдого тела*. 2010. Т. 52. С. 1098-1103.

- 4A. Salasyuk A. S., Scherbakov A. V., Yakovlev D. R. et al. Long-living GHz Vibrations in Opal-based Hypersonic Crystals // Chinese Journal of Physics. 2011. Vol. 49. P. 56.
- 5A. Bombeck M., Salasyuk A. S., Glavin B. A. et al. Excitation of spin waves in ferromagnetic (Ga,Mn)As layers by picosecond strain pulses // Physical Review B. 2012. Vol. 85. P. 195324.
- 6A. Akimov I. A., Belotelov V. I., Scherbakov A. V. et al. Hybrid structures of magnetic semiconductors and plasmonic crystals: a novel concept for magneto-optical devices // Journal of the Optical Society of America B. 2012. Vol. 29. No. 2. P. A103-A118.

Цитируемая литература

1. Tas G. and Maris H. J. Electron diffusion in metals studied by picosecond ultrasonics // Physical Review B. 1994. Vol. 49. P. 15046–15054.
2. Thevenard L., Perrone E., Gourdon C. et al. Effect of picosecond strain pulses on thin layers of the ferromagnetic semiconductor (Ga,Mn)(As,P) // Physical Review B. 2010. Vol. 82. P. 104422.
3. Linik T. L., Scherbakov A. V., Yakovlev D. R. et al. Theory of magnetization precession induced by a picosecond strain pulse in ferromagnetic semiconductor (Ga,Mn)As // Physical Review B. 2011. Vol. 84. P. 214432.
4. Kimel A. V., Astakhov G. V., Kirilyuk A. et al. Observation of giant magnetic linear dichroism in (Ga,Mn)As // Physical Review Letters. 2005. Vol. 94. P. 227203.
5. Wang D. M., Ren Y. H., Liu X. et al. Light-induced magnetic precession in (Ga,Mn)As slabs: Hybrid standing-wave Damon-Eshbach modes // Physical Review B. 2007. Vol. 75 P. 233308.
6. Akimov A. V., Tanaka Y., Pevtsov A. B. et al. Hypersonic modulation of light in three-dimensional photonic and phononic band-gap materials // Physical Review Letters. 2008. Vol. 101. P. 033902.