

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 538.91:537.622.4

КУХАРЕВ
Андрей Валерьевич

**КОЛЕБАНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ НАМАГНИЧЕННОСТИ
В ФЕРРОМАГНИТНЫХ НАНОСТРУКТУРАХ
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ
ПО СПИНУ ЭЛЕКТРОНОВ И ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

по специальности 05.16.08 – Нанотехнологии и наноматериалы

Минск 2014

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель **Данилюк Александр Леонидович**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты: **Квасов Николай Трофимович**, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник кафедры «Физика твердого тела» Белорусского государственного университета

Пушкарчук Александр Леонидович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Государственного научного учреждения «Институт физико-органической химии» Национальной академии наук Беларуси

Оппонирующая организация Государственное научно-производственное объединение «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению»

Защита состоится 4 июня 2015 г. в 16.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.07 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан « » апреля 2015 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
доктор физ.-мат. наук

Д. Б. Мигас

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Гетерогенные многослойные ферромагнитные наноструктуры являются базовыми компонентами спинтроники – области науки и техники, изучающей спин-зависимый электронный транспорт в твердотельных телах и низкоразмерных структурах. Многообещающим эффектом, открытым в 1996 г. Слончевским и Берже, является квантовомеханический эффект *вращающего момента, создаваемого переносом спина* (англ. – spin transfer torque). Эффект заключается в возникновении вращающего момента, действующего на атомы ферромагнетика за счет рассеяния спин-поляризованного потока носителей заряда в приграничной области ферромагнитного слоя в наноструктуре ферромагнетик/диамагнитный металл/ферромагнетик (типа спинового вентиля) при пропускании через нее электрического тока. Это позволяет переключать направление намагниченности либо генерировать колебания намагниченности без приложения внешних магнитных полей. Эффект переноса спина открывает широкие перспективы для разработки новых устройств спинтроники и наноэлектроники. Магнитная память на эффекте переноса спина может обладать более высокой плотностью упаковки, высоким быстродействием и низким энергопотреблением по сравнению с магниторезистивной памятью, в которой переключение направления намагниченности осуществляется внешним магнитным полем. Возбуждение колебаний намагниченности спин-поляризованным током позволяет разрабатывать наноразмерные генераторы микроволнового излучения с управляемой частотой.

В настоящее время остается ряд проблем, сдерживающих практическое использование эффекта переноса спина, основной из которых является высокая плотность тока переключения или генерации колебаний намагниченности. На пороговые токи оказывают влияние как параметры самой наноструктуры, так и внешние факторы, такие как лазерное излучение и механические нагрузки. Упругие напряжения в наноструктурах могут возникать также на этапе их изготовления или при термическом воздействии. Воздействие лазерного излучения на слоистые наноструктуры индуцирует в них дрейф спин-поляризованных электронов. В связи с этим актуальным является исследование закономерностей генерации колебаний и переключения направления намагниченности в слоистых металлических наноструктурах ферромагнетик/диамагнетик/ферромагнетик при совместном воздействии на них спин-поляризованного тока, лазерного излучения и упругих механических напряжений.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами, темами

Тема диссертационной работы утверждена Советом учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» (протокол № 4 от 28 декабря 2009 г.) и соответствует приоритетному направлению 0607 «Научные основы создания и функционирования оптико-электронных микросистем, устройств молекулярной электроники и кремниевой фотоники, электронных и оптических систем обработки информации на спиновых эффектах; нанотехнологии, наноструктуры и наноматериалы в электронике, оптике, оптоэлектронике».

Работа выполнялась в Центре «Наноэлектроника и новые материалы» учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в рамках государственных программ и научно-исследовательских работ:

– ГБЦ № 11-3107, задание 2.6.01 «Исследовать процессы модификации поверхности металлов и полупроводников атмосферной плазмой и разработать основы метода создания поверхностно наноструктурированных высокоэффективных защитных и каталитических покрытий на их основе» подпрограммы «Физика фундаментальных взаимодействий и плазма» государственной программы научных исследований «Конвергенция» на 2011–2015 гг. (№ ГР 20120407);

– ГБЦ № 11-3031, задание 2.4.12 «Разработка механизмов и моделей электронных и магнитных свойств МФУНТ, поглощения ими электромагнитного излучения в широком диапазоне частот и элементов и устройств на их основе» подпрограмма «Наноматериалы и нанотехнологии» государственной программы научных исследований «Функциональные и композиционные материалы, наноматериалы» на 2011–2015 гг. (№ ГР 20115139);

– ГБЦ № 14-3105, задание 3.1.03 «Разработать конструкции спинтронных элементов на плазменных эффектах, инициируемых электромагнитным и лазерным излучением в магнитных наноматериалах» подпрограммы «Физика фундаментальных взаимодействий и плазма» государственной программы научных исследований «Конвергенция» на 2013–2015 гг. (№ ГР 20142659).

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является установление закономерностей генерации колебаний и переключения направления намагниченности в дискообразных слоистых металлических наноструктурах, состоящих из ферромагнетика с закрепленным направлением намагниченности, диамагнетика и

однодоменного ферромагнетика со свободным направлением намагниченности, при воздействии на ферромагнетик поляризованных по спину электронов, упругих механических напряжений и лазерного излучения, которые могут быть использованы в спинтронных устройствах передачи и хранения информации.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

– разработать модельный элемент для хранения и передачи информации на основе металлической наноструктуры ферромагнетик/диамагнетик/ферромагнетик, разработать методику моделирования его магнитных свойств;

– разработать модели и установить закономерности переключения и генерации колебаний направления намагниченности в наноструктуре ферромагнетик/диамагнетик/ферромагнетик при воздействии поляризованных по спину электронов и упругих напряжений;

– разработать модели и установить закономерности переключения и генерации колебаний намагниченности в наноструктуре ферромагнетик/диамагнетик/ферромагнетик при действии лазерного излучения оптического и ближнего ИК-диапазона;

– оценить перспективы применения исследованных наноструктур в устройствах передачи и хранения информации.

Научная новизна

1. Показана возможность генерации колебаний намагниченности в дискообразной наноструктуре Co (5–50 нм)/ Cu (2–10 нм)/ Co (5–50 нм) с планарной намагниченностью закрепленного слоя при прохождении через структуру постоянного электрического тока в отсутствие внешнего магнитного поля за счет использования свободного ферромагнитного слоя в форме диска с заданными ориентациями кристаллографических осей, а также возможность снижения плотностей токов, необходимых для генерации колебаний намагниченности, за счет увеличения аспектного отношения этого диска.

2. Установлена закономерность роста частоты колебаний направления намагниченности, возбуждаемых постоянным спин-поляризованным током в однодоменном ферромагнетном диске, пропорционально величине однородных продольных упругих механических напряжений.

3. Показано, что воздействие одиночных импульсов лазерного излучения с линейной и круговой поляризацией на дискообразную слоистую наноструктуру $\text{Co}/\text{Co}/\text{Cu}$ приводит к изменению направления намагниченности свободного ферромагнитного слоя, что сопровождается затухающими колебаниями.

4. Показано, что неравновесная спиновая поляризация, возникающая за счет спиновой инжекции при прохождении электрического тока через слоистую

ферромагнитную наноструктуру, в 3–4 раза выше для асимметричной структуры Co/Cu/Fe по сравнению с симметричной структурой Co/Cu/Co.

Положения, выносимые на защиту

1. Прохождение потока электронов через дискообразную слоистую наноструктуру, состоящую из ферромагнетика с направлением намагниченности, закрепленным параллельно ее плоскости, диамагнетика и однодоменного ферромагнетика со свободным направлением намагниченности, приводит к колебаниям направления намагниченности в свободном ферромагнетике в отсутствие внешнего магнитного поля за счет передачи атомам этого слоя спинового момента электронов со спиновой поляризацией, приобретенной в закрепленном ферромагнетике, компенсации магнитной кристаллографической анизотропии магнитостатической энергией и перехода свободного ферромагнетика в неустойчивое магнитное состояние, причем величина пороговой плотности тока переключения и генерации колебаний уменьшается с увеличением аспектного отношения при фиксированной толщине свободного слоя: в структуре Co (5–50 нм)/Cu (2–10 нм)/Co (5–50 нм) пороговая плотность тока уменьшается с $3,7 \times 10^8$ до $2,1 \times 10^8$ А/см² при увеличении аспектного отношения диска с 0,1 до 0,8.

2. Однородные упругие напряжения, приложенные вдоль оси дискообразной слоистой наноструктуры, состоящей из ферромагнетика с направлением намагниченности, закрепленным перпендикулярно плоскости структуры, диамагнетика и однодоменного ферромагнетика со свободным направлением намагниченности, создают добавочный вклад в виде магнитоупругого взаимодействия в эффект переноса спина при прохождении через структуру электрического тока, что приводит к возрастанию частоты колебаний направления намагниченности свободного ферромагнетика пропорционально величине этих напряжений и может использоваться для управления параметрами наногенератора микроволнового излучения на основе такой структуры: в структуре Co (5–50 нм)/Cu (2–10 нм)/Co (5–50 нм) при плотности тока 10^7 А/см² изменение частоты колебаний составляет ~0,35 Гц/Па.

3. Воздействие одиночных лазерных импульсов с линейной и круговой поляризацией на дискообразную слоистую наноструктуру, состоящую из ферромагнетика с направлением намагниченности, закрепленным параллельно плоскости структуры, диамагнетика и однодоменного ферромагнетика со свободным направлением намагниченности, приводит к изменению направления намагниченности свободного ферромагнетика, сопровождаемому затухающими колебаниями, за счет уменьшения энергии магнитной кристаллографической анизотропии по причине роста температуры ферромагнетика, воздействия

индуцированных лазером спин-поляризованных электронов, а также обратного эффекта Фарадея при круговой поляризации излучения: при облучении структуры Co (5–50 нм)/Cu (2–10 нм)/Co (5–50 нм) линейно поляризованным излучением мощностью 5–100 МВт/см² и длительностью 0,1–2 нс, при котором свободный слой кобальта нагревается до температуры 500–700 К, затухающие колебания намагниченности имеют продолжительность 1–10 нс и частоту от сотен мегагерц до десятков гигагерц; при круговой поляризации излучения частота колебаний намагниченности в 1,5–2 раза выше за счет обратного эффекта Фарадея.

4. Неравновесная спиновая поляризация электронов в дискообразной слоистой наноструктуре, состоящей из ферромагнетика с направлением намагниченности, закрепленным параллельно плоскости структуры, диамагнетика и однодоменного ферромагнетика со свободным направлением намагниченности, возникающая в результате спиновой инжекции при прохождении через нее электрического тока и приводящая к росту энергии электронного *s-d*-обменного взаимодействия и инверсии направления намагниченности свободного ферромагнетика, возрастает с увеличением длины спиновой диффузии электронов, разности между поляризациями ферромагнетиков, причем в асимметричной структуре Co/Cu/Fe неравновесная спиновая поляризация в 3–4 раза выше по сравнению с симметричной структурой Co/Cu/Co; рост толщины промежуточного слоя в структуре Co/Cu/Fe при коллинеарной намагниченности ферромагнитных слоев ведет к понижению величины отклонения спиновой поляризации от равновесной в приграничной области свободного ферромагнитного слоя, а в структуре Co/Cu/Co – к ее повышению за счет согласования парциальных химических потенциалов на границе слоев Cu/Co.

Личный вклад соискателя ученой степени

Основные научные результаты работы получены лично автором. Вклад соискателя заключается в разработке моделей и проведении численных расчетов динамики намагниченности в ферромагнитных наноструктурах под действием поляризованного по спину тока, упругих напряжений и лазерного излучения, в обработке и анализе полученных результатов, в выработке практических рекомендаций. Вклад научного руководителя, кандидата физ.-мат. наук А. Л. Данилюка состоит в постановке цели и задач исследования, обсуждении и интерпретации полученных результатов. Соавтор опубликованных работ доктор физ.-мат. наук В. Е. Борисенко принимал участие в обсуждении результатов исследований.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Материалы, вошедшие в диссертационную работу, докладывались и обсуждались на Республиканской конференции «Физика конденсированного состояния» с 16-й по 20-ю (Гродно, с 2008 по 2012 г.); 13-й и 14-й Международной научно-технической конференции «Современные средства связи» (Минск, 2008 и 2009 гг.); 1-й Международной конференции «Nanomaterials: Applications and Properties» (Алушта, Украина, 2011 г.); 21-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, Украина, 2011 г.); 9-й Белорусско-российской научно-технической конференции «Технические средства защиты информации» (Минск, 2011 г.); Международной конференции «Fundamental and Applied Nanoelectromagnetics» (Минск, 2012 г.); Международной научно-технической конференции, приуроченной к 50-летию МРТИ–БГУИР (Минск, 2014 г.); 4-й Международной конференции «Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии» (Минск, 2014 г.).

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе кафедры микро- и нанoeлектроники БГУИР в курсах лекций по дисциплинам «Квантовые вычисления» и «Нанoeлектроника».

Опубликование результатов диссертации

По теме диссертационной работы опубликовано 18 печатных работ общим объемом 4,4 авторского листа, из них 5 статей в рецензируемых научных журналах, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (объемом 3,0 авторского листа); 8 статей в сборниках научных конференций (1,1 авторского листа); 5 тезисов докладов на научных конференциях (0,3 авторского листа).

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из перечня сокращений и условных обозначений, введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем диссертации составляет 134 страницы, из них 96 страниц основного текста, 33 иллюстрации на 16 страницах, 4 таблицы на 1 странице, библиографический список на 13 страницах, включающий 144 наименования использованных источников и 18 наименований публикаций соискателя, 3 приложения на 8 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

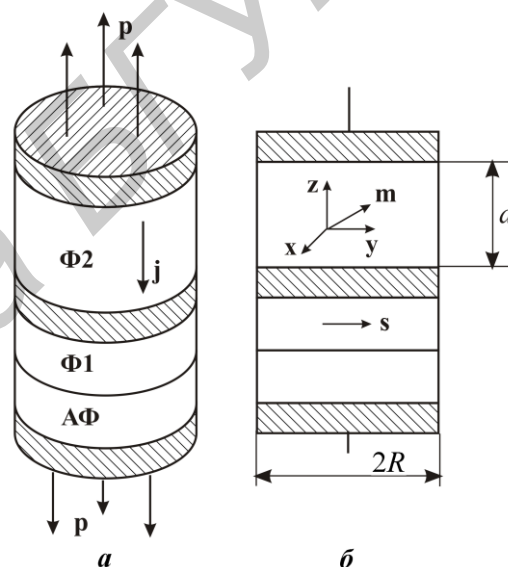
В **первой главе** представлен литературный обзор теоретических и экспериментальных исследований по воздействию спин-поляризованного тока, а также упругих механических напряжений и лазерного излучения на магнитное состояние однодоменного ферромагнетика в составе многослойных ферромагнитных наноструктур. Рассмотрены основные механизмы переноса спина в ферромагнитных наноструктурах, приводящие к переключению или генерации колебаний направления намагниченности: поверхностный механизм Слончевского – Берже и продольный инжекционный механизм. Указаны основные нерешенные проблемы, сдерживающие применение эффектов переноса спина в приборах спинтроники. На основании этого определены направления диссертационного исследования.

Во **второй главе** представлена математическая модель, описывающая поведение намагниченности в структуре ферромагнетик/ диамагнитный металл/ ферромагнетик ($\Phi 1/\text{ДМ}/\Phi 2$) со слоями в форме дисков нанометровой толщины при пропускании через структуру электрического тока, а также при воздействии упругих напряжений и лазерного излучения (рисунок 1).

Ферромагнитные слои $\Phi 1$ и $\Phi 2$ разделены слоем диамагнитного металла (ДМ), сохраняющим спиновую поляризацию электронов и служащим для уменьшения обменного взаимодействия между ферромагнитными слоями. Направление намагниченности s слоя $\Phi 1$ закреплено с помощью вспомогательного антиферромагнитного слоя АФ. Направление намагниченности m слоя $\Phi 2$ считается свободным.

Особенностью модели является рассмотрение свободного ферромагнитного слоя $\Phi 2$ в форме диска таких размеров, что его магнитное состояние является однодоменным, с учетом влияния анизотропии формы и упругих механических напряжений на его магнитное состояние.

Электрический ток пропускается через структуру перпендикулярно слоям, так что электроны движутся от слоя $\Phi 1$ к слою $\Phi 2$. В слое $\Phi 1$ поток электронов



$\Phi 1, \Phi 2$ – ферромагнитные слои в форме дисков с намагниченностями s и m соответственно;

АФ – антиферромагнетик;

d, R – толщина и радиус слоя $\Phi 2$;

j – плотность тока;

p – механическая нагрузка;

a – вид сбоку; b – в разрезе

Рисунок 1. – Исследуемая структура

приобретает определенную спиновую поляризацию и при попадании в слой Ф2 спины электронов проводимости вынуждены адаптироваться к направлению намагниченности этого слоя. Благодаря локальному сохранению момента количества движения возникает вращающий момент, действующий на атомы слоя Ф2.

Моделирование изменения направления намагниченности \mathbf{m} слоя Ф2 с учетом воздействия на него спин-поляризованного потока электронов проводится в приближении макроспина (когерентного вращения магнитных моментов) с использованием уравнения Ландау – Лифшица – Гильберта – Слончевского – Берже, записанного в виде

$$(1 + \alpha^2) \frac{d\mathbf{m}}{d\tau} = - [\mathbf{m} \times \mathbf{h}] - \alpha [\mathbf{m} \times [\mathbf{m} \times \mathbf{h}]] + (1 + \alpha^2) g (\mathbf{m} \cdot \mathbf{s}) J [\mathbf{m} \times [\mathbf{m} \times \mathbf{s}]],$$

где α – параметр магнитной диссипации Гильберта;

τ – нормированное время;

\mathbf{h} – эффективное нормированное поле, которое в рамках рассматриваемой модели включает поле магнитной кристаллографической анизотропии \mathbf{h}_a ; размагничивающее поле \mathbf{h}_d ; поле магнитоупругого взаимодействия \mathbf{h}_{me} ; поле \mathbf{h}_{mo} , создаваемое лазерным излучением за счет обратного магнитооптического эффекта Фарадея; поле \mathbf{h}_T , вызванное тепловыми флуктуациями;

g – токовый коэффициент Слончевского – Берже;

\mathbf{s} – нормированная намагниченность ферромагнитного слоя Ф1;

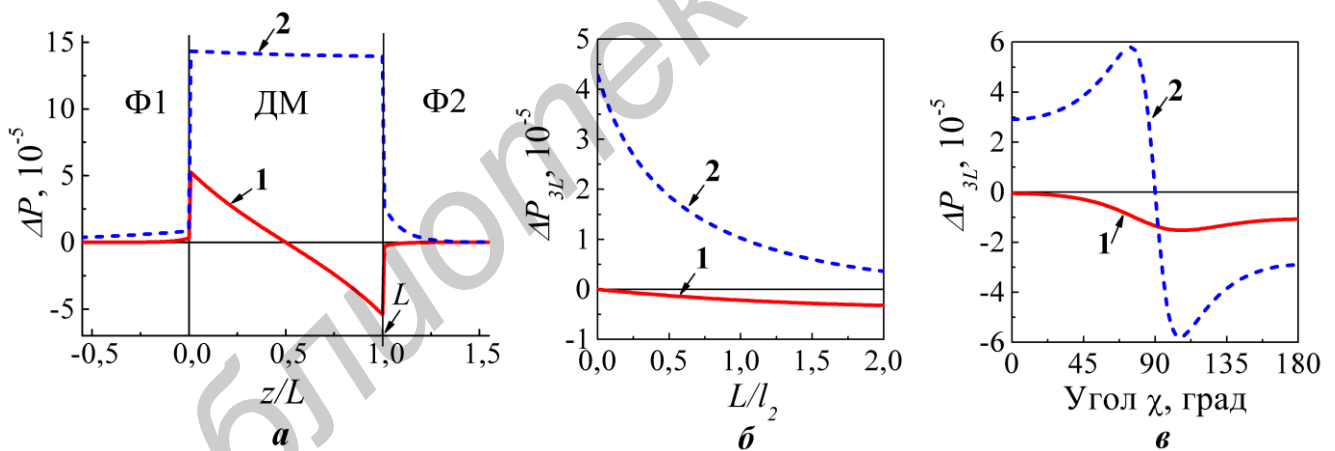
J – параметр, пропорциональный плотности тока j и обратно пропорциональный толщине d свободного слоя.

Механические напряжения в структуре учитываются посредством тензора эффективных размагничивающих факторов в виде $\mathbf{N} = \mathbf{N}^f + \mathbf{N}^m$, где \mathbf{N}^f есть обычный тензор размагничивающих факторов, зависящий только от размеров слоя Ф2, а слагаемое \mathbf{N}^m отвечает за вклад магнитоупругой энергии.

При воздействии на структуру лазерного излучения учитывается изменение намагниченности насыщения, изменение констант кристаллографической анизотропии, рост тепловых флуктуаций, светоиндуцированный дрейф спин-поляризованных электронов, а также обратный эффект Фарадея в случае круговой поляризации излучения.

Третья глава посвящена исследованию процессов, происходящих в наноструктуре ферромагнетик/диамагнитный металл/ферромагнетик (Ф1/ДМ/Ф2) при пропускании через нее электрического тока перпендикулярно слоям; изучению возникающих при этом колебаний намагниченности, а также изучению влияния упругих напряжений в структуре на эти колебания. Рассматриваются инжекционный и поверхностный механизмы переноса спина.

Проведен расчет отклонения ΔP степени спиновой поляризации от равновесного значения в объеме наноструктуры $\Phi 1/\text{ДМ}/\Phi 2$, вызванного протеканием через нее электрического тока. Такое отклонение ΔP может привести к инверсии намагниченности одного из ферромагнитных слоев за счет роста энергии электронного s - d -обменного взаимодействия (инжекционный механизм переноса спина). На рисунке 2, *а* представлено распределение неравновесной спиновой поляризации ΔP в структурах $\text{Co}/\text{Cu}/\text{Co}$ и $\text{Co}/\text{Cu}/\text{Fe}$ при пропускании через них тока плотностью 10^8 А/см^2 , когда направления намагниченности ферромагнитных слоев параллельны. В этом случае в структуре $\text{Co}/\text{Cu}/\text{Fe}$ неравновесная спиновая поляризация ΔP_{3L} в приграничной области слоя $\Phi 2$ составляет $2,9 \times 10^{-5}$, что на порядок выше, чем в структуре $\text{Co}/\text{Cu}/\text{Co}$, где $|\Delta P_{3L}| \approx 3,2 \times 10^{-6}$. В структуре $\text{Co}/\text{Cu}/\text{Fe}$ отклонение ΔP_{3L} по абсолютной величине уменьшается с ростом толщины медного слоя, а в структуре $\text{Co}/\text{Cu}/\text{Co}$, наоборот, увеличивается (рисунок 2, *б*), что объясняется экстракцией спинов из слоя кобальта в медный слой. На рисунке 2, *в* показана зависимость ΔP_{3L} от угла χ между направлениями намагниченности ферромагнитных слоев. Максимальное отклонение $|\Delta P_{3L}|$ в структуре $\text{Co}/\text{Cu}/\text{Fe}$ составляет $5,80 \times 10^{-5}$, что в несколько раз выше, чем в структуре $\text{Co}/\text{Cu}/\text{Co}$ ($|\Delta P_{3L}| \approx 1,52 \times 10^{-5}$).



1 – $\text{Co}/\text{Cu}/\text{Co}$, 2 – $\text{Co}/\text{Cu}/\text{Fe}$;

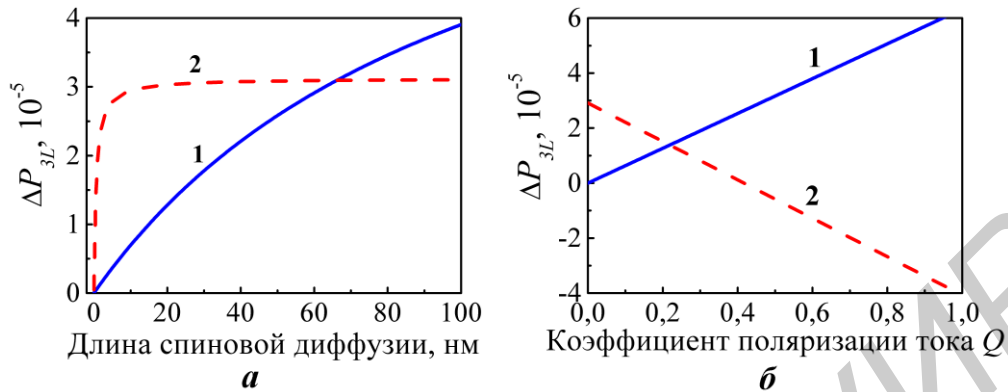
а – распределение неравновесной спиновой поляризации $\Delta P(z)$ в объеме структуры (z – координата вдоль оси структуры);

б – зависимость неравновесной спиновой поляризации ΔP_{3L} слоя $\Phi 2$ от толщины L слоя ДМ (l_2 – длина спиновой диффузии в слое ДМ); *в* – зависимость ΔP_{3L} от угла χ

Рисунок 2. – Спиновая инжекция в трехслойной структуре $\Phi 1/\text{ДМ}/\Phi 2$

В структуре $\text{Co}/\text{Cu}/\text{Fe}$ величина ΔP_{3L} увеличивается с увеличением длины спиновой диффузии электронов любого ферромагнитного слоя (рисунок 3, *а*), а также с ростом разности между коэффициентами поляризации тока ферромагнитных слоев (рисунок 3, *б*). Коэффициент поляризации тока

определяется выражением $Q = (\sigma_{\uparrow} - \sigma_{\downarrow}) / (\sigma_{\uparrow} + \sigma_{\downarrow})$, где $\sigma_{\uparrow}, \sigma_{\downarrow}$ – проводимости для электронов «спин-вверх» и «спин-вниз».



a – 1 – зависимость ΔP_{3L} от l_{Co} , 2 – зависимость ΔP_{3L} от l_{Fe} ;

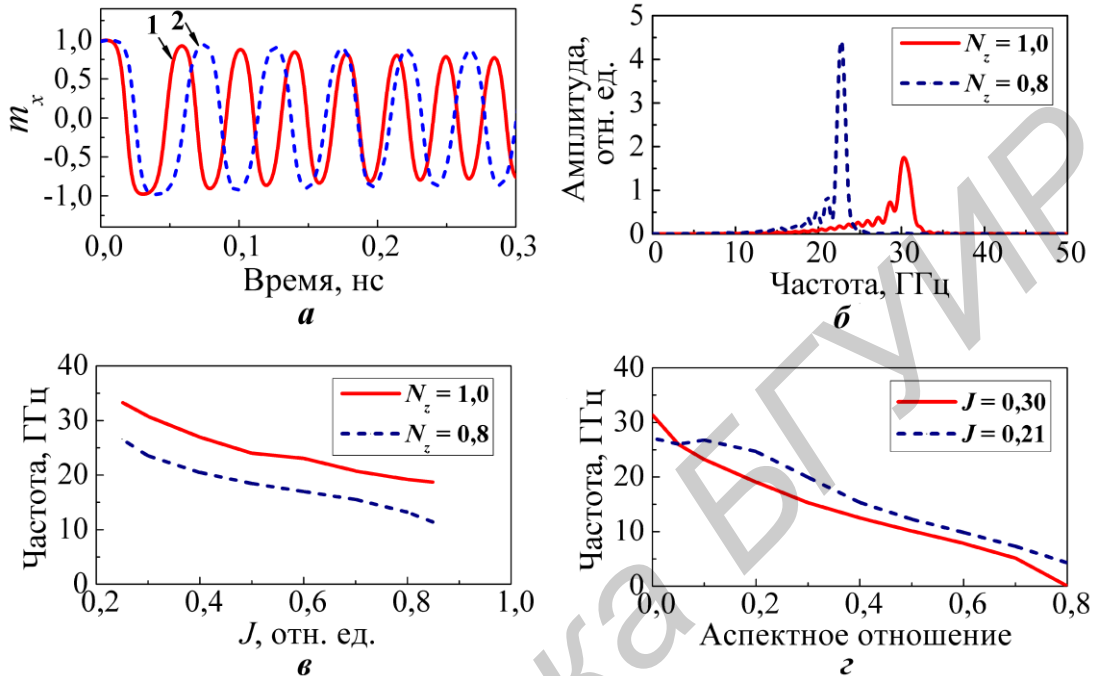
б – 1 – зависимость ΔP_{3L} от Q_{Co} , 2 – зависимость ΔP_{3L} от Q_{Fe}

Рисунок 3. – Влияние длин спиновой диффузии l_{Co}, l_{Fe} и коэффициентов поляризации тока Q_{Co}, Q_{Fe} слоев Co и Fe соответственно на отклонение спиновой поляризации ΔP_{3L} в слое Fe структуры Co/Cu/Fe

Представлены результаты моделирования колебаний намагниченности в наноструктуре Co/Cu/Co со свободным слоем в форме диска, находящегося в однодоменном состоянии, когда намагниченность закрепленного слоя лежит в плоскости структуры ($\mathbf{s} \parallel \mathbf{x}$), при прохождении через структуру постоянного электрического тока в отсутствие внешних магнитных полей. Установлено, что в зависимости от плотности тока и внутренних параметров системы за счет поверхностного механизма переноса спина воздействие спин-поляризованного потока электронов на слой Ф2 приводит либо к переключению направления намагниченности из одного стационарного состояния в другое, либо к возбуждению в системе автоколебательного режима. К внутренним параметрам системы относятся аспектное отношение свободного слоя, ориентация кристаллографических осей в нем, величина магнитной диссипации материала, направление намагниченности закрепленного слоя.

Результаты моделирования показывают, что в диске кобальта толщиной 5 нм с параметром диссипации $\alpha = 0,02$ при определенной плотности тока устанавливается автоколебательный режим (с устойчивым предельным циклом), если ось легкого намагничивания (ОЛН) лежит в плоскости диска и перпендикулярна намагниченности закрепленного слоя. Пороговая плотность тока переключения и генерации колебаний намагниченности уменьшается с $3,7 \times 10^8$ до $2,1 \times 10^8$ А/см² при увеличении аспектного отношения от 0,1 до 0,8 при фиксированной толщине диска $d = 5$ нм, что объясняется переходом диска в неустойчивое магнитное состояние (между планарным и перпендикулярным

магнитными состояниями) за счет уменьшения величины размагничивающего поля. Частота колебаний намагниченности понижается как с увеличением аспектного отношения диска при фиксированной толщине, так и с увеличением плотности тока (рисунок 4).



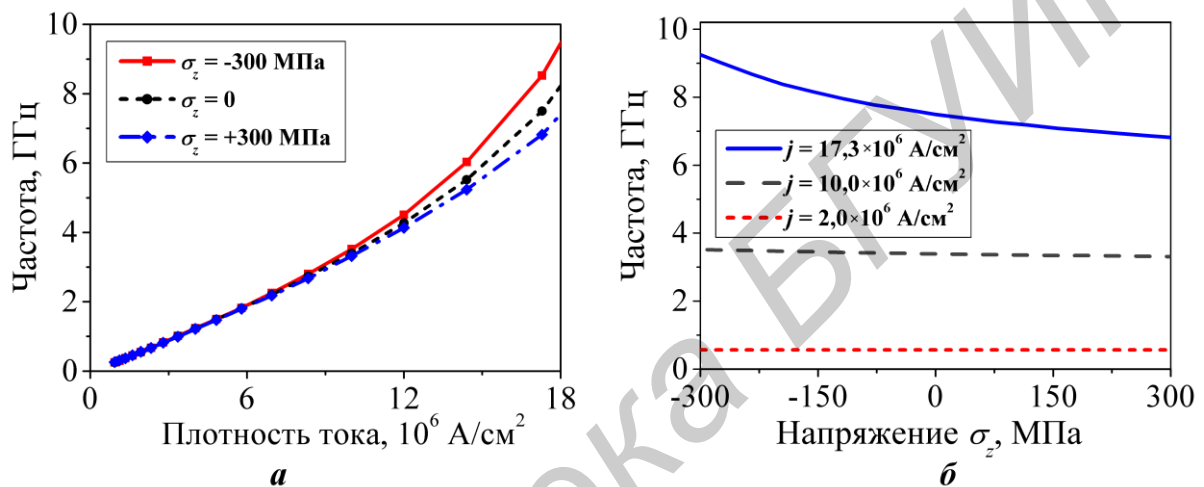
а – зависимость m_x от времени при $J = 0,3$: 1 – при $N_z = 1,0$; 2 – при $N_z = 0,8$;
б – спектры колебаний ($J = 0,3$); **в** – зависимость частоты колебаний от параметра J ;
г – зависимость частоты колебаний от аспектного отношения диска кобальта

Рисунок 4. – Колебания компоненты m_x намагниченности в структуре Co/Cu/Co с планарной намагниченностью закрепленного слоя

Представлены результаты исследования влияния однородных упругих механических напряжений, приложенных вдоль оси дискообразной наноструктуры ферромагнетик/диамагнитный металл/ферромагнетик (Ф1/ДМ/Ф2) со свободным слоем Ф2 в форме диска в однодоменном состоянии, на пороговые токи и частоту колебаний намагниченности, генерируемых в такой структуре электрическим током за счет эффекта переноса спина. На рисунке 5 представлены результаты моделирования для структуры Co/Cu/Co, в которой намагниченность закрепленного слоя и ОЛН свободного слоя направлены вдоль оси структуры, свободный слой имеет толщину 5 нм, диаметр 50 нм и параметр диссипации $\alpha = 0,02$. В такой структуре в отсутствие упругих напряжений и внешних магнитных полей возникают устойчивые колебания намагниченности в широком диапазоне изменения плотности пропускаемого тока (от $0,2 \times 10^6$ А/см² до $18,0 \times 10^6$ А/см²). Частота колебаний намагниченности увеличивается с ростом плотности тока, причем при небольших токах зависимость частоты от плотности

тока близка к линейной (рисунок 5, а). При токах выше $18,0 \times 10^6$ А/см² происходит переключение направления намагниченности, что сопровождается затухающими колебаниями.

Влияние упругих напряжений на частоту колебаний намагниченности наиболее существенно проявляется при достаточно больших плотностях тока. При плотности тока $j = 10,0 \times 10^6$ А/см² в случае однородной механической нагрузки изменение частоты колебаний составляет 0,35 Гц/Па. При токе $j = 17,2 \times 10^6$ А/см² соответственно 3,2 Гц/Па. При малых токах ($j < 3,0 \times 10^6$ А/см²) влияния упругих напряжений на частоту колебаний не обнаружено (рисунок 5, б).



а – зависимость частоты колебаний от плотности тока j ;

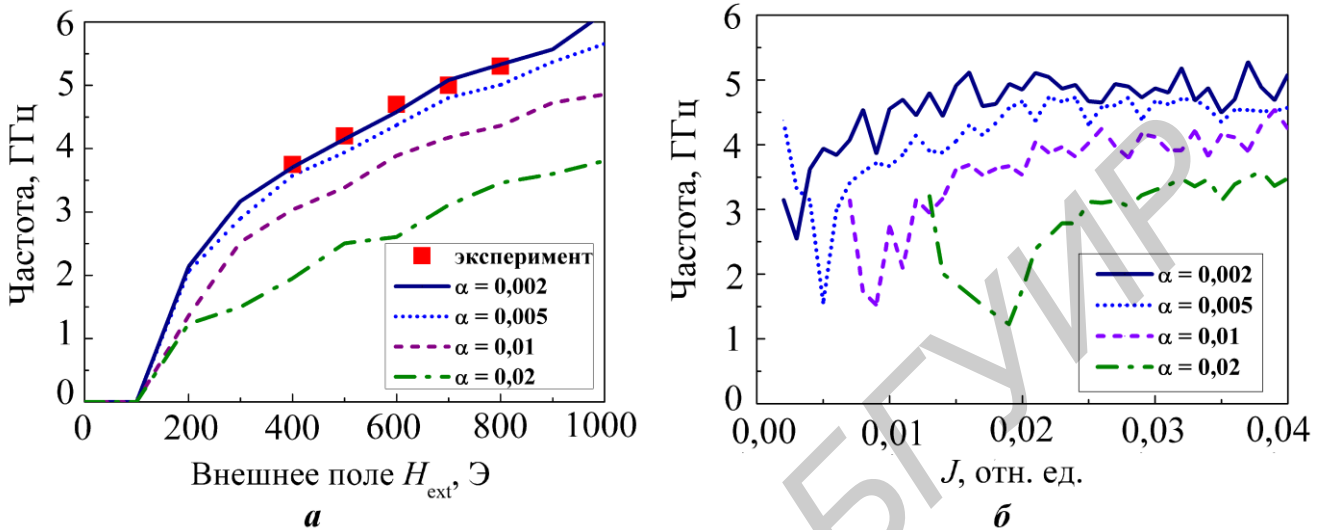
б – зависимость частоты колебаний от величины продольных напряжений σ_z

Рисунок 5. – Колебания намагниченности диска кобальта при воздействии спин-поляризованного тока и упругих напряжений

Таким образом, за счет магнитоупругого взаимодействия приложение внешних механических нагрузок приводит к изменению эффективных размагничивающих факторов, что сопровождается изменением частоты колебаний намагниченности.

Представлены результаты моделирования колебаний намагниченности в структуре CoFeB/Cu/CoFeB со свободным слоем толщиной 2 нм и диаметром 200 нм, когда направление ОЛН свободного слоя и намагниченность закрепленного слоя параллельны друг другу и лежат в плоскости структуры, и проводится сравнение этих результатов с имеющимися экспериментальными данными. В такой структуре колебания намагниченности индуцируются током только при наличии внешнего магнитного поля не менее 200 Э. На рисунке 6, а показана зависимость частоты колебаний от напряженности магнитного поля при плотности тока $j = 1,2 \times 10^7$ А/см² (соответствует $J = 0,027$); а на рисунке 6, б – зависимость частоты колебаний от плотности тока при постоянном внешнем поле

700 Э. Частота колебаний намагниченности монотонно возрастает с увеличением напряженности магнитного поля и незначительно меняется с ростом плотности тока. Наилучшее совпадение с экспериментальными данными достигается при значении параметра диссипации $\alpha = 0,002$.



a – зависимость частоты колебаний от напряженности магнитного поля H_{ext} при $J = 0,027$;

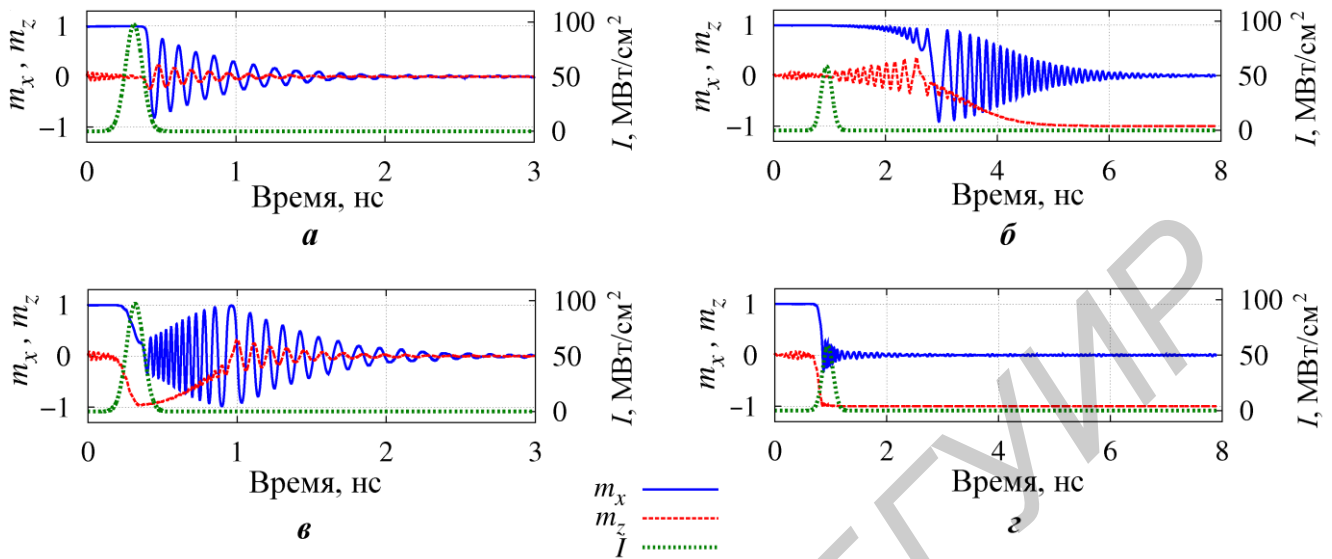
б – зависимость частоты колебаний от величины тока (параметр J) в поле $H_{ext} = 700$ Э

Рисунок 6. – Колебания намагниченности диска кобальта во внешнем магнитном поле при воздействии потока электронов с планарной спиновой поляризацией

В **четвертой** главе представлены результаты моделирования переходных процессов в наноструктуре Co/Cu/Co со свободным слоем кобальта в форме диска в однодоменном состоянии при облучении структуры импульсами лазера с линейной и круговой поляризацией излучения. При этом учитывается обратный эффект Фарадея в случае круговой поляризации излучения, а также действие на свободный слой индуцированного лазером спин-поляризованного потока электронов.

Результаты моделирования показывают, что воздействие одиночных импульсов линейно поляризованного лазерного излучения мощностью 5–100 МВт/см² и длительностью 0,1–2 нс на тонкий (толщиной 5 нм, диаметром 18 нм) и утолщенный (толщиной 20 нм, диаметром 10 нм) однодоменные диски кобальта в составе наноструктуры Co/Cu/Co приводит к изменению направления намагниченности диска, что сопровождается затухающими колебаниями продолжительностью 1–10 нс и частотой от сотен мегагерц до десятков гигагерц (рисунок 7, *a* и *б*). В случае круговой поляризации лазерного излучения на намагниченность ферромагнетика дополнительно действует обратный эффект Фарадея, который проявляется в изменении частоты, амплитуды и длительности затухающих колебаний, но не влияет на конечное состояние вектора намагниченности, поскольку напряженности поля, соответствующей эффекту

Фарадея, недостаточно для переключения направления намагниченности при указанных длительностях и мощностях лазерных импульсов (рисунок 7, *в* и *г*).



m_x, m_z – компоненты вектора намагниченности, I – интенсивность лазерного излучения;
а – тонкий диск, линейная поляризация; *б* – утолщенный диск, линейная поляризация;
в – тонкий диск, круговая поляризация; *г* – утолщенный диск, круговая поляризация

Рисунок 7. – Колебания намагниченности тонкого и утолщенного дисков кобальта с кристаллографическим направлением [0001] в плоскости диска

при облучении импульсом лазера с линейной и круговой поляризацией

Из результатов моделирования также следует, что индуцированный импульсом лазера спин-поляризованный ток не оказывает заметного влияния на поведение намагниченности ферромагнитного диска ввиду малой длительности импульса, а сводится к незначительному изменению частоты затухающих колебаний. Увеличение же длительности либо мощности импульса лазера приведет к разогреву ферромагнетика выше температуры Кюри. Таким образом, основной причиной изменения направления намагниченности ферромагнитного диска при облучении структуры импульсом лазера является потеря устойчивости равновесного состояния вследствие уменьшения поля магнитной кристаллографической анизотропии с увеличением температуры ферромагнетика.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Показано, что в дискообразной слоистой металлической наноструктуре ферромагнетик/диамагнетик/ферромагнетик с намагниченностью закрепленного слоя параллельно плоскости структуры возникают колебания направления

намагниченности в отсутствие внешнего магнитного поля при прохождении через структуру постоянного электрического тока за счет переноса спина потоком электронов, если ОЛН свободного слоя лежит в плоскости структуры и перпендикулярна направлению намагниченности закрепленного слоя. Определены способы снижения пороговых токов, необходимых для генерации колебаний и переключения направления намагниченности, которые заключаются в формировании свободного ферромагнитного слоя в форме диска с заданным аспектным отношением, при котором этот слой находится в неустойчивом магнитном состоянии за счет взаимной компенсации магнитостатической энергии и магнитной кристаллографической анизотропии. Показано, что в структуре Co (5–50 нм)/Cu (2–10 нм)/Co (5–50 нм) величина пороговой плотности тока переключения и генерации колебаний намагниченности уменьшаются в 1,8 раза (с $3,7 \times 10^8$ до $2,1 \times 10^8$ А/см²) с увеличением аспектного отношения от 0,1 до 0,8 при фиксированной толщине свободного слоя, а частота колебаний намагниченности понижается с увеличением аспектного отношения и с ростом плотности тока [4, 6, 7, 8].

2. Установлены закономерности влияния однородных упругих напряжений на колебания намагниченности, возникающих за счет переноса спина в дискообразной слоистой металлической наноструктуре, состоящей из ферромагнетика с закрепленной намагниченностью, диамагнетика и однодоменного ферромагнетика со свободным направлением намагниченности, при прохождении через нее электрического тока. Показано, что приложение однородных упругих напряжений вдоль оси структуры приводит к возрастанию частоты колебаний направления намагниченности свободного ферромагнетика пропорционально величине этих напряжений за счет вклада магнитоупругого взаимодействия. В структуре Co (5–50 нм)/Cu (2–10 нм)/Co (5–50 нм) с аспектным отношением 0,01–0,1 при плотности тока 10^7 А/см² изменение частоты колебаний составляет 0,35 Гц/Па [2, 9, 13].

3. Установлены закономерности воздействия лазерного излучения на дискообразную слоистую металлическую наноструктуру, состоящую из однодоменного ферромагнитного слоя с закрепленной намагниченностью, диамагнетика и однодоменного ферромагнетика со свободным направлением намагниченности. Установлено, что воздействие одиночных импульсов лазера с линейной и круговой поляризацией приводит к изменению направления намагниченности свободного ферромагнетика, сопровождаемое затухающими колебаниями намагниченности, по причине уменьшения поля магнитной кристаллографической анизотропии с увеличением температуры ферромагнетика, действия вращающего момента на атомы свободного слоя за счет переноса спина потоком электронов, генерируемым лазерным излучением, и обратного эффекта Фарадея в случае круговой поляризации излучения. Результаты моделирования

показали, что при облучении структуры Co (5–50 нм)/Cu (2–10 нм)/Co (5–50 нм) линейно поляризованным излучением мощностью 5–100 МВт/см² и длительностью 0,1–2 нс затухающие колебания намагниченности имеют продолжительность 1–16 нс и частоту от сотен мегагерц до десятков гигагерц. При круговой поляризации излучения частота колебаний намагниченности в 1,5–2 раза выше за счет обратного эффекта Фарадея [3, 5, 10, 11, 12, 16, 17, 18].

4. Показано, что неравновесная составляющая спиновой поляризации электронов, возникающая в трехслойной металлической наноструктуре ферромагнетик/диамагнетик/ферромагнетик в результате спиновой инжекции при прохождении через нее электрического тока и способствующая инверсии направления намагниченности свободного ферромагнитного слоя за счет добавки к энергии электронного *s*–*d*-обменного взаимодействия, возрастает с увеличением длины спиновой диффузии электронов любого из двух ферромагнитных слоев, разности между коэффициентами поляризации тока ферромагнитных слоев, что способствует снижению пороговых токов переключения направления намагниченности. В структуре Co/Cu/Fe величина отклонения спиновой поляризации от равновесного значения в приграничной области свободного ферромагнитного слоя понижается с увеличением толщины промежуточного диамагнитного слоя, а в структуре Co/Cu/Co – повышается. В структуре Co/Cu/Fe неравновесная спиновая поляризация в среднем в 3–4 раза выше по сравнению с симметричной структурой Co/Cu/Co при одинаковой плотности пропускаемого тока [1, 14, 15].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные в диссертационной работе результаты могут применяться при конструировании приборов спинтроники на основе слоистых ферромагнитных наноструктур, таких как элементы магнитной памяти и наноразмерные генераторы микроволнового излучения, в которых переключение и генерация колебаний направления намагниченности осуществляется электрическим током за счет эффекта переноса спина без приложения внешних магнитных полей. Установленные закономерности позволяют за счет выбора параметров структуры уменьшить пороговые плотности тока, необходимые для переключения и генерации колебаний направления намагниченности, до величин порядка 10⁶–10⁷ А/см², что приемлемо для практического использования. Установленные закономерности влияния размеров ферромагнитных слоев, ориентации кристаллографических осей ферромагнитного материала и упругих напряжений на частоту колебаний намагниченности могут использоваться для управления параметрами и повышения точности расчета частоты наногенераторов микроволнового излучения.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Кухарев, А. В. Эффективность инъекции носителей заряда с определенным спином в ферромагнетик / А. В. Кухарев, А. Л. Данилюк, В. Е. Борисенко // ЖТФ. – 2010. – Т. 80, № 9. – С. 80–84.
2. Кухарев, А. В. Колебания намагниченности в ферромагнитных наноструктурах при воздействии спин-поляризованного тока и упругих напряжений / А. В. Кухарев, А. Л. Данилюк, В. Е. Борисенко // Прикладная физика. – 2011. – № 4. – С. 12–19.
3. Кухарев, А. В. Моделирование изменений намагниченности в ферромагнитных дисках из кобальта при воздействии пикосекундных лазерных импульсов / А. В. Кухарев, А. Л. Данилюк, В. Е. Борисенко // Журнал прикладной спектроскопии. – 2011. – Т. 78, № 6. – С. 912–919.
4. Кухарев, А. В. Колебания намагниченности в наноструктуре ферромагнетик/ немагнитный металл/ ферромагнетик под действием поляризованного по спину тока / А. В. Кухарев, А. Л. Данилюк, В. Е. Борисенко // Микроэлектроника. – 2012. – Т. 41, № 1. – С. 9–19.
5. Kukharev, A. V. Influence of the inverse Faraday effect on switching and oscillations of magnetization in single-domain nanoparticles / A. V. Kukharev, A. L. Daniluyk // J. Nano- Electron. Phys. – 2012. – Vol. 4, № 1. – P. 01025.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

6. Кухарев, А. В. Моделирование вихревого состояния нанодиска / А. В. Кухарев, А. Л. Данилюк // Современные средства связи : материалы XIII междунар. науч.-техн. конф., Минск, 7–9 окт. 2008 г. / Высший гос. колледж связи ; редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск : ВГКС, 2008. – С. 117.
7. Кухарев, А. В. Динамика намагниченности ферромагнетика с учетом поперечного механизма передачи спина / А. В. Кухарев, А. Л. Данилюк // Современные средства связи : материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 29 сент. – 1 окт. 2009 г. / Высший гос. колледж связи ; редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск : ВГКС, 2009. – С. 101.
8. Кухарев, А. В. Колебания намагниченности под действием поляризованного по спину тока / А. В. Кухарев // Физика конденсированного состояния : материалы XVIII Респ. науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 21–23 апр. 2010 г. / Гродн. гос. ун-т им. Я. Купалы ; редкол.: Е. А. Ровба (отв. ред.) [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2010. – С. 52–55.

9. Кухарев, А. В. Влияние переменных упругих напряжений на колебания намагниченности нанодиска / А. В. Кухарев // Физика конденсированного состояния: материалы XIX Респ. науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 19–20 апр. 2011 г. / Гродн. гос. ун-т им. Я. Купалы ; редкол.: Е. А. Ровба (отв. ред.) [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2011. – С. 56–58.

10. Кухарев, А. В. СВЧ-осцилляции намагниченности однодоменного нанодиска при нагреве импульсами лазерного излучения / А. В. Кухарев, А. Л. Данилюк // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : материалы 21-й Междунар. Крымской конф., Севастополь, Украина, 12–16 сент. 2011 г. / Севастопольский нац. техн. ун-т. – Севастополь, 2011. – С. 789–790.

11. Kukharev, A. V. Influence of the inverse faraday effect on switching and oscillations of magnetization in single-domain nanoparticles / A. V. Kukharev, A. L. Danilyuk // Nanomaterials: Applications and Properties : 1st International Conference, Alushta, Crimea, Ukraine, 27–30 Sept. 2011 : in 2 vol. / Sumy State University ; ed. by A. Pogrebnyak [et al.]. – Sumy : Sumy State Univ., 2011. – Vol. 2, Part I. – P. 154–157.

12. Кухарев, А. В. Ориентационные фазовые переходы в однодоменных частицах кобальта / А. В. Кухарев // Физика конденсированного состояния : сб. науч. ст. : в 2 ч. / Гродн. гос. ун-т им. Я. Купалы ; редкол.: Е. А. Ровба (гл. ред.) [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2012. – Ч. 1. – С. 55–59.

13. Кухарев, А. В. Влияние упругих напряжений на частоту колебаний намагниченности в ферромагнитных наноструктурах / А. В. Кухарев, А. Л. Данилюк // Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ–БГУИР : материалы конф., Минск, 18–19 марта 2014 г. : в 2 т. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники ; редкол.: А. Н. Осипов [и др.]. – Минск : БГУИР, 2014. – Т. 2. – С. 73–74.

Тезисы докладов на научных конференциях

14. Кухарев, А. В. Моделирование туннельного магнитосопротивления в наноструктурах ферромагнетик/диэлектрик/ферромагнетик / А. В. Кухарев // Физика конденсированного состояния : тез. докл. XVI Респ. науч. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Гродно, 23–24 апр. 2008 г. : в 2 ч. / Гродн. гос. ун-т ; редкол.: Е. А. Ровба [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2008. – Ч. 1. – С. 65–66.

15. Кухарев, А. В. Инжекция спинов током в ферромагнитных переходах / А. В. Кухарев // Физика конденсированного состояния : тез. докл. XVII Респ. науч. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Гродно, 16–17 апр. 2009 г. / ГрГУ, редкол.: Е. А. Ровба [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2009. – С. 61–62.

16. Кухарев, А. В. Перемагничивание ферромагнитных наноструктур импульсами лазерного излучения / А. В. Кухарев, А. Л. Данилюк // Технические

средства защиты информации : тез. докл. IX Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск, 28–29 июня 2011 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники ; редкол.: Л. М. Лыньков [и др.]. – Минск : БГУИР, 2011. – С. 68–69.

17. Kukharev, A. V. Reorientation of magnetization in a single-domain cobalt particle by a laser beam / A. V. Kukharev, A. L. Daniluyk, V. E. Borisenko // Fundamental and Applied Nanoelectromagnetics : Conference Proceedings, Minsk, Belarus, 22–25 May 2012 / Belarusian State University. – Minsk : BSU, 2012. – P. 48.

18. Кухарев, А. В. Индуцированные импульсом лазера колебания намагниченности в наноструктуре ферромагнетик/диамагнетик/ферромагнетик / А. В. Кухарев, А. Л. Данилюк // Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии : тез. 4-й Междунар. конф., Минск, 12–16 окт. 2014 г. / Белорус. гос. ун-т ; ред.: М. В. Коржик [и др.]. – Минск : БГУ, 2014. – С. 94–95.

РЭЗІЮМЭ

Кухараў Андрэй Валер'евіч

Ваганні напрамку намагнічанасці ў ферамагнітных нанаструктурах пры ўздзеянні палярызаваных па спіну электронаў і лазернага выпраменьвання

Ключавыя словы: ферамагнітныя нанаструктуры, ваганні намагнічанасці, палярызаваны па спіну ток, эфект пераносу спіна, спінавая інжэкцыя, пругкія напружанні, лазернае выпраменьванне, зваротны эфект Фарадэя.

Мэта працы: устанаўленне заканамернасцяў генерацыі ваганняў і пераклучэння напрамку намагнічанасці ў дыскавообразных слаістых металічных нанаструктурах, якія складаюцца з ферамагнетыка з замацаваным напрамкам намагнічанасці, дыямагнетыка і аднадаменнага ферамагнетыка са свабодным напрамкам намагнічанасці, пры ўздзеянні на ферамагнетык палярызаваных па спіну электронаў, пругкіх механічных напружанняў і лазернага выпраменьвання.

Метады даследавання: матэматычнае мадэліраванне, лікавыя метады рашэння звычайных дыферэнцыяльных ураўненняў.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Вызначаны новыя канфігурацыі нанаструктуры ферамагнетык/дыямагнітны метал/ферамагнетык, ў якіх узнікае аўтавагальны рэжым пры праходжанні праз структуру электрычнага току ў адсутнасці знешніх магнітных палёў. Паказана магчымасць зніжэння шчыльнасцяў токаў, якія неабходны для генерацыі ваганняў намагнічанасці, за кошт фарміравання ферамагнітнага слоя ў форме дыска з зададзенай аспектнай адносіннай. Устаноўлены заканамернасці ўплыву аднародных падоўжных пругкіх механічных напружанняў на частотныя характарыстыкі нанагенератараў мікрахвалевага выпраменьвання, якія функцыянуюць на эфекце пераносу спіна. Устаноўлены заканамернасці пераклучэння і генерацыі ваганняў намагнічанасці ў ферамагнітнай нанаструктуры пры апраменьванні імпульсамі лазера піка- і наносекунднай працягласці з лінейнай і кругавой палярызацыяй выпраменьвання. Устаноўлены заканамернасці ўплыву параметраў нанаструктуры ферамагнетык/дыямагнітны метал/ферамагнетык на адхіленне спінавай палярызацыі ў структуры.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: вынікі даследаванняў могуць прымяняцца пры канструяванні прыбораў на спінавых эфектах: элементаў магнітнай памяці і нанапамерных генератараў мікрахвалевага выпраменьвання, у якіх пераклучэнне і генерацыя ваганняў напрамку намагнічанасці ажыццяўляецца электрычным токам без прыкладання знешніх магнітных палёў.

Галіна прымянення: спінтроніка, прыборы на спінавых эфектах.

РЕЗЮМЕ

Кухарев Андрей Валерьевич

Колебания направления намагниченности в ферромагнитных наноструктурах при воздействии поляризованных по спину электронов и лазерного излучения

Ключевые слова: ферромагнитные наноструктуры, колебания намагниченности, поляризованный по спину ток, эффект переноса спина, спиновая инжекция, упругие напряжения, лазерное излучение, обратный эффект Фарадея.

Цель работы: установление закономерностей генерации колебаний и переключения направления намагниченности в дискообразных слоистых металлических наноструктурах, состоящих из ферромагнетика с закрепленным направлением намагниченности, диамагнетика и однодоменного ферромагнетика со свободным направлением намагниченности, при воздействии на ферромагнетик поляризованных по спину электронов, упругих механических напряжений и лазерного излучения.

Методы исследования: математическое моделирование, численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений.

Полученные результаты и их новизна. Определены новые конфигурации наноструктуры ферромагнетик/диамагнитный металл/ферромагнетик, в которых возникает автоколебательный режим при прохождении через структуру электрического тока в отсутствие внешних магнитных полей. Показана возможность снижения плотностей токов, необходимых для генерации колебаний намагниченности, за счет формирования ферромагнитного слоя в форме диска с заданным аспектным отношением. Установлены закономерности влияния однородных продольных упругих механических напряжений на частотные характеристики наногенераторов микроволнового излучения, функционирующих на эффекте переноса спина. Установлены закономерности переключения и генерации колебаний намагниченности в ферромагнитной наноструктуре при облучении импульсами лазера пико- и наносекундной длительности с линейной и круговой поляризацией излучения. Установлены закономерности влияния параметров наноструктуры ферромагнетик/диамагнитный металл/ферромагнетик на отклонение спиновой поляризации в структуре.

Рекомендации по использованию: результаты исследований могут применяться при конструировании приборов на спиновых эффектах: элементов магнитной памяти и наноразмерных генераторов микроволнового излучения, в которых переключение и генерация колебаний направления намагниченности осуществляется электрическим током без приложения внешних магнитных полей.

Область применения: спинтроника, приборы на спиновых эффектах.

SUMMARY

Kukharev Andrei Valer'evich

Oscillations of a magnetization direction in ferromagnetic nanostructures under the influence of spin-polarized electrons and laser radiation

Keywords: ferromagnetic nanostructures, magnetization oscillations, spin-polarized current, spin transfer torque effect, spin injection, elastic stresses, laser radiation, inverse Faraday effect.

Purpose of research: establish the regularities of excitation of oscillations and switching of a magnetization direction in disk-shaped multilayer metallic nanostructures consisting of a ferromagnet with a fixed magnetization direction, a diamagnet and a single-domain ferromagnet with a free magnetization direction, under the action on the ferromagnet of spin-polarized electrons, elastic mechanical stresses and laser radiation.

Methods of research: mathematical modeling, numerical methods for ordinary differential equations.

Obtained results and their novelty. New configurations of the ferromagnet/diamagnetic metal/ferromagnet nanostructure, in which a self-oscillating mode arises due to electrical current through the structure in the absence of external magnetic fields, have been discovered. The possibility to reduce the current density required for inducing the magnetization oscillations by means of the formation of the ferromagnetic layer in the form of a disk with a given aspect ratio has been showed. The regularities of the influence of homogeneous longitudinal elastic stresses on the frequency characteristics of microwave radiation nanogenerators operating on the effect of spin transfer torque have been determined. The regularities of excitation of oscillations and switching of magnetization direction in the ferromagnetic nanostructure by laser pulses of picosecond and nanosecond duration, linear and circular polarization have been determined. The regularities of the influence of parameters of a ferromagnet/diamagnetic metal/ferromagnet nanostructure on the deviation of the spin polarization in the structure.

Recommendations for use: the research results can be applied in the design of devices on spin effects: elements of magnetic memory and nanoscale microwave oscillators in which the generation of oscillations and reversal of the magnetization direction are realized by an electrical current without applying of external magnetic fields.

Field of application: spintronics, devices based on spin effects.

Научное издание

Кухарев Андрей Валерьевич

**КОЛЕБАНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ НАМАГНИЧЕННОСТИ
В ФЕРРОМАГНИТНЫХ НАНОСТРУКТУРАХ
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ
ПО СПИНУ ЭЛЕКТРОНОВ И ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

по специальности 05.16.08 – Нанотехнологии и наноматериалы

Подписано в печать	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл.печ.л.
Уч.-изд. л.	Тираж 60 экз.	Заказ

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/238 от 24.03.2014,
№ 2/113 от 07.04.2014, № 3/615 от 07.04.2014.
ЛП № 02330/264 от 14.04.2014.
220013, Минск, П. Бровки, 6.