

Секция 2

Физические науки

2.1 Оптика

Научная статья

УДК 538.915

ББК 22.37

ГРНТИ 29.19.22

ВАК 1.3.8.

PACS 75.30.Ds

OCIS 350.4238

MSC 82D45

Моделирование физических свойств структур спинтроники

К. К. Алтунин  ¹

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», 432071,
Ульяновск, Россия

Поступила в редакцию 12 июля 2025 года

После переработки 14 июля 2025 года

Опубликована 30 сентября 2025 года

Аннотация. Рассматривается задача распространения спиновой волны в структуре спинтроники. Работа направлена на активное исследование спиновой степени свободы в твердотельных структурах спинтроники. Исследовалась спиновая волна, которая является волной намагниченности в магнитоупорядоченных веществах. Созданная теоретическая модель на основе уравнения Блоха позволяет описать физический процесс распространения спиновых волн в структурах спинтроники и стейнтроники. Показано, что разработанная компьютерная программа позволяет численно решать систему уравнений Блоха для описания динамики спиновой волны в структурах спинтроники. Получены графики зависимости усреднённого спина в структурах спинтроники как функции времени.

Ключевые слова: спиновая волна, спинтроника, спин, уравнения Блоха, моделирование, численные расчёты

¹E-mail: kostya_altunin@mail.ru

Введение

Спинтроника или спиновая электроника является направлением квантовой электроники и физики твёрдого тела, в котором ключевую роль играют спин и спиновые токи. Спинтроника представляет собой новое направление физики твёрдого тела, основанное на использовании спина электрона в качестве носителя информации наряду с электрическим зарядом электрона. Стейнтроника развивает концепцию спинтроники, добавляя управление деформацией кристаллической решётки для манипулирования спиновыми состояниями. Развитие спинтроники является ключевым направлением современной физики конденсированного состояния, определяющим прогресс в создании новых оптоэлектронных приборов и устройств. Актуальность исследования обусловлена стремительным развитием спинтроники как наиболее перспективной технологии для дальнейшего совершенствования элементной базы информационных систем, что требует детального понимания фундаментальных физических процессов в спинтронных структурах.

Целью работы является комплексное исследование фундаментальных физических свойств структур спинтроники.

Задачи работы могут быть сформулированы следующим образом:

1. написать обзор научной литературы по современным исследованиям физических свойств структур спинтроники,
2. создать теоретическую модель для описания физических процессов распространения спиновых волн в структурах спинтроники,
3. разработать компьютерную программу для численного решения уравнения Блоха в структурах спинтроники.

Объектом исследования является класс структур спинтроники. Предметом исследования являются совокупность физических свойств структур спинтроники на основе магнитных материалов.

В данной работе применяются современные методы научного исследования, включая теоретические методы расчёта физических характеристик и численные методы моделирования физических процессов спинтроники, а также компьютерные методы моделирования физических процессов спинтроники.

Материалы исследования включают в себя магнитные материалы спинтроники.

Гипотеза научного исследования заключается в том, что если провести компьютерное моделирование спиновой волны в структурах спинтроники, то можно прогнозировать физические свойства спинтронных устройств для хранения, передачи и обработки цифровой информации.

Научная новизна исследования заключается в том, что впервые исследованы совместные эффекты спиновых и электронных состояний в структурах спинтроники и разработаны оригинальные методы управления спиновыми состояниями.

Теоретическая значимость исследования состоит в том, что исследование расширит понимание физических процессов в структурах спинтроники, что позволит разработать новые теоретические модели.

Практическая значимость исследования состоит в возможности использования полученных результатов для разработки новых высокочувствительных датчиков, элементов памяти с произвольным доступом, спиновых диодов и транзисторов, а также спиновых процессоров нового поколения. Результаты также могут быть использованы при создании энергоэффективных устройств памяти и логических элементов нового поколения.

Обзор физических свойств структур спинтроники

Спинтронные структуры и системы демонстрируют уникальные физические свойства, в первую очередь связанные с переносом электронного спина. Ключевые эффекты включают гигантское магнитосопротивление, туннельное магнитосопротивление и спиновый крутящий момент, которые улучшают возможности обработки и хранения данных. На эти свойства влияют качество интерфейсов и чистота материала, поскольку рассеяние с переворотом спина должно быть минимизировано для сохранения целостности данных. Кроме того, геометрия этих наноструктур тщательно контролируется в наномасштабе, что имеет решающее значение для их функциональности в современных электронных устройствах.

Спинтроника является новой областью физических исследований, сосредоточенных на исследовании динамики спин-поляризованного электронного тока через границы разделов магнитных сред и вблизи материалов с электронными структурами, зависимыми от электронных спинов. Спинтроника произвела революцию в области магнитного хранения и имеет потенциал для будущих применений в энергонезависимой памяти и логических устройствах. Структуры спинтроники демонстрируют уникальные физические свойства благодаря своим электронным структурам, зависимым от электронных спинов. Эти свойства структур спинтроники включают способность управлять неравновесными спин-поляризованными популяциями электронов, что повышает эффективность магнитных датчиков и позволяет использовать линейные (резистивные) спинтронные устройства для магнитного считывания @auxrussian@auxenglish[1]. Кроме того, продолжающиеся исследования нелинейного спин-поляризованного электронного транспорта в металлах и полупроводниках предполагают потенциал для новых применений в быстрой энергонезависимой памяти и логических устройствах, что ещё больше расширяет фундаментальные материальные свойства спинтроники.

Структуры спинтроники демонстрируют ряд физических свойств, которые имеют решающее значение для их функциональности и применения в современных электронных устройствах. Эти свойства в первую очередь зависят от спина электронов, а не от их заряда, что позволяет реализовать уникальные явления, такие как гигантское магнитосопротивление и туннельное магнитосопротивление, которые имеют решающее значение для разработки высокочувствительных датчиков магнитного поля и устройств памяти [2]. Структуры спинтроники демонстрируют уникальные физические свойства, такие как доменные микроструктуры, скирмионы и спиновые волны. Структуры спинтроник используют спин-поляризованные токи, на которые влияют такие явления, как гигантское и туннельное магнитосопротивление и спиновый перенос углового момента. Эти свойства позволяют манипулировать спиновыми токами через магнитные поля, механические деформации в мультиферроидных структурах и сверхкороткие оптические импульсы, что делает их более выгодными по сравнению с традиционными полупроводниковыми технологиями для приложений обработки и хранения информации [2]. Такие материалы, как монослойные наноленты MoS_2 , демонстрируют сильную спин-орбитальную связь и прямые запрещённые зоны, которые способствуют высокой спиновой поляризации и управляемости спиновых степеней свободы, что необходимо для устройств на основе спина [3]. Магнитное обменное поле и электростатические барьеры в этих структурах можно изменять для достижения значительных эффектов спиновой фильтрации и переключения, усиливая эффект гигантского магнитосопротивления [3]. В статье [3] построена монослойная зигзагообразная квантовая структура MoS_2 наноленты электрически управляемых ферромагнитных электродов для решения проблемы управления спиновыми степенями свободы по требованию. Физические свойства структур спинтроники, особенно в монослойных дихалькогенидах переходных металлов, таких как MoS_2 , включают прямую запрещённую зону и сильную

спин-орбитальную связь. Эти свойства обеспечивают высокую спиновую поляризацию и управляемость спиновыми степенями свободы, которые необходимы для эффективного спинового транспорта. Исследование подчёркивает значимость магнитного обменного поля и электростатических барьеров в регулировании спинового транспорта, что приводит к таким явлениям, как 100 % спиновая фильтрация и гигантские эффекты магнитосопротивления в квантовых структурах. Кроме того, упорядоченные по вакансиям двойные перовскиты, такие как K_2TcZ_6 , демонстрируют стабильные структуры и ферромагнитные свойства благодаря роли $4d$ -электронов, которые влияют на спиновую поляризацию и температуру Кюри [4]. В статье [4] исследуются вакансионно-упорядоченные двойные перовскиты K_2TcZ_6 ($Z = Cl, Br$) для спинтроники, подчёркивая их стабильные структуры и нетоксичные свойства. Изучаются стабильные структуры, электронные и магнитные характеристики и термоэлектрические эффекты. Эти свойства позволяют использовать такие приложения, как датчики магнитного поля, гальванические изоляторы, считывающие головки, запоминающие устройства с произвольным доступом, переключатели передачи спина и наногенераторы спинового момента. Материалы, используемые в гигантском магнитосопротивлении и туннельном магнитосопротивлении, имеют решающее значение для работы устройства, в то время как трёхтерминальные спинтронные устройства, такие как спиновые транзисторы, изучаются на предмет их фундаментальных физических принципов, подчёркивая их потенциал в будущих исследованиях и приложениях. В статье [4] обсуждается наличие ферромагнетизма, обменных констант и плотности состояний. В статье [4] также исследуются оптические свойства и термоэлектрические характеристики. Ключевые физические свойства включают ферромагнетизм, обусловленный электронным спиновым обменом, характеризующийся плотностью состояний на уровне Ферми и пониманием температуры Кюри. Кроме того, в статье [4] изучаются оптические характеристики, такие как поглощение, диэлектрические постоянные и показатель преломления, а также термоэлектрические эффекты, включая коэффициент Зеебека и электронную проводимость, которые имеют решающее значение для приложений спинтроники. Механические свойства спинтронных материалов также имеют решающее значение, поскольку гибкие магнитные плёнки и гетероструктуры обеспечивают механическую растяжимость и совместимость, которые полезны для разработки портативных и формируемых спинтронных устройств [5]. Эти плёнки можно оптимизировать с помощью механической деформации для улучшения их магнитных и электронных транспортных свойств, что ещё больше расширяет сферу применения спинтроники в потребительской электронике [5]. В статье [6] показано, что спинтронные структуры демонстрируют уникальные физические свойства, такие как гигантское магнитосопротивление и туннельное магнитосопротивление, которые имеют решающее значение для их функциональности. Спинтронные структуры используют степень свободы спина электрона, что обеспечивает нулевую утечку в режиме ожидания, низкое энергопотребление и энергонезависимые характеристики памяти. Кроме того, такие явления, как крутящий момент спиновой передачи, спиновый эффект Холла и магнитная анизотропия, управляемая напряжением, играют важную роль в их работе. Эти свойства способствуют эффективному хранению и обработке данных, делая спинтронные устройства многообещающими альтернативами традиционной CMOS-технологии. В статье [7] обсуждаются основные физические свойства двумерных магнитных материалов, имеющих отношение к спинтронике, включая дальний магнитный порядок в толщине монослоя и слабые межслоевые силы Ван-дер-Ваальса. Эти свойства позволяют манипулировать конфигурациями спинов, что имеет решающее значение для разработки спинтронных устройств. В статье [7] рассматриваются различные двумерные магнитные материалы, такие как CrX_3 , трихалькогениды переходных металлов и магнитные монослои Януса, подчёркивая их потенциал для но-

вых применений в спинтронике посредством эффективных методов модуляции. В статье [8] исследуются физические свойства полуметаллических перовскитов $AFeO_3$ ($A = Ca, Sr, Ba$), имеющие отношение к спинтронике. Она выявляет металлическое поведение в канале спин-вверх и полупроводниковое поведение в канале спин-вниз, подтверждая полуметаллические характеристики. Целочисленный полный магнитный момент указывает на сильные магнитные свойства, в то время как рассчитанные электронные и оптические свойства предполагают пригодность для спинтронных приложений. Кроме того, структурная стабильность и характеристики связи подтверждают их потенциальное использование в передовых спинтронных устройствах. В статье [9] представлен обзор физики, связанной с протеканием спин-поляризованного тока через магнитные туннельные структуры, включая использование планарной геометрии и применение комбинированных внешних факторов (микроволновое и оптическое излучение). Магнитные туннельные структуры на основе манганита демонстрируют несколько уникальных физических свойств, включая высокую температуру Кюри, высокую спиновую поляризацию электронов проводимости (до 100 %) и высокую химическую стабильность. Эти структуры также демонстрируют хорошо развитую технологию изготовления и устойчивость к внешним возмущениям. Транспортные свойства могут зависеть от таких факторов, как ток смещения, магнитное поле и электромагнитное излучение, что позволяет исследовать явления спин-поляризованного транспорта и разрабатывать инновационные спинтронные устройства.

В статье [10] представлены результаты комплексного подхода к всестороннему анализу структуры, электрического заряда и спина спинтронных материалов и устройств с использованием широкого спектра современных инструментов синхротронного излучения, включая магнитный комптоновский анализ, ядерный резонансный анализ рассеяния, поверхностную и интерфейсную рентгеновскую дифракцию, операндо-анализ наноэлектронной структуры и фотоэмиссионную спектроскопию. В статье [10] исследуются физические свойства спинтронных материалов с помощью современных методов синхротронного излучения. Эти свойства включают анализ структуры, заряда и спина, которые имеют решающее значение для разработки таких устройств, как энергонезависимая магнитная память и микроволновые генераторы. Такие методы, как магнитный комптоновский анализ, ядерное резонансное рассеяние и фотоэмиссионная спектроскопия, дают представление об электронных и магнитных характеристиках этих материалов, улучшая понимание их функциональности в спинтронных приложениях.

В статье [11] рассматриваются физические явления и основные технические возможности создания различных устройств спинтроники: мазера, р-п-диода с колоссальным магнитосопротивлением, спинового клапана, магнитной линзы, оптических модуляторов, усилителя спиновых волн. Физические свойства спинтронных структур, особенно основанных на магнитных полупроводниках, существенно изменяются в наномасштабе, влияя на механические свойства, теплопроводность и фундаментальные характеристики, такие как температура плавления и Дебая. В магнитных полупроводниках электронная структура радикально изменяется, что приводит к аномалиям магнитных и транспортных свойств. Тонкоплёночные структуры демонстрируют уникальные особенности, которые позволяют применять их в таких устройствах, как мазеры, р-п-переходы с колоссальным магнитосопротивлением, спиновые клапаны и модуляторы инфракрасного излучения, повышая их функциональность в спинтронике.

В статье [12] описаны основные физические свойства сплава $FeCrAs$, который демонстрирует механическую стабильность, полуметаллический ферромагнетизм и непрямую запрещённую зону в канале спина меньшинства. Он имеет полный магнитный момент, в основном обусловленный атомами Cr, и высокую температуру Кюри около 1000 К. Эти свойства делают сплав $FeCrAs$ перспективным кандидатом для спинтронных при-

ложений, подчёркивая его потенциал в разработке функциональных материалов для современных спинтронных устройств.

В работе [13] подчёркивается, что спинтронные системы манипулируют спином электронов, что приводит к созданию стабильных спиновых кубитов, менее подверженных декогеренции. Спинтронные системы используют спин электронов для создания кубитов и выполнения квантовых операций, предлагая потенциальные преимущества в стабильности, декогеренции и скорости. Спинтронные системы также обеспечивают эффективный контроль взаимодействия кубитов и использование спиновых квантовых вентилей для более быстрых операций.

В статье [14] рассматриваются недавние прорывы, связанные с применением оксидных нанопроводов в спинтронике с точки зрения как кандидатов на материалы, так и изготовления устройств. Физические свойства спинтронных структур, в частности оксидных нанопроводов, значительно отличаются от их объёмных аналогов из-за таких факторов, как превосходная кристалличность, размерные эффекты, поверхностные состояния и нарушенная симметрия. Эти свойства обеспечивают улучшенные функциональные возможности, такие как улучшенный ферромагнетизм, низкочастотное магнитосопротивление и поляризованное излучение света. Оксиды переходных металлов демонстрируют ряд поведений от изоляторов до сверхпроводников, что делает их универсальными кандидатами для спинтронных приложений, хотя остаются проблемы в синтезе материалов и изготовлении устройств.

В статье [15] показано, что стохастическая полярность переключения перпендикулярной намагниченности верхнего слоя CoFeB может быть достигнута путём манипулирования направлениями обменного смещения нижнего слоя IrMn/CoFeB , который служит источником энтропии для спинтронного устройства, которое характеризуется высокой энтропией, уникальностью, реконфигурируемостью и цифровым выходом. В статье [15] обсуждаются спинтронные структуры, в частности $\text{IrMn/CoFeB/Ta/CoFeB}$, которые демонстрируют переключение спин-орбита-крутящий момент без поля. Эти структуры используют стохастическую полярность переключения перпендикулярной намагниченности верхнего CoFeB , на которую влияют направления обменного смещения нижнего IrMn/CoFeB . Ключевые физические свойства включают высокую энтропию, уникальность, реконфигурируемость и нулевую частоту битовых ошибок при повторяющихся операциях. Кроме того, они демонстрируют устойчивость к внешним магнитным полям, что делает их подходящими для масштабируемых и энергоэффективных реализаций в приложениях аппаратной безопасности.

В работе [16] рассматриваются некоторые физические свойства структур спинтронных устройств на основе ферромагнитных полупроводников и показывают, что спиновая поляризация такого спин-поляризованного тока может быть обнаружена оптическими средствами с использованием интегрированных светодиодов. В работе [16] обсуждаются спинтронные свойства ферромагнитных полупроводников, подчёркивая их способность генерировать спин-поляризованные токи из-за спонтанного расщепления спинового состояния. Ключевые физические свойства включают высокое туннельное магнитосопротивление в магнитных туннельных переходах на основе $(\text{Ga,Mn})\text{As}$, наличие магнитных доменов, простирающихся почти на миллиметр, и манипулирование доменными стенками спин-поляризованными токами. Кроме того, подчеркивается оптический контроль ферромагнетизма посредством фотогенерированных носителей, демонстрируя взаимодействие между спин-поляризацией и магнитными свойствами в этих материалах.

В целом, разнообразные физические свойства спинтронных структур, от магнитных и электронных характеристик до механической гибкости, подчёркивают их потенциал в революционизации информационных технологий и дизайна спинтронных устройств.

Уникальные свойства спинтроники способствуют развитию мощных технологий квантовых вычислений.

Стрейнтроника является развивающейся инновационной областью физической науки, ориентированной на энергоэффективные вычисления и обработку сигналов с использованием магнестрикционных наномагнетиков, которыми можно манипулировать посредством механической деформации. Этот подход позволяет создавать маломощные логические и запоминающие устройства, в которых небольшое напряжение может вызывать достаточную деформацию для переключения состояний намагниченности, что приводит к рассеиванию энергии [17]. В работе [17] разработана стрейнтронные логические вентили и ячейки памяти и извлекли их показатели производительности с помощью моделирования Ландау-Лифшица-Гилберта для прогнозирования беспрецедентной энергоэффективности. Стрейнтроника представляет собой энергоэффективную вычислительную парадигму, использующую наномасштабные мультиферроики, где небольшое напряжение вызывает деформацию в пьезоэлектрическом слое, переключая намагниченность магнестрикционного наномагнетика для логических операций и операций памяти, рассеивая всего несколько аттоджоулей энергии.

Стрейнтроника является областью физической науки, которая управляет намагничиванием магнестрикционных наномагнетиков с помощью механической деформации для энергоэффективных приложений. Стрейнтроника обеспечивает энергонезависимое хранение информации, низкоэнергетическую обработку и различные функции, такие как цифровая логика, память и генерация сигналов, продвигаясь к основным технологиям. Энергонезависимая природа этих устройств даёт преимущества по сравнению с традиционными системами на основе заряда, позволяя сохранять данные без питания. Недавние достижения в области стрейнтроники исследовали различные приложения, включая цифровую обработку информации, небулевы вычисления и гибридные системы, которые интегрируют стрейнтронику с магнетикой. Потенциал стрейнтроники для революции в энергоэффективных технологиях значителен, поскольку это может привести к появлению процессоров, способных работать на собранной окружающей энергии, тем самым устраняя необходимость в батареях [17].

В статье [18] представлена разработанная континуальная теория графена, рассматривающая на равных основаниях как однородную деформацию Коши-Борна, так и микроскопические степени свободы, связанные с двумя подрешётками. В то время как теория восстанавливает все существующие результаты из однородной континуальной теории, уравнение Дирака-Вейля оказывается дополненным новыми псевдокалибровочными и хиральными полями, принципиально отличными от тех, которые возникают в результате однородной деформации. В статье [18] объясняются три поразительных электронных следствия: деформации, отличные от деформаций Коши-Борна, допускают транспортировку поляризованного долиной заряда на произвольно большие расстояния, например, вдоль спроектированного хребта; триаксиальные деформации, необходимые для создания приблизительно однородного магнитного поля, не нужны при деформации, отличной от деформации Коши-Борна; и, наконец, исчезновение эффектов одномерной гофрировки, наблюдаемых в расчётах при релаксации решётки, объясняется как компенсация деформации Коши-Борна и недеформации Коши-Борна.

Сверхбыстрая спиновая динамика, модулированная деформацией, внедренного в экзодраальный борный фуллерен кобальта исследуется с помощью высокоуровневых расчётов. В статье [19] обнаружено, что благодаря своей высокой пластичности и ковкости B_{40} может сохранять свою структуру как при добавлении магнитного атома, так и при воздействии механической растягивающей или сжимающей деформации, и что его модуль упругости является высокоанизотропным. Геометрическая оптимизация показывает, что экзодраальный борный фуллерен предпочитает три различные конфигурации.

Для исследования спиновой динамики в статье [19] сосредоточимся на одной из них, а именно на конфигурации с кобальтом, расположенным вблизи центра семиугольника (единственная геометрия, в которой борная клетка остается нетронутой), в качестве примера для исследования особенностей спиновой динамики. Предлагается несколько сценариев лазерно-индуцированного переворота спина, детали которых сильно зависят от величины и направления любых деформаций. Таким образом, используя связь между внешней механической деформацией и спиновой степенью свободы в магнитных экзоэдальных фуллеренах на основе бора, в статье [19] демонстрируется реализуемость магнотострейнтронных устройств на молекулярных системах. Асимметричная модуляция процесса переворота спина относительно деформации растяжения и сжатия (растяжение-сжатие-асимметричная сверхбыстрая спиновая динамика) может обеспечить дальнейшее управление такими интегрированными спин-логическими устройствами.

Растёт научный интерес к исследованию наномагнитных устройств в качестве потенциальных замен электронных устройств (например, транзисторов) в цифровых коммутационных схемах и системах. Особый класс наномагнитных устройств переключается с помощью электрически генерируемой механической деформации, что приводит к электрическому управлению магнетизмом. К этой категории относятся стрейнтронные магнитотуннельные переходы. Их мягкие слои состоят из двухфазных мультиферроиков, включающих магнотострикционный слой, упруго связанный с пьезоэлектрическим слоем. В статье [20] показано, что один стрейнтронный магнитотуннельный переход с пассивным резистором может действовать как микроволновый генератор, традиционная реализация которого потребовала бы микроволновых операционных усилителей, конденсаторов и резисторов. Это уменьшает площадь и стоимость устройства, одновременно повышая надёжность устройства. Это аналоговое применение магнитных устройств, в котором магнитные взаимодействия (взаимодействие между анизотропией формы, анизотропией деформации, полем дипольной связи и крутящим моментом спиновой передачи в мягком слое стрейнтронных магнитотуннельных переходов) используются для реализации генератора с уменьшенной площадью.

В статье [21] исследована сверхбыстрая динамика намагничивания отдельных наномагнитов, резонансно возбуждаемых поверхностными акустическими волнами, генерируемыми нелокально немагнитными фононными решётками. Используя магнитооптический микроскоп с временным разрешением на эффекте Керра, в статье [21] сообщается о зависимости магнитоупругого резонанса от длины волны поверхностных акустических волн и размера наномагнита. В статье [21] показано, что амплитуда прецессии отдельных наномагнитов монотонно и нелинейно увеличивается с уменьшением размера образца. Кроме того, для наномагнитов ниже критического размера в статье [21] обнаружено, что амплитуда колебаний увеличивается с частотой поверхностных акустических волн. Измерения динамики намагничивания с развёрткой поля показывают, что затухание магнитоупругого резонанса также уменьшается с размером магнита, в конечном итоге достигая минимального значения, определяемого затуханием Гилберта. В статье [21] показано, что акустически управляемая спиновая динамика обладает благоприятными характеристиками масштабирования, что подтверждает идею о том, что эффективные высокочастотные (10–100 ГГц) наномасштабные стрейнтронные устройства, ограниченные только α , возможны.

Модель

Момент импульса электромагнитного поля можно выразить как сумму орбитального момента импульса, который связан с пространственным распределением светового пучка, и спинового момента импульса, который связан с поляризационными свойствами

света. Как электромагнитная энергия и линейный импульс, спиновый момент импульса также удовлетворяет уравнению непрерывности

$$\nabla \cdot J_S + \frac{\partial S}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

где \mathbf{S} – оптическая плотность спинового момента импульса, а J_S – оптический поток плотности спинового момента импульса. Для монохроматических волн в вакууме усредненная по времени плотность спинового углового момента и плотность потока спинового углового момента имеют вид

$$\langle \mathbf{S} \rangle = \frac{1}{16\pi\omega} \text{Im} [\mathbf{E}^* \times \mathbf{E} + \mathbf{H}^* \times \mathbf{H}], \quad (2)$$

$$\langle J_S \rangle = \frac{c}{16\pi\omega} \text{Im} [(\mathbf{E} \cdot \mathbf{H}^*) - \mathbf{E} \otimes \mathbf{H}^* - \mathbf{H}^* \otimes \mathbf{E}], \quad (3)$$

где ω – частота волны, $k = \omega/c$ – волновой вектор, а c – скорость света.

Мы будем называть поток углового момента спина оптическим спиновым током.

Для плоской волны в вакууме плотность оптического спинового тока равна внешнему произведению плотности углового момента спина и групповой скорости \mathbf{v}_g

$$\langle J_S \rangle = \frac{1}{2} \langle \mathbf{S} \rangle \otimes \mathbf{v}_g. \quad (4)$$

Это выражение позволяет провести аналогии между спином фотона и электронными токами. Электромагнитные волны с одинаковым знаком спинового момента импульса и групповой скорости имеют положительный спиновый ток, и наоборот. Это приводит к следующему наблюдению – суперпозиция двух волн, распространяющихся в разных направлениях, может иметь ненулевой спиновый ток, но при этом нулевой вектор Пойнтинга, если одинаковый знак спинового момента импульса и групповой скорости совпадает для каждой из волн в отдельности. Действительно, для следующей конфигурации поля

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = a_+ \hat{\mathbf{e}}_0 e^{ikz} + a_- \hat{\mathbf{e}}_0^* e^{-ikz}, \quad (5)$$

где $\hat{\mathbf{e}}_0 = (\hat{\mathbf{e}}_x + i\hat{\mathbf{e}}_y) / \sqrt{2}$, а a_{\pm} – комплексные амплитуды, только ненулевые компоненты потока энергии (вектор Пойнтинга) и плотности спинового тока

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{P}_z \rangle &= \frac{c}{8\pi} (|a_+|^2 - |a_-|^2), \\ \langle J_{S_{zz}} \rangle &= \frac{c}{16\pi\omega} (|a_+|^2 + |a_-|^2). \end{aligned} \quad (6)$$

Когда амплитуды прямых и обратных распространяющихся волн равны, они образуют стоячую волну, однако спиновый ток отличен от нуля.

Результаты численных расчётов спиновых процессов в структурах спинтроники

Спиновые процессы будем описывать с помощью уравнения Блоха в виде

$$\frac{d\mathbf{S}}{dt} = \gamma \mathbf{S} \times (\mathbf{B} + \delta\mathbf{B}) - R \left(\mathbf{S} - \frac{\mathbf{S}_0}{2} \right) - \Gamma_{r0} \mathbf{S}, \quad (7)$$

где \mathbf{S} – усреднённый спин, R – диссипативный член, учитывающий потери энергии, $\gamma = \gamma_e g_s$, $\gamma_e = -e/(2m)$ – гиромагнитное отношение.

Феликс Блох ввёл феноменологические члены затухания. Диссипативный член R , учитывающий потери энергии, находится по формуле

$$R = \begin{pmatrix} \frac{1}{T_2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_1} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где $R_{11} = 1/T_2$, $R_{22} = 1/T_2$, $R_{33} = 1/T_1$, T_1 – время продольной релаксации, T_2 – время поперечной релаксации.

Полная индукция магнитного поля находится по формуле

$$\mathbf{B}_{tot} = \mathbf{B} + \delta\mathbf{B}. \quad (9)$$

Начальное значение спина равно

$$\mathbf{S}_0 = \left(-\frac{1}{2}, 0, 0\right). \quad (10)$$

Запишем систему уравнений Блоха по декартовым компонентам

$$\begin{cases} \frac{dS_x}{dt} = \gamma (S_y (\mathbf{B}_z + \delta\mathbf{B}_z) - S_z (\mathbf{B}_y + \delta\mathbf{B}_y)) - R_{11} \left(S_x - \frac{S_{0x}}{2}\right) - \Gamma_{r0} S_x, \\ \frac{dS_y}{dt} = \gamma (-S_x (\mathbf{B}_z + \delta\mathbf{B}_z) + S_z (\mathbf{B}_x + \delta\mathbf{B}_x)) - R_{22} \left(S_y - \frac{S_{0y}}{2}\right) - \Gamma_{r0} S_y, \\ \frac{dS_z}{dt} = \gamma (S_x (\mathbf{B}_y + \delta\mathbf{B}_y) - S_y (\mathbf{B}_x + \delta\mathbf{B}_x)) - R_{33} \left(S_z - \frac{S_{0z}}{2}\right) - \Gamma_{r0} S_z. \end{cases} \quad (11)$$

В работе составлена компьютерная программа для численного решения системы уравнений (11).

На рис. 1 приведено изображение первой части компьютерной программы на языке Maple для численного решения системы уравнений Блоха, описывающей спиновые волны. Первая часть компьютерной программы на языке Maple для численного решения системы уравнений Блоха, описывающей спиновые волны, включает в себя блок подключения необходимых библиотек расширений, блок описания физических констант и параметров решаемой задачи, блок описания системы уравнений Блоха для спиновой динамики.

На рис. 2 приведено изображение второй части компьютерной программы на языке Maple для численного решения системы уравнений Блоха, описывающей спиновые волны. Вторая часть компьютерной программы на языке Maple для численного решения системы уравнений Блоха, описывающей спиновые волны, включает в себя функции для построения трёхмерных графиков компонент спиновой волны как функции времени.

На рис. 3 приведено изображение третьей части компьютерной программы на языке Maple для численного решения системы уравнений Блоха, описывающей спиновые волны.

Третья часть компьютерной программы на языке Maple для численного решения системы уравнений Блоха, описывающей спиновые волны, включает в себя функции для построения двумерных графиков проекций усреднённого спина в спиновой волне как функции времени.

Приведём результаты численного решения системы уравнений Блоха для спиновой волны с выбранным набором параметров.

На рис. 4 приведено изображение графика зависимости проекции усреднённого спина S_x от времени t для спиновой волны.

На рис. 5 приведено изображение графика зависимости проекции усреднённого спина S_y от времени t для спиновой волны.

```

> restart;
with(plots):
with(DEtools):
charge_e := 1.602176634e-19:
m_e := 9.109e-31:
g_s := 2.0023:
g := g_s * charge_e / (2.0 * m_e):
omega := 4.34e+9:
Bx := 0.0: By := 0.0: Bz := 0.175:
BLx := 0.007: BLy := 0.007: BLz := 0.014:
Gr0 := 1.37e-11:
t0 := 1.2e-15:
tau_I := 1.0 / Gr0:

deltaBx := (t) -> BLx * cos(omega * t) * exp(-((t - t0)^2) / tau_I^2):
deltaBy := (t) -> BLy * cos(omega * t) * exp(-((t - t0)^2) / tau_I^2):
deltaBz := (t) -> BLz * cos(omega * t) * exp(-((t - t0)^2) / tau_I^2):

T1 := 1.310e-3: T2 := 3.17e-6:
R11 := 1.0 / T2: R22 := 1.0 / T2: R33 := 1.0 / T1:
Sx0 := -0.5: Sy0 := 0.0: Sz0 := 0.0:
ics := Sx(0) = -0.5, Sy(0) = 0.0, Sz(0) = 0.0:
Bloch_system := { d/dt Sx(t) = g * (Sy(t) * (Bz + deltaBz(t)) - Sz(t) * (By + deltaBy(t))) - R11 * (Sx(t)
- 0.5 * Sx0) - Gr0 * Sx(t), d/dt Sy(t) = g * (-Sx(t) * (Bz + deltaBz(t)) + Sz(t) * (Bx
+ deltaBx(t))) - R22 * (Sy(t) - 0.5 * Sy0) - Gr0 * Sy(t), d/dt Sz(t) = g * (Sx(t) * (By + deltaBy(t))
- Sy(t) * (Bx + deltaBx(t))) - R33 * (Sz(t) - 0.5 * Sz0) - Gr0 * Sz0(t), ics };
solution := dsolve(Bloch_system, numeric, method = rkf45, complex = false, output = procedurelist):

```

Рис. 1. Первая часть компьютерной программы на языке Maple для численного решения системы уравнений Блоха, описывающей спиновые волны.

На рис. 6 приведено изображение графика зависимости проекции усреднённого спина S_z от времени t для спиновой волны.

На рис. 7 приведено изображение трёхмерного графика зависимости проекций усреднённого спина S_x и S_y от времени t для спиновой волны.

На рис. 8 приведено изображение трёхмерного графика зависимости проекций усреднённого спина S_y и S_z от времени t для спиновой волны.

На рис. 9 приведено изображение трёхмерного графика зависимости проекций усреднённого спина S_x и S_z от времени t для спиновой волны.

Разработанная компьютерная программа позволяет проводить численное решение системы уравнений Блоха для описания динамики спиновой волны в структурах спинтроники с выбранным набором параметров.

Заключение

В работе решена задача распространения спиновой волны в структуре спинтроники. Работа направлена на исследование физического процесса распространения спиновой волны в твердотельных структурах спинтроники. В работе исследовалась спиновая волна, которая является волной намагниченности в магнитоупорядоченных веществах таких, как ферромагнетики, антиферромагнетики и ферримагнетики. В соответствии с принципом корпускулярно-волнового дуализма спиновые волны являются в то же время квазичастицами, которые получили название магнонов.

Выводы по работе можно сформулировать следующим образом:

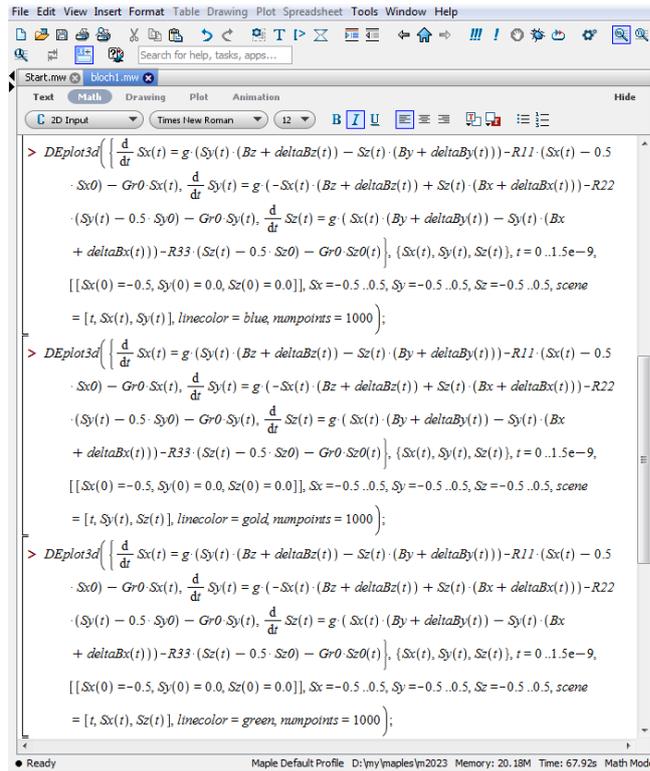


Рис. 2. Вторая часть компьютерной программы на языке Марле для численного решения системы уравнений Блоха, описывающей спиновые волны.

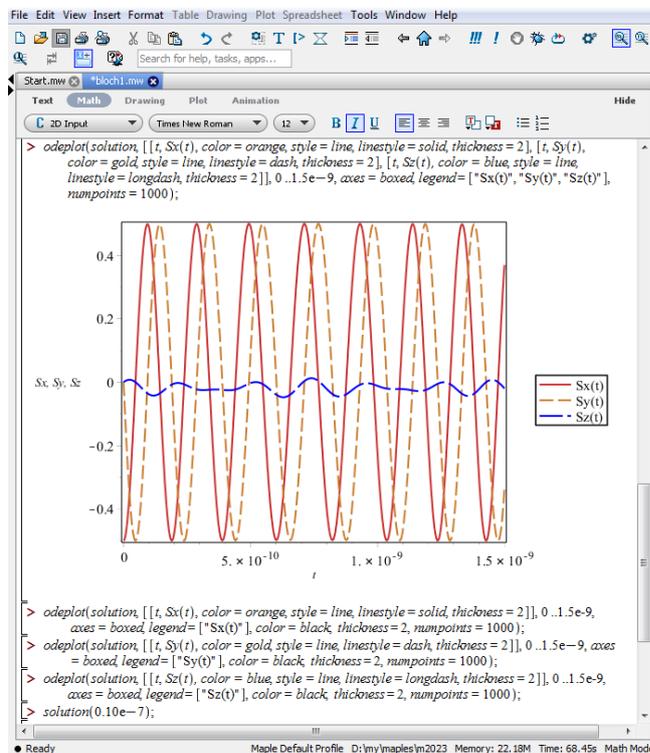


Рис. 3. Третья часть компьютерной программы на языке Марле для численного решения системы уравнений Блоха, описывающей спиновые волны.

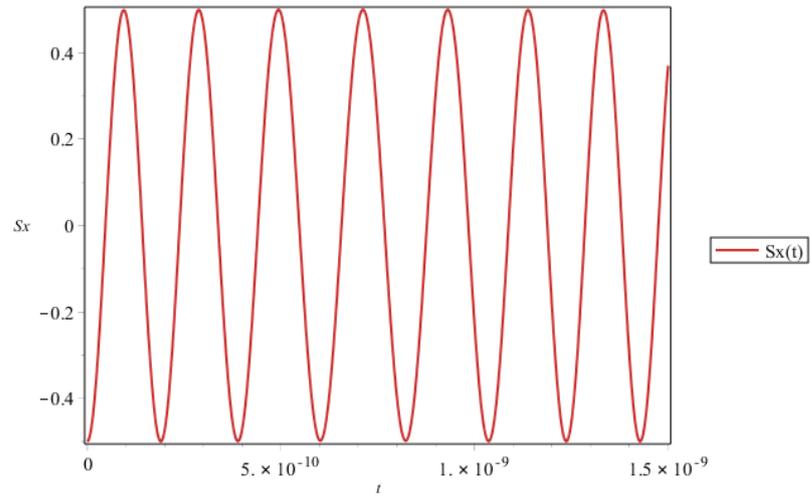


Рис. 4. График зависимости проекции усреднённого спина S_x от времени t для спиновой волны.

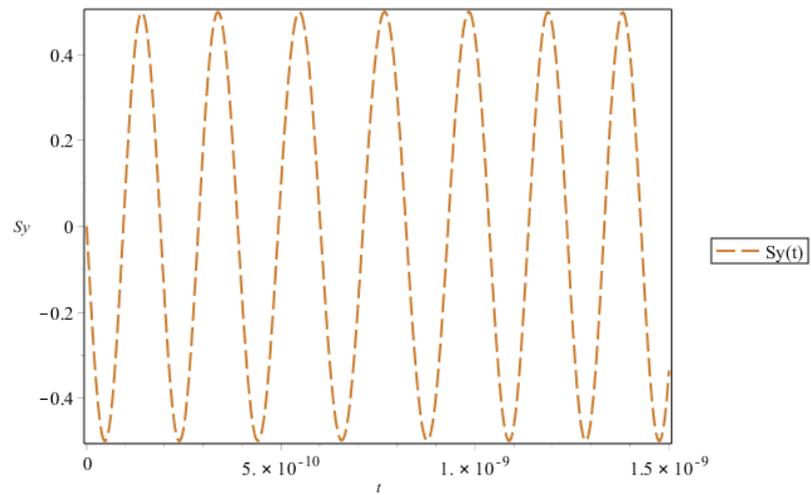


Рис. 5. График зависимости проекции усреднённого спина S_y от времени t для спиновой волны.

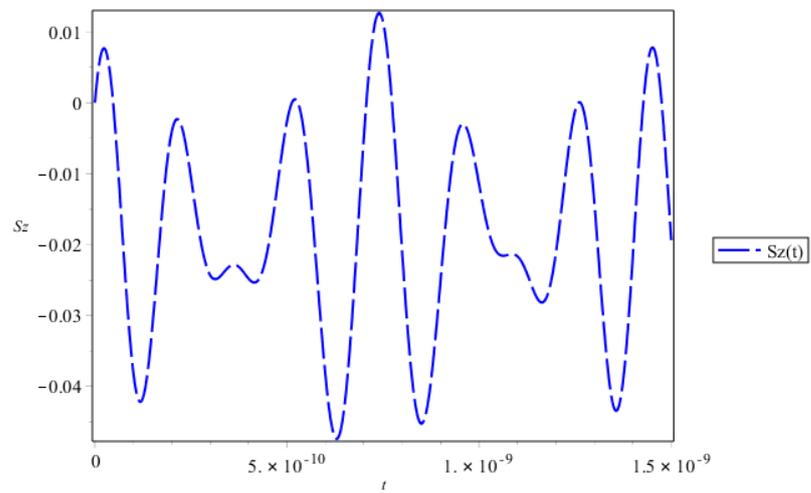


Рис. 6. График зависимости проекции усреднённого спина S_z от времени t для спиновой волны.

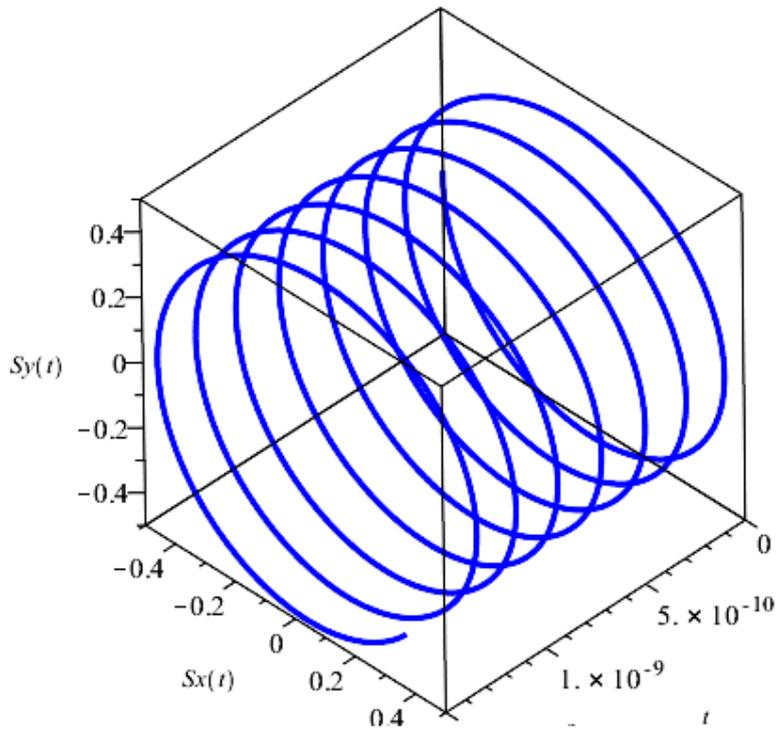


Рис. 7. Трёхмерный график зависимости проекций усреднённого спина S_x и S_y от времени t для спиновой волны.

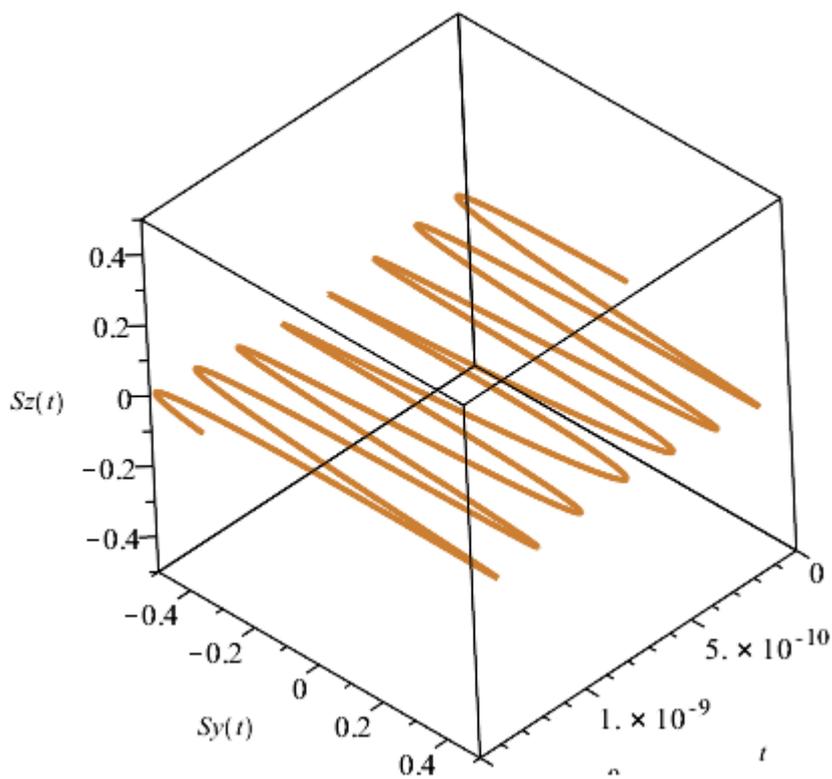


Рис. 8. Трёхмерный график зависимости проекций усреднённого спина S_y и S_z от времени t для спиновой волны.

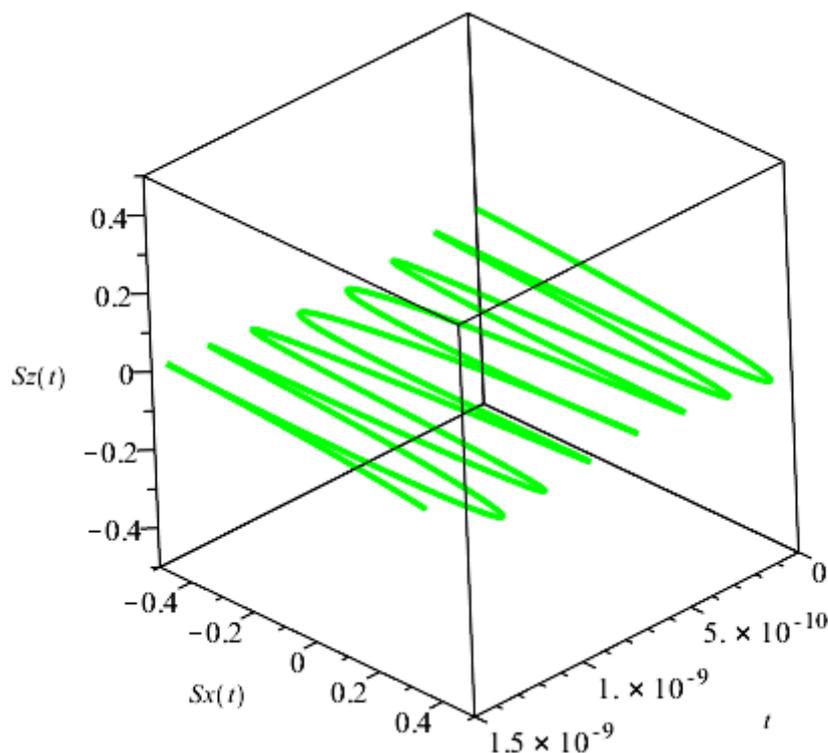


Рис. 9. Трёхмерный график зависимости проекций усреднённого спина S_x и S_z от времени t для спиновой волны.

1. в результате анализа научной литературы установлена актуальность исследования физических свойств структур спинтроники,
2. созданная теоретическая модель на основе уравнения Блоха позволяет описать физический процесс распространения спиновых волн в структурах спинтроники и стейнтроники,
3. показано, что разработанная компьютерная программа позволяет численно решать систему уравнений Блоха для описания динамики спиновой волны в структурах спинтроники,
4. получены графики зависимости усреднённого спина в структурах спинтроники как функции времени.

Задачи работы решены полностью.

Гипотеза научного исследования, заключающаяся в том, что если провести компьютерное моделирование спиновой волны в структурах спинтроники, то можно прогнозировать физические свойства спинтронных устройств для хранения, передачи и обработки цифровой информации, подтверждена полностью.

Результаты исследования могут быть использованы при разработке энергоэффективных устройств памяти нового поколения и логических элементов для применения в суперкомпьютерах.

Список использованных источников

1. Flatte Michael E. Spintronics // IEEE transactions on electron devices. — 2007. — may. — Vol. 54, no. 5. — P. 907–920. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/ted.2007.894376>.

2. Fetisov Yuri V., Sigov Alexander S. Spintronics: physical foundations and devices // Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies. — 2018. — dec. — Vol. 10, no. 3. — P. 343–356. — URL: <http://dx.doi.org/10.17725/RENSIT.2018.10.343>.
3. Spin-switching effect and giant magnetoresistance in quantum structure of monolayer MoS₂ nanoribbons with ferromagnetic electrode / Ming-Mei Zhang [et al.] // Acta Physica Sinica. — 2023. — Vol. 72, no. 15. — P. 157202. — URL: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.72.20230483>.
4. Physical properties of vacancy-ordered double perovskites K₂TcZ₆ (Z = Cl, Br) for spintronics applications: DFT calculations / Huda A. Alburaih [et al.] // RSC Advances. — 2024. — Vol. 14, no. 3. — P. 1822–1832. — URL: <http://dx.doi.org/10.1039/d3ra07603b>.
5. Chen Xia, Mi Wenbo. Mechanically tunable magnetic and electronic transport properties of flexible magnetic films and their heterostructures for spintronics // Journal of materials chemistry C. — 2021. — Vol. 9, no. 30. — P. 9400–9430. — URL: <http://dx.doi.org/10.1039/D1TC01989A>.
6. Barla Prashanth, Joshi Vinod Kumar, Bhat Somashekara. Spintronic devices: a promising alternative to CMOS devices // Journal of Computational Electronics. — 2021. — jan. — Vol. 20, no. 2. — P. 805–837. — URL: <http://dx.doi.org/10.1007/S10825-020-01648-6>.
7. Two-dimensional magnetic materials for spintronic devices / Mengjuan Mi [et al.] // Materials today nano. — 2023. — dec. — Vol. 24. — P. 100408. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mtnano.2023.100408>.
8. First-principles studies on physical properties for new half-metallic perovskites AFeO_3 (A = Ca, Sr, Ba): spintronics and energy harvesting applications / Nazia Erum [et al.] // International journal of quantum chemistry. — 2024. — mar. — Vol. 124, no. 5. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/qua.27363>.
9. Volkov Nikita V. Spintronics: manganite-based magnetic tunnel structures // Physics-Uspexhi. — 2012. — mar. — Vol. 55, no. 3. — P. 250–269. — URL: <http://dx.doi.org/10.3367/UFNE.0182.201203B.0263>.
10. Spintronic materials and their properties investigated by synchrotron radiation / Teruo Ono [et al.] // Vacuum and surface science. — 2022. — may. — Vol. 65, no. 5. — P. 218–223. — URL: <http://dx.doi.org/10.1380/vss.65.218>.
11. Telegin Andrei, Sukhorukov Yurii. Magnetic semiconductors as materials for spintronics // Magnetochemistry. — 2022. — nov. — Vol. 8, no. 12. — P. 173. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/magnetochemistry8120173>.
12. Chibueze T. C., Raji A. T., Ezema F. I. Mechanical stability, electronic and magnetic properties of half-Heusler FeCrAs alloy for spintronics application // Current science and technology. — 2021. — sep. — Vol. 1, no. 2. — P. 1–8. — URL: <http://dx.doi.org/10.15282/CST.V1I2.6880>.
13. Hunagund Shivakumar. Spintronics system: spin polarization and optical characterization // Principles and applications of quantum computing using essential math. — IGI Global, 2023. — sep. — P. 37–53. — ISBN: 9781668475379. — URL: <http://dx.doi.org/10.4018/978-1-6684-7535-5.ch003>.

14. Tian Yufeng, Bakaul Saidur Rahman, Wu Tom. Oxide nanowires for spintronics: materials and devices // *Nanoscale*. — 2012. — Vol. 4, no. 5. — P. 1529. — URL: <http://dx.doi.org/10.1039/C2NR11767C>.
15. Spintronic physical unclonable functions based on field-free spin-orbit-torque switching / Soogil Lee [et al.] // *Advanced materials*. — 2022. — oct. — Vol. 34, no. 45. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/adma.202203558>.
16. Matsukura F., Chiba D., Ohno H. Spintronic properties of ferromagnetic semiconductors // *A treatise*. — Elsevier, 2008. — P. 207–240. — URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0080-8784\(08\)00005-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0080-8784(08)00005-7).
17. Straintronics: strain-switched multiferroic nanomagnets for extremely low energy logic/memory / H. Ahmad [et al.] // 2015 IEEE Nanotechnology materials and devices conference (NMDC). — IEEE, 2015. — sep. — P. 1–3. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/NMDC.2015.7439253>.
18. Straintronics beyond homogeneous deformation / R. Gupta [et al.] // *Physical Review B*. — 2019. — mar. — Vol. 99, no. 12. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.99.125407>.
19. Magneto-straintronics on a Co-coordinating metalloboronfullerene / Jing Liu [et al.] // *Physical Review B*. — 2020. — jul. — Vol. 102, no. 2. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.102.024416>.
20. Abeer Md Ahsanul, Drobitch Justine L., Bandyopadhyay Supriyo. Microwave oscillator based on a single straintronic magnetotunneling junction // *Physical Review Applied*. — 2019. — may. — Vol. 11, no. 5. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.11.054069>.
21. Towards ultraefficient nanoscale straintronic microwave devices / Mike Jaris [et al.] // *Physical Review B*. — 2020. — jun. — Vol. 101, no. 21. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.101.214421>.

Сведения об авторах:

Константин Константинович Алтунин — кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики и технических дисциплин ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: kostya_altunin@mail.ru

ORCID iD  0000-0002-0725-9416

Web of Science ResearcherID  I-5739-2014

SCOPUS ID  57201126207

IstinaResearcherID  66185348

Original article
PACS 75.30.Ds
OCIS 350.4238
MSC 82D45

Modeling the physical properties of spintronic structures

K. K. Altunin 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted July 12, 2025
Resubmitted July 14, 2025
Published September 30, 2025

Abstract. The problem of spin wave propagation in a spintronic structure is considered. The work is aimed at actively investigating the spin degree of freedom in solid-state spintronic structures. The spin wave, which is a magnetization wave in magnetically ordered substances, was investigated. A theoretical model based on the Bloch equation allows one to describe the physical process of spin wave propagation in spintronic and staintronic structures. It is shown that the developed computer program enables the numerical solution of a system of Bloch equations to describe spin wave dynamics in spintronic structures. Plots of the average spin in spintronic structures as a function of time are obtained.

Keywords: spin wave, spintronics, spin, Bloch equations, modeling, numerical calculations

References

1. Flatte Michael E. Spintronics // IEEE transactions on electron devices. — 2007. — may. — Vol. 54, no. 5. — P. 907–920. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/ted.2007.894376>.
2. Fetisov Yuri V., Sigov Alexander S. Spintronics: physical foundations and devices // Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies. — 2018. — dec. — Vol. 10, no. 3. — P. 343–356. — URL: <http://dx.doi.org/10.17725/RENSIT.2018.10.343>.
3. Spin-switching effect and giant magnetoresistance in quantum structure of monolayer MoS₂ nanoribbons with ferromagnetic electrode / Ming-Mei Zhang [et al.] // Acta Physica Sinica. — 2023. — Vol. 72, no. 15. — P. 157202. — URL: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.72.20230483>.
4. Physical properties of vacancy-ordered double perovskites K₂TcZ₆ (Z = Cl, Br) for spintronics applications: DFT calculations / Huda A. Alburaih [et al.] // RSC Advances. — 2024. — Vol. 14, no. 3. — P. 1822–1832. — URL: <http://dx.doi.org/10.1039/d3ra07603b>.
5. Chen Xia, Mi Wenbo. Mechanically tunable magnetic and electronic transport properties of flexible magnetic films and their heterostructures for spintronics // Journal of materials chemistry C. — 2021. — Vol. 9, no. 30. — P. 9400–9430. — URL: <http://dx.doi.org/10.1039/D1TC01989A>.

6. Barla Prashanth, Joshi Vinod Kumar, Bhat Somashekara. Spintronic devices: a promising alternative to CMOS devices // *Journal of Computational Electronics*. — 2021. — jan. — Vol. 20, no. 2. — P. 805–837. — URL: <http://dx.doi.org/10.1007/S10825-020-01648-6>.
7. Two-dimensional magnetic materials for spintronic devices / Mengjuan Mi [et al.] // *Materials today nano*. — 2023. — dec. — Vol. 24. — P. 100408. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mtnano.2023.100408>.
8. First-principles studies on physical properties for new half-metallic perovskites $A\text{FeO}_3$ ($A = \text{Ca, Sr, Ba}$): spintronics and energy harvesting applications / Nazia Erum [et al.] // *International journal of quantum chemistry*. — 2024. — mar. — Vol. 124, no. 5. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/qua.27363>.
9. Volkov Nikita V. Spintronics: manganite-based magnetic tunnel structures // *Physics-Uspekhi*. — 2012. — mar. — Vol. 55, no. 3. — P. 250–269. — URL: <http://dx.doi.org/10.3367/UFNE.0182.201203B.0263>.
10. Spintronic materials and their properties investigated by synchrotron radiation / Teruo Ono [et al.] // *Vacuum and surface science*. — 2022. — may. — Vol. 65, no. 5. — P. 218–223. — URL: <http://dx.doi.org/10.1380/vss.65.218>.
11. Telegin Andrei, Sukhorukov Yurii. Magnetic semiconductors as materials for spintronics // *Magnetochemistry*. — 2022. — nov. — Vol. 8, no. 12. — P. 173. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/magnetochemistry8120173>.
12. Chibueze T. C., Raji A. T., Ezema F. I. Mechanical stability, electronic and magnetic properties of half-Heusler FeCrAs alloy for spintronics application // *Current science and technology*. — 2021. — sep. — Vol. 1, no. 2. — P. 1–8. — URL: <http://dx.doi.org/10.15282/CST.V1I2.6880>.
13. Hunagund Shivakumar. Spintronics system: spin polarization and optical characterization // *Principles and applications of quantum computing using essential math*. — IGI Global, 2023. — sep. — P. 37–53. — ISBN: 9781668475379. — URL: <http://dx.doi.org/10.4018/978-1-6684-7535-5.ch003>.
14. Tian Yufeng, Bakaul Saidur Rahman, Wu Tom. Oxide nanowires for spintronics: materials and devices // *Nanoscale*. — 2012. — Vol. 4, no. 5. — P. 1529. — URL: <http://dx.doi.org/10.1039/C2NR11767C>.
15. Spintronic physical unclonable functions based on field-free spin-orbit-torque switching / Soogil Lee [et al.] // *Advanced materials*. — 2022. — oct. — Vol. 34, no. 45. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/adma.202203558>.
16. Matsukura F., Chiba D., Ohno H. Spintronic properties of ferromagnetic semiconductors // *A treatise*. — Elsevier, 2008. — P. 207–240. — URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0080-8784\(08\)00005-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0080-8784(08)00005-7).
17. Straintronics: strain-switched multiferroic nanomagnets for extremely low energy logic/memory / H. Ahmad [et al.] // *2015 IEEE Nanotechnology materials and devices conference (NMDC)*. — IEEE, 2015. — sep. — P. 1–3. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/NMDC.2015.7439253>.

18. Straintronics beyond homogeneous deformation / R. Gupta [et al.] // Physical Review B. — 2019. — mar. — Vol. 99, no. 12. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.99.125407>.
19. Magneto-straintronics on a Co-coordinating metalloboronfullerene / Jing Liu [et al.] // Physical Review B. — 2020. — jul. — Vol. 102, no. 2. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.102.024416>.
20. Abeer Md Ahsanul, Drobitch Justine L., Bandyopadhyay Supriyo. Microwave oscillator based on a single straintronic magnetotunneling junction // Physical Review Applied. — 2019. — may. — Vol. 11, no. 5. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.11.054069>.
21. Towards ultraefficient nanoscale straintronic microwave devices / Mike Jaris [et al.] // Physical Review B. — 2020. — jun. — Vol. 101, no. 21. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.101.214421>.

Information about authors:

Konstantin Konstantinovich Altunin — PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics and Technical Disciplines of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Pedagogical University”, Ulyanovsk, Russia.

E-mail: kostya.altunin@mail.ru

ORCID iD  0000-0002-0725-9416

Web of Science ResearcherID  I-5739-2014

SCOPUS ID  57201126207

IstinaResearcherID  66185348