

© И.А. Ясюлевич

Научно-популярное эссе по теме существенного результата:

**«Хиральная спин-орбитроника наногетероструктур на основе  
металлических гелимагнетиков»**

В.В. Устинов, И.А. Ясюлевич, Н.Г. Бебенин, Л.И. Наумова, Р.С. Заборницын,  
М.А. Миляев

**Введение**

Геликоидальные или спиральные магнетики – это магнитно-слоистые магнетики, в которых направления спинов электронов, локализованных на атомах, в отдельных магнитных слоях сонаправлены, а при переходе от одного слоя к другому направления спинов локализованных электронов меняются на постоянный угол по правилу винта (рис. 1). Если при этом мысленно соединить концы спиновых векторов, то получится спираль.

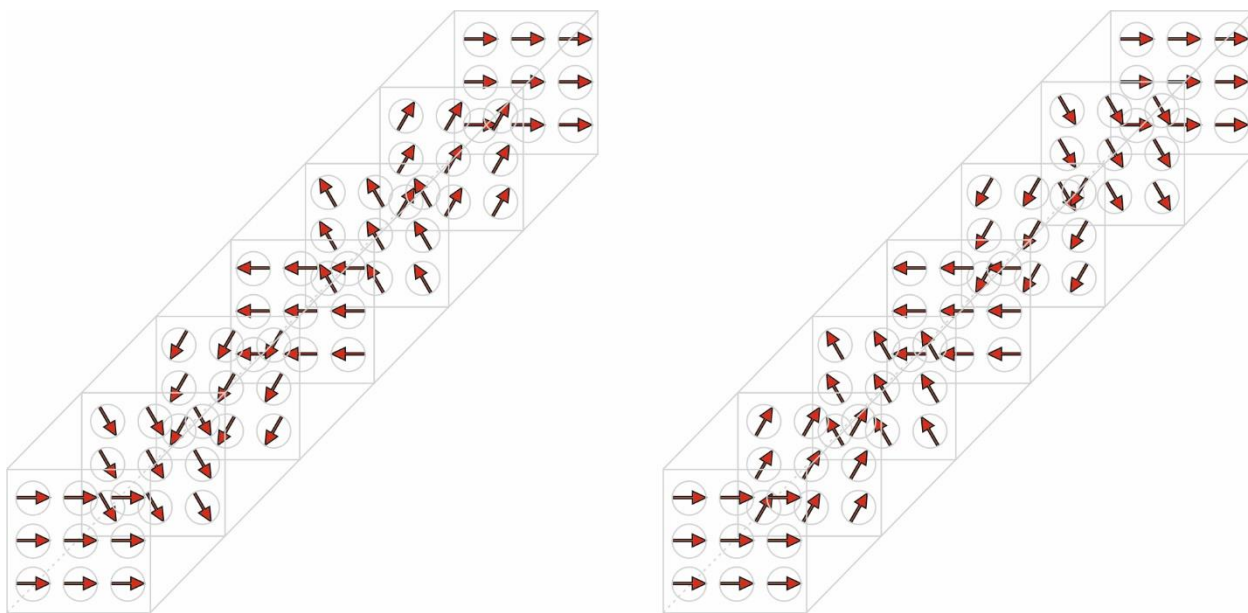


Рис. 1. Схематическое изображение гелимагнетика с правозакрученной и левозакрученной спиралью. Направления стрелок соответствуют направлениям спиновых моментов электронов внутренних оболочек атомов.

Спираль представляет собой хиральный объект, поскольку левозакрученная спираль может быть совмещена с правозакрученной спиралью только с помощью зеркального отражения (рис. 2).

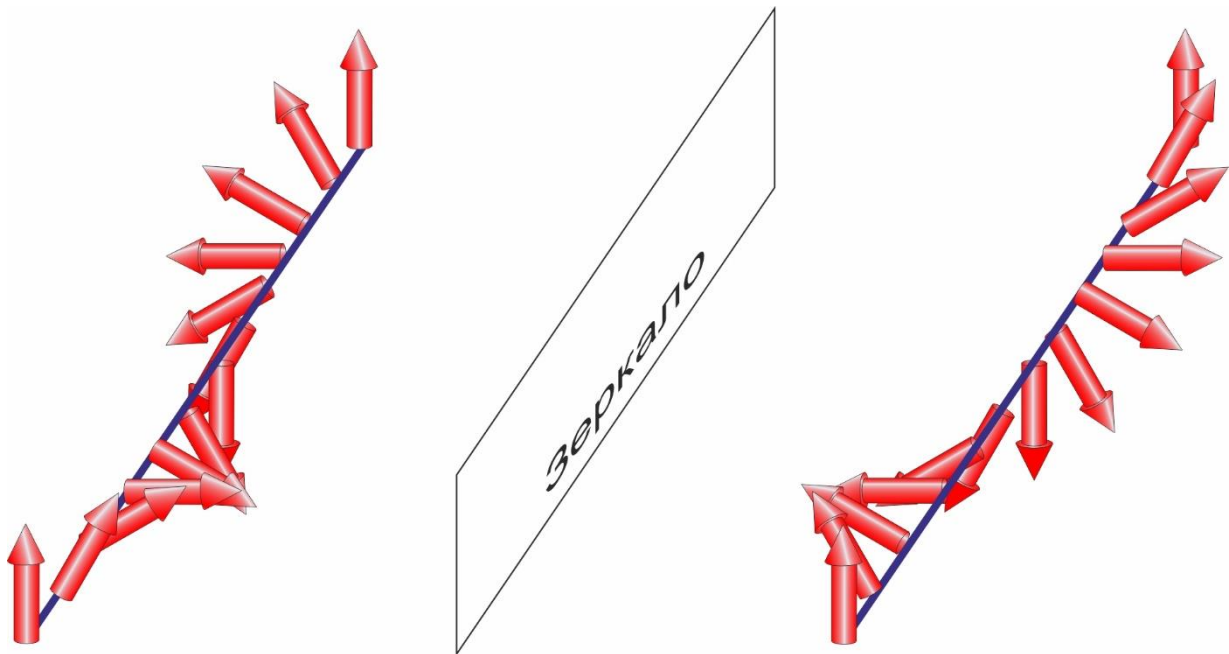


Рис. 2. Демонстрация наличия хиральности у левозакрученной и правозакрученной спиралей, в которые может выстраиваться намагниченность гелимагнетиков.

Электроны проводимости взаимодействуют с локализованными электронами гелимагнетика посредством обменного взаимодействия. Обменное взаимодействие в геликоидальных магнетиках можно рассматривать как действие среднего поля локализованных спинов на спин электронов проводимости, или, другими словами, как внутреннее неоднородное обменное поле  $\mathbf{V}_{in} = \Lambda \mathbf{M}$ , где  $\mathbf{M}$  – намагниченность локализованных электронов,  $\Lambda$  – безразмерный параметр, характеризующий величину  $s-d$  обменного взаимодействия.

Наличие влияния внешнего неоднородного магнитного поля на движение обладающих спином частиц было впервые обнаружено Штерном и Герлахом [1]. Штерн и Герлах экспериментально продемонстрировали, что частицы с различным магнитным моментом  $\boldsymbol{\mu}$  и, следовательно, разным спином, в неоднородном магнитном поле  $\mathbf{V}(\mathbf{r})$  будут отклоняться от изначальной траектории движения в разные стороны из-за действия на них силы  $F_s = \nabla(\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{V}(\mathbf{r}))$  (рис. 3).

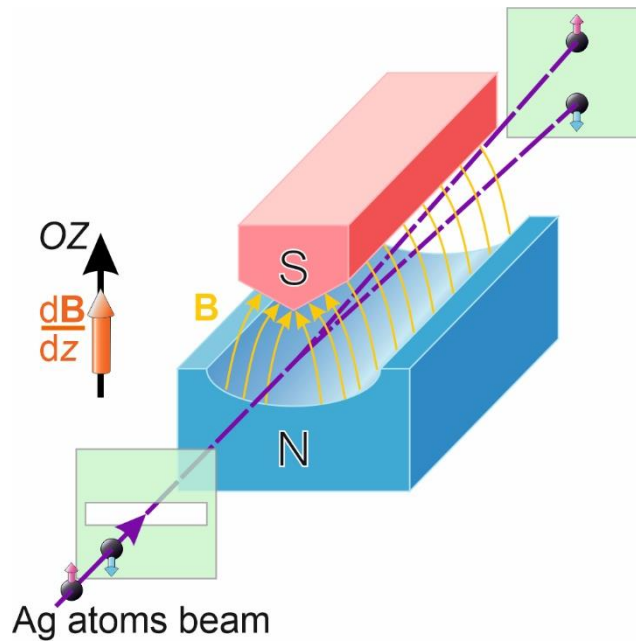


Рис. 3. Схема эксперимента Штерна и Герлаха. Розовая и голубая стрелки показывают направление магнитного момента  $\mu$  атомов серебра.

Естественно предположить, что движение обладающих спином электронов проводимости в проводящем твёрдом теле, помещённом в неоднородное внешнее магнитное поле, будет управляться теми же квантовыми эффектами, которые наблюдали Штерн и Герлах. Также можно ожидать, что квантовые спиновые эффекты типа наблюдавшихся в экспериментах Штерна и Герлаха будут определять электрические свойства проводящих магнитных материалов с неоднородным магнитным порядком.

Для построения теории, позволяющей учитывать действие на спин электронов проводимости сил, создаваемых пространственно-неоднородными внешними магнитными полями и/или внутренними полями квантового обменного происхождения, нами было использовано квантовое кинетическое уравнение (рис. 4).

$$\frac{\partial \hat{f}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial \hat{f}}{\partial \mathbf{r}} + \frac{1}{2} \left\{ e\mathbf{E} + \frac{e}{c} [\mathbf{v} \times \mathbf{B}] - \mu \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} (\mathbf{B} + \Lambda \mathbf{M}) \cdot \hat{\boldsymbol{\sigma}}, \frac{\partial \hat{f}}{\partial \mathbf{p}} \right\} + \mu \frac{i}{\hbar} (\mathbf{B} + \Lambda \mathbf{M}) \cdot [\hat{\boldsymbol{\sigma}}, \hat{f}] + \hat{\mathcal{R}} = 0,$$

$\hat{f}(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)$  – квантовая функция распределения,

$\hat{\mathcal{R}}$  – интеграл столкновений,

$\mathbf{v}$  – скорость электрона,

$\mu$  – магнитный момент электрона,

$\hat{\boldsymbol{\sigma}}$  – спиновые матрицы Паули,

$[\hat{a}, \hat{b}] = \hat{a}\hat{b} - \hat{b}\hat{a}$  – коммутатор операторов  $\hat{a}$  и  $\hat{b}$ ,

$\{\hat{a}, \hat{b}\} = \hat{a}\hat{b} + \hat{b}\hat{a}$  – антикоммутатор операторов  $\hat{a}$  и  $\hat{b}$ .

Рис. 4. Квантовое кинетическое уравнение для квантовой функции распределения.

Будучи квантовым обобщением хорошо известного и повсеместно применяемого уравнения Больцмана на случай наличия у носителей заряда спинового момента, квантовое кинетическое уравнение для квантовой функции распределения является, возможно, наиболее простым и эффективным теоретическим инструментом для изучения транспорта заряда и спина в условиях, когда орбитальное движение электронов может быть рассмотрено на языке классической механики.

В фигурной скобке в левой части квантового кинетического уравнения первые два слагаемых – это хорошо известная в классической физике сила Лоренца, действующая на электроны проводимости со стороны электрического и магнитного полей ( $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$ ). Третье слагаемое можно трактовать как квантовую добавку к классической силе Лоренца, возникающую в неоднородном эффективном магнитном поле ( $\mathbf{B} + \Lambda \mathbf{M}$ ) в силу наличия у электрона спина. Именно действие такой спин-движущей силы квантовой природы, действующей на обладающие спином частицы в неоднородном внешнем магнитном поле  $\mathbf{B}$ , было обнаружено в опытах Штерна-Герлаха [1].

Из квантового кинетического уравнения была получена система уравнений для плотностей (плотность электронов и спиновая плотность) и потоков (поток электронов и спиновый ток), пригодная для описания гальваномагнитных явлений в металлах и полупроводниках, обусловленных наличием электрического заряда и спинового момента у электронов проводимости, включая

как известные эффекты – магнетосопротивление, эффект Холла и спиновый эффект Холла, так и не описанные ранее эффекты, обусловленные неоднородностями внешнего магнитного поля и/или внутренних полей обменного происхождения [2,3].

### **Исследование влияния гелимагнетизма на зарядовый ток**

Используя полученную систему уравнений для плотностей и потоков, было продемонстрировано, что действие на электроны проводимости, несущие на себе спин, неоднородного в пространстве обменного поля приводит к возникновению в гелимагнетиках следующих спин-транспортных эффектов [4]:

Электрический магнитохиральный эффект Штерна-Герлаха (ЭМКЭШГ) – это эффект зависимости электросопротивления вдоль оси спирали намагниченности гелимагнетика от его хиральности и взаимной ориентации магнитного поля и электрического тока;

Кинетический магнитоэлектрический эффект Штерна-Герлаха (КМЭЭШГ) – это эффект возникновения неравновесной намагниченности у электронов проводимости вдоль оси спирали, пропорциональной приложенному току, направление которой зависит от хиральности гелимагнетика.

Предсказано новое физическое явление – резонансное усиление ЭМКЭШГ и КМЭЭШГ до гигантских величин, получившее название «магнито-хиральный кинетический резонанс» (МХКР). Явление МХКР реализуется, если спин электронов, движущихся вдоль оси геликоида, прецессирует синхронно с изменением направления обменного поля. Определены условия экспериментального наблюдения МХКР.

### **Исследование влияния зарядового тока на гелимагнетизм**

Для облегчения понимания того, как электрический ток влияет на намагниченность хиральных гелимагнетиков, хотелось бы освежить в памяти читателя некоторые известные механические аналогии рассматриваемых далее магнитных явлений.

Первая из них – это винт Архимеда, изобретённое Архимедом в III веке до н.э. механическое устройство для перемещения воды с помощью вращающегося спиралевидного винта. Вращение винта Архимеда заставляет воду двигаться вдоль своей оси. Отсюда совершенно очевидно, что такой винт начинает вращаться при протекании по нему воды.

Вторая аналогия – ветряной двигатель. Это устройство для преобразования кинетической энергии ветрового потока в механическую энергию вращения ротора. Ветряные мельницы – исторически первая реализация идеи преобразования линейного движения воздуха во вращательное движение лопастей и ротора мельницы. Первые письменные упоминания о ветряной мельнице как о техническом устройстве, принадлежащие греку Герону Александрийскому, относятся к первому столетию нашей эры. Ключевым аспектом работы как водяного винта Архимеда, так и ветряной турбины Герона является взаимодействие потока частиц с телом особой винтовой формы хиральной симметрии.

Возвращаясь к задаче о спиновом транспорте электронов проводимости в проводящем хиральном гелимагнетике, мы можем провести аналогию между обычным атмосферным ветром, обдувающим крылья ветряной мельницы, и потоком спинового момента электронов проводимости, передающих свой вращательный момент в систему спиновых моментов электронов гелимагнетика, локализованных в узлах кристаллической решётки. Имея в виду эту аналогию, мы будем использовать термин «спиновый ветер» как поэтический образ известного и более прозаического термина «спиновый ток».

Основываясь на вышеописанных механических аналогиях, мы можем ожидать, что спиновый ветер, «дующий» в хиральном гелимагнетике, будет при определенных условиях приводить к вращению всей магнитной системы гелимагнетика, также как обычный ветер вращает лопасти воздушного винта.

Для описания влияния электрического тока на намагниченность гелимагнетика система уравнений для плотностей и потоков была дополнена уравнением Ландау-Лифшица-Гильберта и уравнениями Максвелла. Показано, что передача спинового момента, которая является следствием обменного взаимодействия между электронами проводимости и локализованными спинами, приводит к вращению спирали намагниченности гелимагнетика вокруг её оси под действием протекающего электрического тока [5]. Найдена частота такого вращения намагниченности. Показано, что как направление вращения намагниченности гелимагнетика, так и направление изменения формы магнитной спирали определяются направлением потока электронов и хиральностью гелимагнетика (рис. 5).

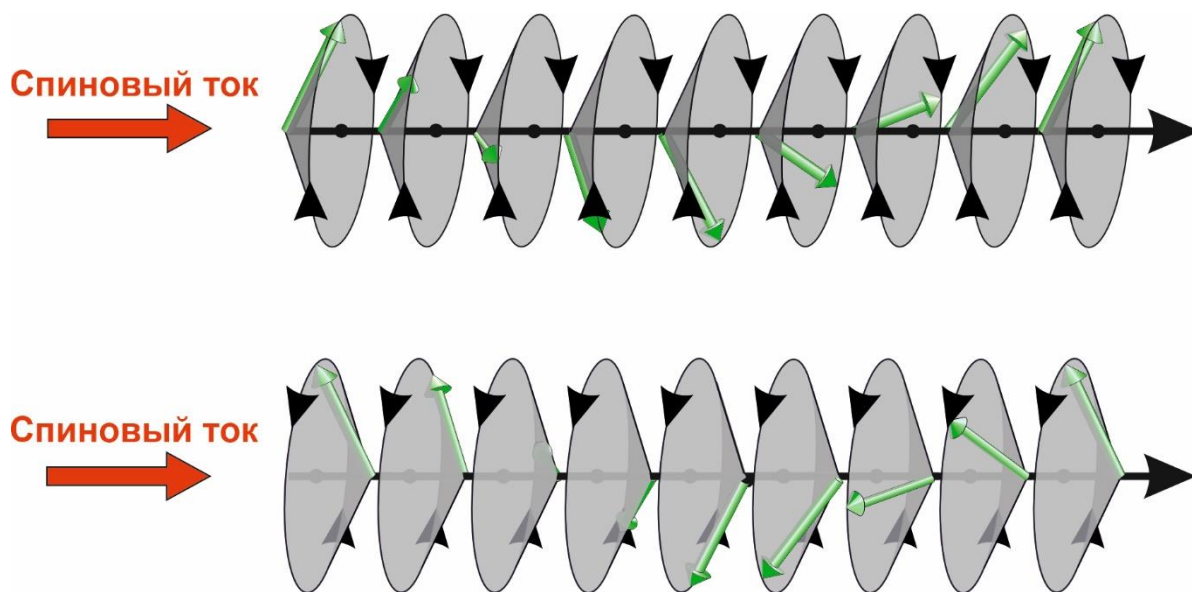


Рис. 5. Схематическое изображение вращения правозакрученной и левозакрученной спиралей намагниченности гелимагнетика под действием спинового тока (или электрического тока).

Таким образом, наша работа демонстрирует, что гелимагнетики сами по себе являются спиновыми устройствами:

Спиновый ветряной двигатель – это спиновое устройство, в котором реализуется эффект преобразования линейного движения электронов проводимости во вращательное движение магнитной спирали гелимагнетика;

Спиновый винт Архимеда – это спиновое устройство, в котором реализуется обратный эффект: вращение магнитной спирали гелимагнетика, созданное внешним электромагнитным полем, может быть преобразовано в постоянный электрический ток.

Описано влияние эффекта передачи спинового момента на электросопротивление проводящих хиральных гелимагнетиков [6]. Установлено, что при возникновении вращения спирали намагниченности под действием протекающего электрического тока электросопротивление гелимагнетика будет всегда меньше, чем сопротивление гелимагнетика, в котором спираль намагниченности неподвижна. Показано, что величина электросопротивления в условиях передачи спинового момента зависит от величины интеграла обменного взаимодействия и от релаксационных характеристик спиновых систем электронов проводимости и локализованных электронов.

## Исследование влияния гелимагнетизма на чисто спиновый ток

Нами был рассмотрен контакт немагнитного металла с сильным спин-орбитальным взаимодействием и гелимагнитного металла, в котором спин-орбитальное взаимодействие пренебрежимо мало. Электрический ток, протекающий параллельно плоскости контакта этих металлов из-за спин-орбитального взаимодействия, будет вызывать в немагнитном металле чисто спиновый ток, который будет инжектироваться в гелимагнетик. Можно ожидать, что поляризация чисто спинового тока, инжектированного в гелимагнетик, будет подстраиваться под направление намагниченности локализованных электронов, а также, что она будет затухать на некоторой характерной длине (рис. 6).

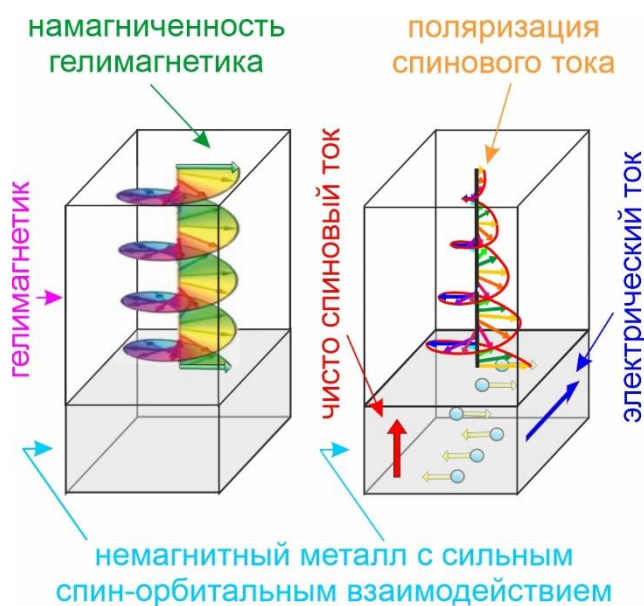


Рис. 6. Пространственное распределение поляризации инжектированного в гелимагнетик чисто спинового тока.

Для описания транспортных явлений в контактирующих проводниках полученная система уравнений для плотностей и потоков была дополнена граничными условиями для спинового тока и потока электронов, позволяющими учесть рассеяние электронов проводимости с переворотом спина на границе раздела проводников.

Описана хиральная спин-орбитроника гетероструктуры немагнитный металл с сильным спин-орбитальным взаимодействием – гелимагнетик [3,7,8]. Найдено пространственное распределение поляризации инжектированного в гелимагнетик спинового тока и определены характерные длины затухания различных компонент вектора поляризации спинового тока. Предсказано существование «эффекта хиральной поляризации чисто спинового тока»,



который заключается в возникновении в гелимагнетике продольно-поляризованного (относительно оси спирали) чисто спинового тока, при инжекции из немагнитного металла поперечно-поляризованного чисто спинового тока.

### **Экспериментальная реализация спиновых устройств, в которых проводящие гелимагнетики используются в качестве функционального компонента**

Нами были синтезированы новые магнитные наногетероструктуры типа «хиральный спиновый клапан» на основе металлических гелимагнетиков гольмия и диспрозия (рис. 7).

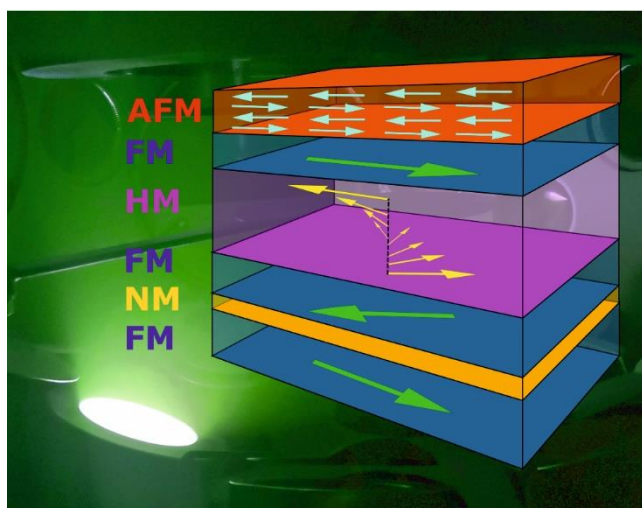


Рис. 7. Схематическое изображение хирального спинового клапана на основе обменно-связанных нанослоев гелимагнетика (HM), ферромагнетиков (FM) и антиферромагнетика (AFM). NM – слой немагнитного металла.

Экспериментально показана возможность управления их магнитотранспортными характеристиками путём вращения магнитной спирали хирального слоя под действием внешнего магнитного поля [9,10,11].

Установлено, что геликоида в слоях гольмия и диспрозия поворачивается магнитным полем как целое. Этот эффект обусловлен нескомпенсированным магнитным моментом, возникающим из-за ограниченных размеров магнитной геликоида.

## **Исследование влияния спин-орбитального взаимодействия на проводимость немагнитных тонких плёнок**

Электрический ток, протекающий в плёнке из-за наличия спин-орбитального взаимодействия, порождает чисто спиновый ток. Этот спиновый ток будет приводить к накоплению неравновесной спиновой плотности разного знака на противоположных поверхностях плёнки. Из-за спиновой диффузии, вызванной неравновесной спиновой плотностью, возникнет чисто спиновый ток вглубь плёнки. В связи с существованием обратного спинового эффекта Холла, чисто спиновый ток, текущий вглубь плёнки, приведёт к возникновению дополнительного электрического тока вблизи граней плёнки. При этом дополнительный электрический ток будет сонаправлен с электрическим током, текущим в глубине плёнки.

При приложении магнитного поля параллельно электрическому току, текущему в плёнке, неравновесная спиновая плотность, накапливаемая вблизи граней плёнки из-за спинового эффекта Холла, начнёт прецессировать в этом магнитном поле. В условиях диффузии и одновременной прецессии в магнитном поле происходит подавление неравновесной спиновой плотности. В результате этого электросопротивление увеличивается и достигает значения электросопротивления материала, в котором наличием спин-орбитального взаимодействия можно пренебречь.

Таким образом, в немагнитных тонких плёнках с сильным спин-орбитальным взаимодействием возможно наблюдать продольное магнитосопротивление. Продольное магнитосопротивление, возникающее в тонких плёнках немагнитных металлов из-за наличия спин-орбитального взаимодействия, получило название «магнитосопротивление Ханле».

Для описания спиновых и зарядовых токов в тонких плёнках немагнитных металлов с сильным спин-орбитальным взаимодействием система уравнений для плотностей и потоков была дополнена граничными условиями, позволяющими учесть рассеяние электронов проводимости с переворотом спина на поверхностях плёнки.

В результате была построена теория обусловленных спин-орбитальным взаимодействием размерных эффектов в магнитосопротивлении тонких плёнок нормальных металлов, учитывающая поверхностное рассеяние электронов проводимости с переворотом спина [12].

Нами были проведены экспериментальные исследования размерных эффектов в магнитосопротивлении тонких плёнок  $\beta$ -тантала, полученных методом магнетронного распыления (рис. 8).

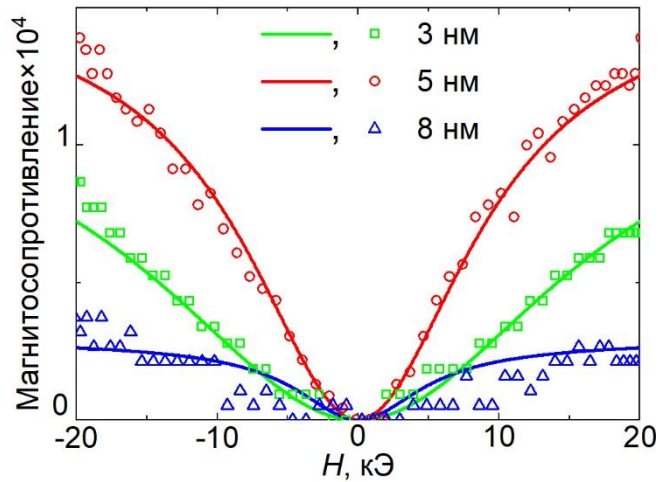


Рис. 8. Полевые зависимости магнитосопротивления Ханле для плёнок  $\beta$ -тантала различной толщины. Теория (линии) и эксперимент (точки). Воспроизведено из [12].

На основе анализа экспериментальных данных в рамках построенной теории сделаны оценки длины спиновой диффузии, времени спиновой релаксации и спинового угла Холла для тонких плёнок  $\beta$ -тантала.

**Исследование магнитотранспортных свойств наноструктур на основе нанослоёв тантала и гелимагнетика диспрозия различной толщины.**

Экспериментально исследовано магнитосопротивление наноструктур тантал/диспрозий/тантал с различной толщиной слоя диспрозия (рис. 9) [13].

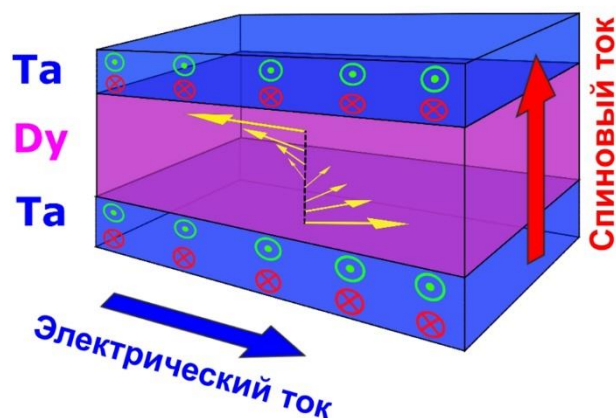


Рис. 9. Схематичное изображение наноструктуры тантал/диспрозий/тантал. Значками  $\otimes$  и  $\odot$  указано направление индуцируемой в слоях тантала неравновесной спиновой плотности.

Обнаружено, что магнитосопротивление наноструктуры Ta/Dy/Ta обусловлено следующими конкурирующими механизмами: магнитным фазовым переходом в диспрозии, спиновой аккумуляцией на границах слоя тантала и перераспределением тока между слоями диспрозия и тантала.

## Заключение

Построена теория электронных транспортных явлений, лежащих в основе «хиральной спин-орбитроники» – новейшей перспективнейшей ветви спинтроники.

Предсказано существование эффекта «хиральной поляризации чисто спинового тока» при его инжекции из немагнитного металла в гелимагнетик, управляемой спин-орбитальным взаимодействием.

Исследованы размерные спин-транспортные эффекты в новых наногетероструктурах на основе гелимагнетиков и металлов с сильной спин-орбитальной связью.

## Литература

1. Der experimentelle Nachweis der Richtungsquantelung im Magnetfeld / W. Gerlach, O. Stern // Z. Phys., 1922, **9**, 349.
2. Электронный спиновый ток и спин-зависимые гальваномагнитные явления в металлах / В. В. Устинов, И. А. Ясюлевич // ФММ, 2020, **121**, 257.
3. Playing pure spin current in helimagnets: toward chiral spin-orbitronics / V.V. Ustinov, I.A. Yasyulevich, N.G. Bebenin // Phys. Met. Metallogr., 2023, **124**, принято к печати.
4. Electrical magnetochiral effect and kinetic magnetoelectric effect induced by chiral exchange field in helical magnetics / V.V. Ustinov, I.A. Yasyulevich // PRB, 2020, **102**, 134431.
5. Chirality-dependent spin-transfer torque and current-induced spin rotation in helimagnets / V.V. Ustinov, I.A. Yasyulevich // PRB, 2022, **106**, 64417.
6. Передача спинового момента и нелинейный квантовый электронный транспорт в хиральных гелимагнетиках / В.В. Устинов, И.А. Ясюлевич // ЖЭТФ, 2023, **164**, 491.

7. Хиральная спин-орбитроника гетероперехода гелимагнетик-нормальный металл / В.В. Устинов, И.А. Ясюлевич, Н.Г. Бебенин // ФММ, 2023, **124**, 204.
8. Инжекция чисто спинового тока в гелимагнетик / И.А. Ясюлевич, Н.Г. Бебенин, В.В. Устинов // ЖЭТФ, 2023, **163**, 574.
9. Mobility of magnetic helicoid in holmium nano-layer / R.S. Zavornitsyn, L.I. Naumova, M.A. Milyaev, M.V. Makarova, V.V. Proglyado, I.K. Maksimova, V.V. Ustinov // Current Applied Physics, 2020, **20**, 1328.
10. Неколлинеарное магнитное упорядочение в слое диспрозия и магнитотранспортные свойства спинового клапана, содержащего структуру CoFe/Dy/CoFe / Р.С. Заворницын, Л.И. Наумова, М.А. Миляев, М.В. Макарова, Т.П. Криницина, В.В. Проглядо, В.В. Устинов // ФММ, 2020, **121**, 688.
11. Спиновые клапаны как инструмент изучения геликоидального магнетизма / В.В. Устинов, М.А. Миляев, Л.И. Наумова, Р.С. Заворницын, Т.П. Криницина, В.В. Проглядо // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2021, **12**, 26.
12. Размерные эффекты в магнитосопротивлении нанослоев тантала со спин-орбитальным взаимодействием / В.В. Устинов, Л.И. Наумова, Р.С. Заворницын, И.А. Ясюлевич, И.К. Максимова, Т.П. Криницина, А.Ю. Павлова, В.В. Проглядо, М.А. Миляев // ЖЭТФ, 2024, **165**, принято к печати.
13. Longitudinal magnetoresistance of Ta/Dy/Ta nanostructures / L.I. Naumova, N.G. Bebenin, R.S. Zavornitsyn, M.A. Milyaev, I.K. Maksimova, V.V. Proglyado, V.V. Ustinov // Phys. Met. Metallogr., 2023, **124**, принято к печати.