

Моргунов Роман Борисович, Бахметьев М.В.

**Управление спиновым рассеянием с помощью спейсерных слоев в
гетероструктурах NiFe/Спейсер/IrMn**

Получен значимый научный результат, направленный на развитие физики и инженерии спинтронных гетероструктур на основе ферро- и антиферромагнитных материалов. В рамках проведенного исследования экспериментально продемонстрирована возможность управляемого переноса области спин-зависимого рассеяния и спин-зарядового преобразования между слоями многослойной структуры за счет выбора материала и толщины немагнитного спейсерного слоя. Данный результат открывает новые возможности для целенаправленного проектирования спинтронных устройств с заданными характеристиками спин-орбитального взаимодействия.

Актуальность полученного результата обусловлена интенсивным развитием антиферромагнитной спинтроники, ориентированной на создание быстродействующих и энергоэффективных элементов обработки информации. В антиферромагнитных материалах управление магнитным состоянием традиционными магнитными полями затруднено, поэтому ключевую роль играют процессы генерации, переноса и преобразования спиновых токов. Особое значение имеет понимание механизмов спин-зависимого рассеяния и условий, при которых преобразование спинового тока в электрический ток реализуется преимущественно в том или ином слое гетероструктуры.

Целью выполненной работы являлось экспериментальное исследование температурной зависимости обратного спинового эффекта Холла в обменно-смещенных гетероструктурах на основе NiFe/IrMn с немагнитными спейсерными слоями Cu и Ta, а также установление роли материала спейсера в формировании механизмов спин-зависимого рассеяния и преобразования спинового тока в зарядовый ток. Для достижения поставленной цели были изготовлены серии многослойных структур Ta/NiFe/Спейсер/IrMn/Ta, где спейсер– Cu или Ta с варьируемой толщиной, и проведены измерения обратного спинового эффекта

Холла, планарного эффекта Холла, а также параметров спиновой диффузии и спин-орбитального взаимодействия в широком температурном интервале.

Ключевым научным результатом является установление качественно различного поведения преобразования спинового тока в зарядовый ток в зависимости от материала спейсерного слоя. Показано, что в структурах NiFe, NiFe/IrMn и NiFe/Cu/IrMn температурная зависимость зарядового тока характеризуется наличием минимума при температуре около 95 К. Этот минимум обусловлен конкуренцией механизмов косоугольного рассеяния (skewscattering) и бокового скачка (sidejump) носителей заряда и является наследуемым свойством ферромагнитного слоя NiFe. Введение медного спейсера между слоями NiFe и IrMn не приводит к смещению положения температурного минимума, что связано с большой длиной спиновой диффузии и слабым спин-орбитальным взаимодействием в Cu. При этом увеличение толщины медного слоя приводит к постепенному уменьшению амплитуды минимума, отражая снижение эффективности передачи спинового тока через спейсер.

Принципиально иное поведение обнаружено в гетероструктурах с танталовым спейсером. Экспериментально показано, что даже при малых эффективных толщинах Ta происходит перенос области доминирующего спин-зависимого рассеяния из слоя NiFe в слой Ta. Это приводит к смещению температурного минимума зарядового тока с ~95 К до ~265 К и к увеличению его амплитуды с ростом толщины танталового слоя. Такой эффект обусловлен сильным спин-орбитальным взаимодействием и короткой длиной спиновой диффузии в Ta, вследствие чего спин-поляризованные носители не достигают антиферромагнитного слоя IrMn, а преобразование спинового тока в зарядовый ток осуществляется преимущественно в танталовом спейсере.

Дополнительные измерения спинового угла Холла и длины спиновой диффузии подтвердили различную физическую роль спейсерных слоев. Для структур с медным спейсером характерны положительные значения спинового угла Холла и эффективная передача спиновой поляризации на расстояниях, ограниченных толщиной слоя. В структурах с танталом наблюдаются отрицательные значения спинового угла Холла и насыщение длины спиновой диффузии на уровне порядка 2 нм, что соответствует известным данным о сильном

спин-орбитальном взаимодействии в Та. Таким образом, материал и толщина спейсера определяют не только эффективность преобразования спинового тока в зарядовый ток, но и локализацию основных процессов спинового рассеяния в гетероструктуре.

Полученный результат имеет важное фундаментальное и прикладное значение. Впервые экспериментально продемонстрирована возможность управляемого выбора слоя, в котором реализуются ключевые процессы спин-зависимого рассеяния и преобразования спинового тока в зарядовый ток, путем инженерии многослойной структуры. Это создает основу для целенаправленного проектирования антиферромагнитных спинтронных устройств, в которых ферромагнитный слой может использоваться исключительно как источник и детектор спиновой поляризации, а функции преобразования и управления токами переносятся в специально подобранные немагнитные или тяжелые металлические слои.

Практическая значимость результата заключается в возможности использования выявленных закономерностей при разработке элементов антиферромагнитной спинтроники, включая сенсоры, логические элементы и устройства управления магнитным состоянием, основанные на спин-орбитальных эффектах. Результаты работы формируют научно-методическую базу для инженерии гетероструктур с заданными характеристиками спинового транспорта и преобразования спинового тока в зарядовый ток.