

## МАГНИТНЫЕ ТУННЕЛЬНЫЕ ПЕРЕХОДЫ НА ОСНОВЕ $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$

<sup>1</sup>Государственное объединение "Научно-практический центр национальной академии наук Беларуси по материаловедению", Минск, Беларусь.

<sup>2</sup>Технический университет Дрездена, Дрезден, Германия.

<sup>3</sup>Белорусский Государственный Университет, Минск, Беларусь.

Перспективными материалами для применения в устройствах спинтроники при комнатной температуре на основе магнитных туннельных переходов являются тонкие пленки ферромолибдата стронция ( $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ , SFMO). Такие устройства являются альтернативой КМОП транзисторам при использовании в энергонезависимой памяти, компараторах, аналого-цифровых преобразователях и магнитных датчиках. Для успешного практического использования таких устройств необходимо решить, в частности, следующие задачи: 1) выбор соответствующего материала туннельного барьера; 2) увеличение значения магнитосопротивления в слабых магнитных полях тонких пленок SFMO. Показано, что 1) в устройствах с магнитными туннельными переходами на основе SFMO предпочтительно использование барьерных материалов с более низкой эффективной электроотрицательностью, чем у SFMO; 2) антифазные границы вдоль оси роста пленок увеличивают значение отрицательного слабополювого магнитосопротивления, так как в отсутствие магнитного поля уменьшается рассеяние носителей заряда.

### Введение

Ферромолибдат стронция ( $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ , SFMO) – двойной перовскит, ферримагнитный полуметалл с практически 100 % спиновой поляризацией, высоким значением температуры Кюри  $T_C = 415$  К, а также обладает слабополювым магнитосопротивлением (СПМС), что позволяет отнести этот материал к перспективным для применения в спинтронике.

Магнитный туннельный переход представляет собой два ферромагнитных или ферримагнитных слоя, разделенных тонким диэлектрическим слоем – туннельным барьером. Направление намагниченности одного из магнитных слоев («закрепленного» слоя) зафиксировано в одном направлении, например, посредством обменного взаимодействия, в то время как направление намагниченности второго магнитного слоя («свободного» слоя) может быть изменено магнитным полем или путем подачи спин-поляризованного тока. В случае, если направления намагниченности обоих слоев параллельны, электроны туннелируют через барьерный слой, и устройство находится в состоянии с низким электросопротивлением. Если направления намагниченности этих слоев направлены антипараллельно, туннелирование практически не происходит (высокоомное состояние), когда спины электронов в одном из состояний (спин-вверх или спин-вниз) преобладают на уровне Ферми.

Таким образом, устройство можно переключать между высокоомным и низкоомным состояниями электросопротивления. Для практического применения подобных устройств следует максимально увеличивать разницу между сопротивлением в этих двух состояниях (иными словами, необходимо стремиться к получению максимальной величины магнитосопротивления в слабых магнитных полях).

### Выбор материала туннельного барьера

Если рассматривать идеальную границу проводник-диэлектрик (без учета поверхностных состояний), перенос заряда осуществляется между двумя слоями путем создания поверхностного диполя, который смещает относительное положение уровня Ферми проводника в соответствии с положениями валентной зоны и зоны проводимости диэлектрика. Величина этого диполя определяется способностью обоих слоев смещать к себе электроны, то есть электроотрицательностью. Шкала электроотрицательности Полинга  $X$  основывается на разнице между действительной и ожидаемой энтальпией создания связей в различных молекулах вида А-В. Для того, чтобы каждому химическому элементу присвоить значение относительной электроотрицательности, самому электроотрицательному элементу, фтору, было

Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

присвоено значение  $X = 4.0$ . Чтобы определить относительную электроотрицательность сложного соединения, состоящего из  $N$  компонентов, используют среднее геометрическое значение электроотрицательности всех  $N$  компонентов [1]:

$$\langle X \rangle = \left( \prod_{i=1}^N X_i \right)^{1/N} \quad (1)$$

Выбор туннельного барьера для создания устройства с магнитным туннельным переходом представляет собой задачу первостепенной важности, так как процесс туннелирования зависит от свойств интерфейса электрод-барьер. Например, степень спиновой поляризации через интерфейс  $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ , осажденного на различные барьерные материалы ( $\text{SrTiO}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{LaAlO}_3$ ) зависит от материала барьера и сильно отличается от величины спиновой поляризации свободной поверхности [2].

Рассчитанные значения эффективной электроотрицательности материалов, которые могут быть использованы в качестве барьеров или электродов для создания устройств на основе магнитного туннельного перехода, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Значения эффективной электроотрицательности ферро- и ферримагнитных материалов

Соединение	Функция	$\langle X \rangle$
Fe	Электрод	1,83
NiFe	Электрод	1,87
Co	Электрод	1,88
MgO	Барьер	2,12
$\text{La}_2\text{O}_3$	Барьер	2,18
$\text{BaTiO}_3$	Барьер	2,24
$\text{SrTiO}_3$	Барьер	2,26
$\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$	Электрод	2,31
$\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$	Электрод	2,31
$\text{LaAlO}_3$	Барьер	2,35
ZnO	Барьер	2,38
$\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$	Электрод	2,38
$\text{Mg}_3\text{B}_2\text{O}_6$	Барьер	2,40
$\text{SrMoO}_3$	Барьер	2,42
$\text{HfO}_2$	Барьер	2,49
$\text{Mn}_2\text{O}_3$	Барьер	2,50
$\text{Al}_2\text{O}_3$	Барьер	2,54
$\text{SrMoO}_4$	Барьер	2,57
$\text{Fe}_3\text{O}_4$	Электрод	2,62
$\text{TiO}_2$	Барьер	2,63
$\text{MnO}_2$	Барьер	2,64
$\text{Ta}_2\text{O}_5$	Барьер	2,71

Смещение электронов к электроду SFMO связано с более высоким значением  $X$  у SFMO относительно величины  $X$  барьера, что может частично скомпенсировать ослабление магнетизма, возникающее из-за магнитного разупорядочения на интерфейсе. Обратное явление происходит, если величина эффективной электроотрицательности барьера выше, чем  $X$  SFMO. Соответственно, для увеличения значения туннельного магнитосопротивления устройства (иными словами, для увеличения разницы электросопротивления между высокоомным и низкоомным состояниями), следует выбирать материал туннельного барьера с меньшим, чем у SFMO, значением  $X$ .

Данные расчеты хорошо согласуются с практикой: значения туннельного магнитосопротивления  $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ , осажденного на барьеры  $\text{SrTiO}_3$ ,  $\text{LaAlO}_3$  и  $\text{TiO}_2$  с Co, используемым как второй электрод, составили 540 %, 301 % и 140 % соответственно [2].

Таким образом, подходящими материалами барьеров для создания устройств на основе магнитных туннельных переходов с SFMO в качестве электрода, являются  $\text{SrTiO}_3$ ,  $\text{La}_2\text{O}_3$  и  $\text{MgO}$ .

### Слабополевое магнитосопротивление.

Для уменьшения стоимости производства устройств на основе магнитных туннельных переходов, следует добиваться наибольшей разницы электросопротивления между высокоомным и низкоомным состояниями при одновременном уменьшении величины внешнего магнитного поля, необходимого для переключения устройства из одного состояния в другое. В 1998 году [3] было обнаружено, что зависимость магнитосопротивления SFMO можно разделить на две части: сильнополевое ( $B > 0,5$  Тл) и слабополевое магнитосопротивление (СПМС,  $B \sim 0,1$  Тл).

Установлено, что СПМС в SFMO наблюдается из-за спин-зависимого туннелирования электронов через границы зерен [4], что также подтверждается фактом, что в монокристаллах SFMO СПМС практически отсутствует [5]. Хотя наличие таких межзеренных границ зависит от условий осаждения тонких пленок, показано, что последующий отжиг пленки в атмосфере чистого Ag при температуре  $\sim 500$  °C на протяжении 5 ч создает эти границы, повышая, тем самым, значение СПМС.

Величина сопротивления тонких пленок SFMO, ориентированных (111) в 2-3 раза ниже, чем сопротивление пленок, ориентированных (100) [6], поэтому далее рассмотрим только пленки, ориентированные (111).

Тонкие пленки SFMO, осажденные методом импульсного лазерного напыления на подложки  $\text{SrTiO}_3$  (111) обладают более высоким СПМС, чем пленки, осажденные на  $\text{SrTiO}_3$  (001) [6]. Это явление, предположительно, объясняется присутствием антифазных доменных границ, которые формируются на неровностях (ступеньках) поверхности подложки.

Показано [6], что наличие такой ступеньки на поверхности подложки благоприятно сказывается на формировании октаэдров  $\text{FeO}_6$ – $\text{FeO}_6$  и отрицательно – на формировании октаэдров  $\text{FeO}_6$ – $\text{MoO}_6$ , иными словами, в таком случае и создаются антифазные границы, которые и повышают СПМС.

Электротранспорт через антифазные границы в тонких пленках SFMO (111) происходит только в присутствии внешнего магнитного поля, когда спины всех зерен направлены по полю [7]. Также показано, температурная зависимость электросопротивления таких пленок схожа с поведением сопротивления монокристаллов SFMO [5], которое описывается уравнением

$$\rho(T) = \rho_0 + R \cdot T^2, \quad (2)$$

где  $\rho_0$  – остаточное электросопротивление,  $R$  – коэффициент, зависящий от механизма рассеяния носителей заряда.

Температурную зависимость электросопротивления (111) пленок можно объяснить тем фактом, что антифазные границы в этом случае формируются по направлению роста пленки

SFMO, что приводит к удержанию носителей заряда в зернах SFMO, из-за чего увеличивается средняя длина их рассеяния. Следовательно, уменьшается значение  $\rho_0$ .

Однако, в случае приложения внешнего магнитного поля, антифазные границы становятся более прозрачными для носителей, соответственно, их средняя длина рассеяния уменьшается, что приводит к дополнительному вкладу в величину СПМС.

### Заключение

Для практического применения устройств спинтроники на основе магнитных туннельных переходов SFMO следует уделить особое внимание выбору материала туннельного барьера, в частности, следует выбирать материал с меньшей эффективной электроотрицательностью, чем у SFMO. Также показано, что для получения более качественных приборов следует использовать подложки с ориентацией (111), которые увеличивают значение магнитосопротивления перехода в слабых полях, приводя к большей разнице между электросопротивлением в высоко- и низкоомном режимах работы.

### Список литературы

1. Nethercot A. H. Prediction of Fermi energies and photoelectric thresholds based on electronegativity concepts // *Phys. Rev. Lett.* – 1974. – Vol. 33, No. 18. P. 1088–1091.
2. Garcia V., Bibes M., Barthélémy A., Bowen M., Jacquet E., Contour J.-P., Fert A. Temperature dependence of the interfacial spin polarization of  $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$  // *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.* – 2004. – Vol. 69, No. 5. P. 052403.
3. Kobayashi K.-I., Kimura T., Sawada H., Terakura K., Tokura Y. Room-temperature magnetoresistance in an oxide material with an ordered double-perovskite structure // *Nature* – 1998. – Vol. 395, No. 6703. P. 677–680.
4. Niebieskikwiat D., Caneiro A., Sánchez R. D., Fontcuberta J. Oxygen-induced grain boundary effects on magnetotransport properties of  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$  // *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.* – 2001. – Vol. 64, No. 18. P. 180406(R).
5. Tomioka Y., Okuda T., Okimoto Y., Kumai R., Kobayashi K.-I., Tokura Y. Magnetic and electronic properties of a single crystal of ordered double perovskite // *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.* – 2000. – Vol. 61, No. 1. P. 422–427.
6. Manako T., Izumi M., Konishi Y., Kobayashi K.-I. Epitaxial thin films of ordered double perovskite  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$  // *Appl. Phys. Lett.* – 1999. – Vol. 74, No. 15. P. 2215–2217.
7. Suchanek G., Artiukh E. Magnetoresistance of Antiphase Boundaries in  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$  // *Phys. Status Solidi Basic Res.* – 2022. – Vol. 259, No. 8. P. 2100353.