

УДК 537.624, 537.622.4, 53.087.92

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СИНТЕТИЧЕСКИХ АНТИФЕРРОМАГНИТНЫХ СТРУКТУР В УСТРОЙСТВАХ СПИНТРОНИКИ

Д.В. Васильев

Научно-производственный комплекс «Технологический центр»
Россия, 124498, Зеленоград, площадь Шокина, дом 1
E-mail: D.Vasilyev@tcen.ru

В.В. Амеличев

Научно-производственный комплекс «Технологический центр»
Россия, 124498, Зеленоград, площадь Шокина, дом 1
E-mail: avv@tcen.ru

Ю.В. Казаков

Научно-производственный комплекс «Технологический центр»
Россия, 124498, Зеленоград, площадь Шокина, дом 1
E-mail: j.kazakov@tcen.ru

Д.В. Костюк

Научно-производственный комплекс «Технологический центр»
Россия, 124498, Зеленоград, площадь Шокина, дом 1
E-mail: D.Kostyuk@tcen.ru

Е.Е. Макарова

Научно-производственный комплекс «Технологический центр»
Россия, 124498, Зеленоград, площадь Шокина, дом 1
E-mail: makarova@tcen.ru

П.А. Поляков

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Россия, 124498, 119991, Москва, Ленинские горы, 1
E-mail: polyakovpa@mail.ru

С.И. Касаткин

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: kasatkin14@mail.ru

Е.П. Орлов

Научно-производственный комплекс «Технологический центр»
Россия, 124498, Зеленоград, площадь Шокина, дом 1
E-mail: E.Orlov@tcen.ru

Ключевые слова: информационно-управляющая система, преобразователь магнитного поля, магниторезистивная память, спин-туннельная магниторезистивная наноструктура, синтетический антиферромагнетик, петля перемагничивания.

Аннотация: Спинтронные устройства на основе спин-туннельных магниторезистивных (СТМР) наноструктур с синтетическим антиферромагнетиком (САФ) обладают высоким потенциалом применения в информационно-управляющих системах, в средствах измерения, преобразования и контроля. Для данных устройств характерно малое энергопотребление, высокая скорость обработки данных, стойкость к внешним воздействующим факторам. Интеграция САФ в состав СТМР наноструктур повышает отношение сигнал/шум, термостабильность изделий. Более того, незначительное изменение толщин пленок в составе САФ позволяет с высокой точностью варьировать магнитные свойства наноструктур и устройств на их основе в целом.

1. Введение

Основными направлениями, в которых устройства спинтроники могут привести значительный вклад в краткосрочной перспективе, являются обработка больших данных, искусственный интеллект, хранение данных для информационно-управляющих систем. К примеру, несмотря на высокую скорость работы, статическая память с произвольным доступом (SRAM) имеет повышенную мощность рассеяния из-за токов утечки при масштабировании КМОП-транзисторов. Каждая ячейка динамической памяти с произвольным доступом (DRAM) имеет свойство разряжаться, поэтому их постоянно необходимо подзаряжать, что увеличивает энергопотребление микросхемы. Магниторезистивная память с произвольным доступом (MRAM) на основе спин-туннельных магниторезистивных (СТМР) наноструктур с синтетическим антиферромагнетиком (САФ) может уверенно преодолеть данные проблемы благодаря энергонезависимости, высокой скорости операций записи/чтения, возможности масштабирования и высокой надежности.

С точки зрения обработки, устройства спинтроники широко исследуются в совершенно новых видах компьютерной архитектуры, такой как «all spin logic» (ASL) и «logic-in-memory» (LIM). LIM-устройства носят гибридный характер: в их основе лежит магнитный туннельный переход (МТП) и КМОП-схема обработки сигналов. Развитие технологии обеспечило возможность формирования МТП на поверхности кремниевой пластины, содержащей КМОП-транзисторы, без ущерба для функциональности схемы. Микросхемы, разработанные на основе LIM-архитектуры, превосходят КМОП-схемы за счет малой мощности рассеяния, энергонезависимости, возможности быстрого считывания, высокой плотности, неограниченного количества циклов записи/чтения [1, 2]. Для обеспечения термостабильности, высокого отношения сигнал/шум в МТП применяются СТМР наноструктуры с САФ, исследование магнитных свойств которых дает необходимую информацию для развития конструктивно-технологического базиса изделий на основе данных наноструктур.

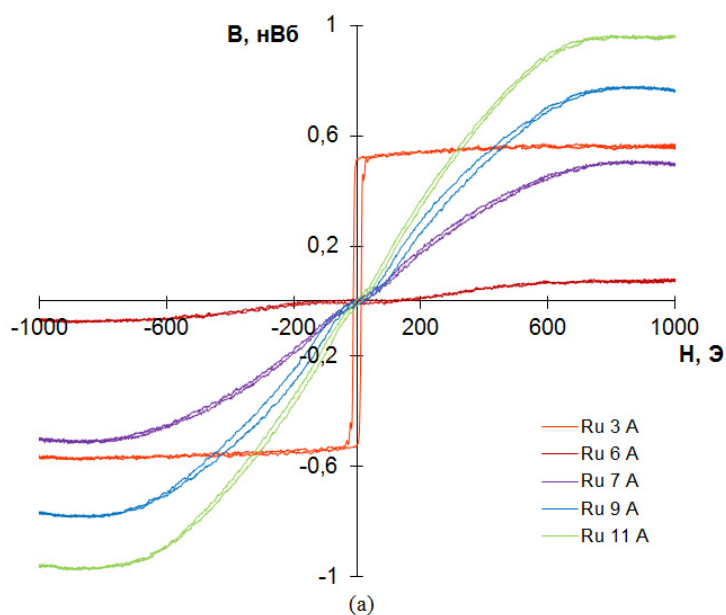
2. Исследование магнитных свойств синтетических антиферромагнитных наноструктур

СТМР наноструктура состоит из двух ферромагнитных (ФМ) слоев, между которыми расположен тонкий барьерный слой. Направление намагниченности одного из ФМ слоев фиксировано антиферромагнетиком, данный слой носит название «фиксированный». Намагниченность второй ФМ пленки изменяется при малых полях, данный слой называют «свободным». Для фиксированного слоя СТМР наноструктуры характерен магнитный момент, воздействующий на свободный слой. С целью минимизации влияния фиксированного слоя на свободный в структуре применяется

САФ, при определенной толщине ферромагнитных слоев они связаны антиферромагнитно и их суммарный магнитный момент близок к нулевому значению.

Как и в обычных антиферромагнетиках, компенсированные САФ имеют практически нулевое поле рассеяния и высокую стабильность. Кроме того, межслойная связь обычно на несколько порядков слабее, чем обменная связь между соседними атомами в антиферромагнетиках, таким образом, манипулирование магнитными свойствами в САФ значительно проще [3].

МТП на основе сплава CoFeB привлекают большой интерес за счет более высокой спиновой поляризации, чем у CoFe. Барьерный слой MgO формируется на аморфном слое CoFeB с высокоориентированной поликристаллической структурой (001), которая выступает в роли затравочного слоя для кристаллизации пленки CoFeB в гранцентрированную кубическую решетку с ориентацией (001) в процессе высокотемпературного отжига. Благодаря когерентному спин-зависимому туннелированию в СТМР наноструктурах на основе CoFeB / MgO / CoFeB наблюдался МР эффект величиной 604 % [4]. АФ слой (IrMn, PtMn) в СТМР структурах связан со слоем CoFe, обеспечивая однонаправленную анизотропию, напыление АФ слоя на аморфной пленке CoFeB не обеспечит требуемую обменную связь из-за разной кристаллической структуры слоев. Исходя из этого, возникает необходимость создавать САФ структуру вида CoFeB / Ru / CoFe. Для исследования магнитных свойств САФ изготовлена структура вида Ta / CoFeB / Ru ($X \text{ \AA}$) / CoFe / Ta, где толщина немагнитной (НМ) пленки Ru изменялась в двух диапазонах: от 3 до 11 \AA и от 18 до 24 \AA (рис. 1).



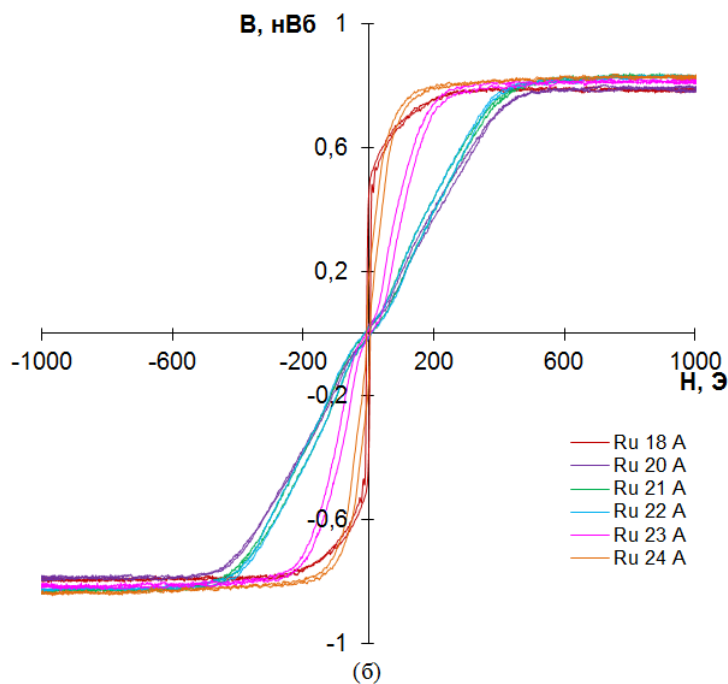


Рис. 1. Петли перемагничивания САФ структуры Ta / CoFeB / Ru / CoFe / Ta с толщиной Ru от 3 до 11 Å (а) и от 18 до 24 Å (б).

При толщине Ru 3 Å для САФ характерно ФМ взаимодействие магнитных слоев, что может быть вызвано малой толщиной НМ пленки: магнитные слои связаны напрямую через проколы в разделительном слое Ru. Отсутствие петель перемагничивания при толщине Ru от 6 Å (рис. 1а) свидетельствует о резком увеличении поля насыщения структуры, в результате чего рабочего диапазона измерительной системы недостаточно для перемагничивания исследуемой структуры. Резкий рост поля насыщения демонстрирует формирование АФ связи между ФМ слоями. Согласно рис. 1б второй АФ максимум ярко выражен и расположен на диапазоне толщин Ru от 19 до 23 Å.

Исследование влияния обменного взаимодействия, создаваемого АФ пленкой IrMn на САФ структуру, осуществлялось с помощью структуры Ta / CoFeB / Ru (X Å) / CoFe / IrMn / Ta. Полученные петли перемагничивания САФ структуры представлены на рис. 2. При воздействии внешнего магнитного поля, направление которого совпадает с направлением фиксации, разрушается только взаимодействие Рудермана – Киттеля – Касуя – Иосиды (РККИ-взаимодействие), при противоположном направлении магнитного поля происходит преодоление обменного смещения и РККИ-взаимодействия слоев, благодаря чему петля перемагничивания имеет асимметричный вид [5].

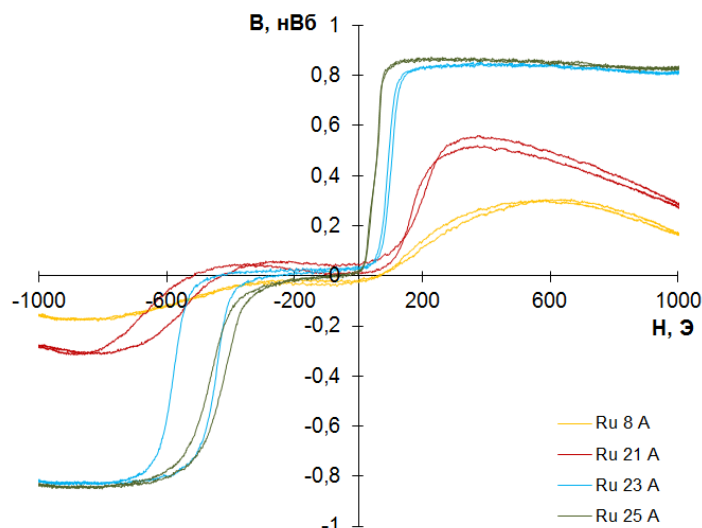


Рис. 2. Петли перемагничивания САФ структуры Ta / CoFeB / Ru / CoFe / IrMn / Ta с различной толщиной Ru.

Максимальное смещение петель перемагничивания характерно для толщин Ru, соответствующих АФ максимуму.

Следующий этап исследований включал в себя изготовление и измерение СТМР наноструктур с САФ вида Ta / CoFe / CoFeB / MgO / CoFeB / Ru ($X \text{ \AA}$) / CoFe / IrMn / Ta, рис. 3 иллюстрирует полученные магнитные характеристики.

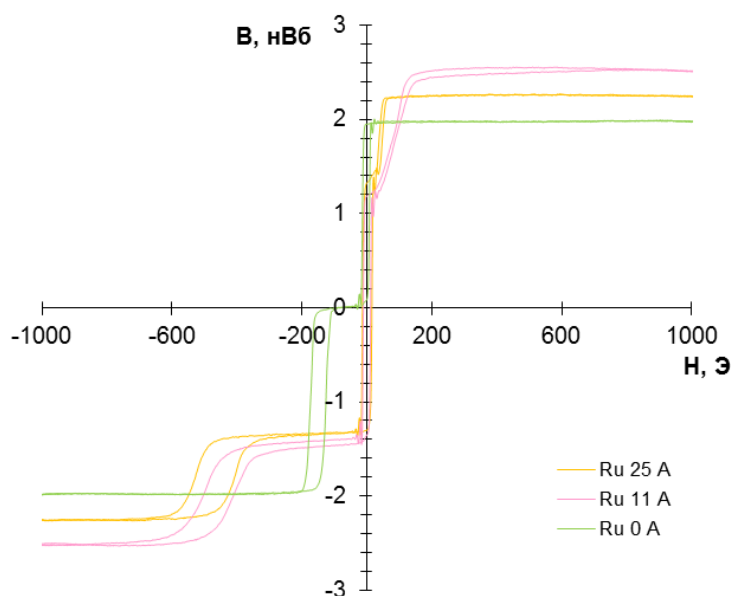


Рис. 3. Петли перемагничивания СТМР структур с САФ Ta / CoFe / CoFeB / MgO / CoFeB / Ru (11 \AA) / CoFe / IrMn / Ta (розовая кривая); Ta / CoFe / CoFeB / MgO / CoFeB / Ru (25 \AA) / CoFe / IrMn / Ta (оранжевая кривая); СТМР структура без САФ Ta / CoFe / CoFeB / MgO / CoFeB / CoFe / IrMn / Ta (светло-зеленая кривая).

Для СТМР наноструктур с САФ характерно наличие трех петель перемагничивания, более высокая энергия обменного взаимодействия.

Полученный результат совпадает с теоретическими и экспериментальными исследованиями в [6], где была изучена СТМР-наноструктура Ta / CuN / Ta / CuN / Ta / PtMn / CoFe / Ru (8,5 Å) / CoFeB / MgO / CoFeB / Ta / CuN / Ru.

3. Заключение

САФ-структура уменьшает магнитостатическое взаимодействие свободного и фиксированного слоев за счет малого магнитного момента структуры ФМ / НМ / ФМ. Взаимодействие между ФМ слоями в САФ носит осциллирующий характер в зависимости от толщины НМ слоя и описывается теорией обменного взаимодействия (РККИ-взаимодействия). Расположение САФ-структуры в МТП, ее состав и толщины пленок существенно влияют на магнитные свойства СТМР наноструктуры, что необходимо учитывать при проектировании устройств спинтроники в составе информационно-управляющих систем.

Показана практическая возможность создания СТМР наноструктур с САФ, на основе которых могут быть изготовлены принципиально новые по электрофизическим характеристикам изделия отечественного производства, включая преобразователи и датчики слабого магнитного поля, микросхемы энергонезависимой памяти и устройства спиновой логики.

Настоящие тезисы подготовлены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках выполнения НИР «Теоретические и экспериментальные исследования спин-туннельных магниторезистивных наноструктур с синтетическим антиферромагнетиком для создания высокочувствительных преобразователей магнитного поля и элементов ячеек энергонезависимой магниторезистивной памяти», шифр FNRМ-2022-0010.

Список литературы

1. Tang J., Shao Q., Upadhyaya P., Amiri P. K., Wang K. L. Electric control of magnetic devices for spintronic computing // Springer International Publishing. 2015. P. 53-112.
2. Verma S., Kulkarni A. A., Kaushik B. K. Spintronics-based devices to circuits: perspectives and challenges // IEEE Nanotechnology Magazine. 2016. Vol. 10, No. 4. P. 13-28.
3. Albisetti E., Scaramuzzi G., Rinaldi C., Cantoni M., Bertacco R., Petti D. Temperature dependence of the magnetic properties of IrMn/CoFeB/Ru/CoFeB exchange biased synthetic antiferromagnets // Materials. 2020. Vol. 13. P. 1-9.
4. Ikeda S., Hayakawa J., Ashizawa Y., Lee Y. M., Miura K., Hasegawa H., Tsunoda M., Matsukura F., Ohno H. Tunnel magnetoresistance of 604% at 300 K by suppression of Ta diffusion in CoFeB / MgO / CoFeB pseudo-spin-valves annealed at high temperature // Applied Physics Letters. 2008. Vol. 93. P. 082508.
5. Васильев Д.В., Костюк Д.В., Казаков Ю.В., Касаткин С.И., Амеличев В.В., Орлов Е.П., Макарова Е.Е. Исследование синтетических антиферромагнитных наноструктур на основе CoFeB / Ru / CoFe // Нано- и микросистемная техника. 2023. Т. 25, № 3. С.119-123.
6. Silva A.V., Leitao D.C., Huo Z., Macedo R.J., Ferreira R., Paz E., Deepak F.L., Cardoso S., Freitas P.P. Switching field variation in MgO magnetic tunnel junction nanopillars: Experimental results and micromagnetic simulations // IEEE Transactions on Magnetism. 2013. Vol. M-49, No. 7. P. 4405-4408.