

УДК 621.377.6.037

ЯЧЕЙКА СПИНОВОЙ ПАМЯТИ НА ЭФФЕКТЕ ТУННЕЛЬНОГО МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЯ

**Т. Н. Сидорова, Д. А. Подрябинкин,
А. И. Костров, А. Л. Данилюк**

Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники, г. Минск

Магниторезистивная энергонезависимая оперативная память является перспективной технологией, обладающей всеми необходимыми преимуществами для того, чтобы стать универсальной, и имеет ряд уникальных особенностей, открывающих широкие рыночные перспективы. К таким свойствам магниторезистивной памяти можно отнести: энергонезависимость, произвольный доступ, высокое число циклов перезаписи (более 10^{16}), радиационную стойкость, скорость чтения/записи соизмерима с оперативными запоминающими устройствами (порядка 10^8 с^{-1}), время хранения данных – более 10 лет, низкие плотности токов переключения [1].

Существует несколько различных конструкций магниторезистивной памяти, которые можно условно разделить на три поколения. Они различаются внутренней структурой и организацией режима записи: переключение магнитным полем, переключение спин-поляризованным током, температурно-индуцированное переключение. Каждое решение характеризуется своими недостатками и преимуществами, но основным критерием является возможность серийного производства, так как магниторезистивная память обладает всеми характеристиками для того, чтобы заменить существующие на рынке типы полупроводниковой памяти (статическая, динамическая, flash). В настоящее время активно ведутся

работы по моделированию и проектированию магниторезистивной памяти третьего поколения на основе структур ферромагнетик/диэлектрик/полупроводник, которые являются наиболее перспективными для производства [2].

В основе магниторезистивной памяти лежит наноструктура, содержащая магнитный туннельный переход, которая состоит из диэлектрического слоя оксида алюминия (AlOx) или магния (MgO) толщиной 1–3 нм, помещенного между двумя ферромагнитными слоями. Каждый из ферромагнитных слоев имеет свое направление намагниченности. Верхний магнитный слой является магнитомягким. Его направление намагниченности может меняться. Магнитный слой основания является магнитотвердым, его направление намагниченности заблокировано и не изменяется. При приложении потенциала к магнитному туннельному переходу в нем возникает ток, который состоит из двух спиновых компонент. В отсутствие рассеяния по спине смешивание их не происходит [3].

При проектировании магниторезистивной памяти, пригодной для серийного производства, возникает проблема, связанная с высокой чувствительностью к случайному перемагничиванию ячеек. Для улучшения параметров ячейки памяти предложена многослойная структура, в которую введены дополнительные материалы (в частности, антиферромагнитный слой), уменьшающие вероятность ложного перемагничивания. Она интегрируется с КМОП структурой. В результате в такой ячейке памяти изменяется проводимость между двумя магнитными структурами ферромагнетик/диэлектрик/полупроводник. Такие ячейки имеют высокую плотность упаковки, невысокие плотности токов переключения (10^5 – 10^6 А/см²), которое осуществляется импульсами тока в шинах записи, возможность интеграции с планарным КМОП технологическим процессом. Переключение ячейки импульсами тока в шинах записи создает магнитное

поле на магнитном туннельном переходе эмиттера. Такой механизм предотвращает ошибочное переключение соседних ячеек памяти [4–7]. Использование полупроводников в магнитном туннельном переходе приводит к уменьшению тока импульса переключения на один/два порядка по сравнению с металлами.

Результаты моделирования позволили оценить отклонение ВАХ реальной структуры от идеализированной. Отклонение (область насыщения) ВАХ связано с омическим падением напряжения на последовательном сопротивлении полупроводника, моделируемого резистором. Из полученных ВАХ следует, что результаты численных расчетов удовлетворительно соответствуют экспериментальным данным в диапазоне изменения напряжения от 0 до 1,5 В.

Получены результаты моделирования ВАХ в статическом режиме для различных значений толщины диэлектрика MgO и проведено их сравнение с экспериментальными данными. Моделирование магнитного туннельного перехода проводилось для трех значений толщины туннельного диэлектрика: 0; 1,5; 2,5 нм. Нулевая толщина соответствует структуре ферромагнетик/полупроводник с барьером Шоттки. Для этого значения также характерна наибольшая величина плотности тока (порядка 10^6 А/м² при напряжении 1 В). С увеличением толщины диэлектрика до 2,5 нм плотность туннельного тока понижается и составляет 10^5 А/м² при напряжении 1 В.

Разработана конструкция ячейки памяти. Основным требованием, предъявляемым к процессу проектирования элементов памяти на эффекте туннельного магнитосопротивления, является совместимость с КМОП технологическим процессом, т. е. возможность интеграции формирования магнитного модуля в технологию. Также должна обеспечиваться возможность масштабирования ячейки памяти с уменьшением характеристических размеров технологии до 10–20 нм

при соответствии электрических характеристик и высокой степени интеграции.

Основу предложенной конструкции ячейки памяти на эффекте туннельного магнитосопротивления, показанной на рис. 1, составляют две интегрированные на кремниевой подложке гетероструктуры ферромагнетик/диэлектрик /полупроводник. Каждый магнитный туннельный переход содержит диэлектрический слой кристаллического оксида магния (MgO) толщиной 1–3 нм, помещенный между слоем ферромагнитного металла (CoFe) и полупроводником – кремнием. Наноразмерные ферромагнитные слои имеют ширину от 10 до 50 нм и отношение длины к ширине от 1:2 до 15:1.

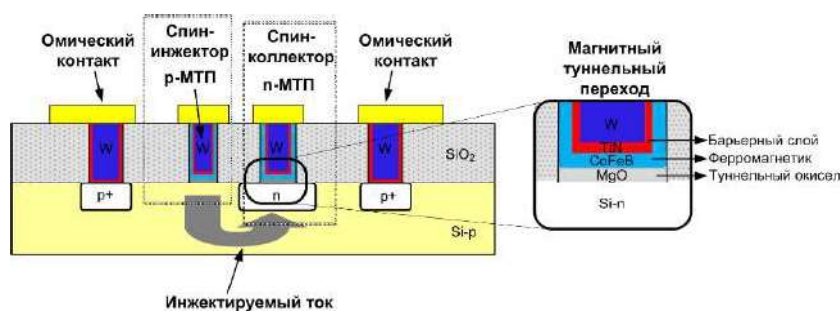


Рис. 1. Ячейка спиновой памяти на основе наноструктуры ферромагнетик/диэлектрик/полупроводник в интегральном исполнении

Один из ферромагнитных слоев может менять направление намагниченности на противоположное. Магнитный слой спин-коллектора (*n*-МТП), сформированного в кармане *n*-типа, является магнитомягким, или свободным. Направление его намагниченности может меняться в зависимости от прикладываемого магнитного поля, создаваемого током в расположенных над ним шинах записи (на рис. 1 шины записи не показаны). Магнитный слой спин-инжектора (*p*-МТП),

сформированного в подложке *p*-типа, является магнитотвердым, направление его намагниченности не изменяется. При приложении электрического напряжения между инжектором и коллектором в ячейке возникает ток, состоящий из двух спиновых компонент.

Данная конструкция должна обеспечивать высокие значения туннельного магнитосопротивления согласно механизму затухания электронных волн с различной симметрией в слое MgO, помещенном между ферромагнитными электродами. Использование кристаллического MgO обосновывается наиболее оптимальными параметрами потенциального барьера, приводящими к максимальным значениям туннельного магнитосопротивления по сравнению с другими диэлектриками, однако качество оксида магния очень сильно зависит от метода осаждения. Наличие оксида SiO_x между кремнием и MgO может приводить к снижению спиновой поляризации электронов.

Литература

1. Karg S. F. Transition-metal-oxide-based resistance-change memories / S. F. Karg [et al.] // IBM Journal of Research and Development. – 2008. – Vol. 52, No. 4.5. – P. 481–492.
2. Lee K. Development of Embedded STT-MRAM for Mobile System-on-Chips / K. Lee, S. H. Kang // IEEE Transactions on Magnetics. – 2011. – Vol. 47, No. 1. – P. 131–136.
3. Moodera J. S. Large Magnetoresistance at Room Temperature in Ferromagnetic Thin Film Tunnel Junctions / J. S. Moodera [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 1995. – Vol. 74, No. 16. – P. 3273–3276.
4. Miyazaki T. Giant magnetic tunneling effect in Fe/Al₂O₃/Fe junction / T. Miyazaki, N. Tezuka // J. Magn. Magn. Mater. – 1995. Vol. 139, No. 33. – P. L231–L234.

5. Костров А. И. Электрическая модель ячейки памяти на эффекте туннельного магнитосопротивления / А. И. Костров, В. Р. Сتمпицкий, Т. Н. Родина [и др.] // Доклады БГУ-ИР. – 2010. – № 2. – С. 23–29.

6. Костров А. И. Динамическая модель ячейки памяти на эффекте туннельного магнитосопротивления / А. И. Костров [и др.] // Микроэлектроника. – 2011. – Т. 40, № 2. – С. 1–8.

7. Костров А. И. Макромодель ячейки памяти с магнитным туннельным переходом / А. И. Костров // Нано- и микросистемная техника. – 2011. – № 2. – С. 7–11.