**Аспекты физического моделирования магниторезистивной памяти STT-MRAM на базе ячейки МТП с туннельным барьером MgO**

*Щербаков Василий Сергеевич, инженер-исследователь 1, аспирант2,* [*basil-scherbakov@ya.ru*](mailto:basil-scherbakov@ya.ru)*, +7 (930) 893-88-10*

*1ФИЦ ИУ РАН, г. Москва*

*2МАИ, г. Москва*

Аннотация: Работа посвящена вопросам физического моделирования ячеек магниторезистивной памяти. Рассмотрено влияние электросопротивления, туннельного магнитосопротивления и критического тока переключения на скорость записи и считывания устройства.

Ключевые слова: магнитосопротивление, магнитные туннельные переходы (МТП), энергонезависимая память.

Одним из наиболее перспективных направлений в развитии элементной базы вычислительной техники будущего является создание устройств магниторезистивной памяти. Такие устройства обеспечивают надёжное хранение данных, высокую скорость записи и чтения, а также независимость от источника питания [1]. В частности, многообещающей является память с произвольным доступом на основе перемагничивания свободного слоя спин-поляризованным током (STT-MRAM).

Этот тип оперативной памяти имеет ряд преимуществ:

* высокая плотность ячеек на кристалле;
* меньшее энергопотребление;
* высокую скорость чтения и записи данных;
* срок службы такой памяти практически неограничен;
* отсутствие проблемы перекрытия соседних ячеек индуцированным магнитным полем тока.

Важными характеристиками ячейки STT-MRAM являются электросопротивление, туннельное магнитосопротивление (ТМР), критический ток переключения и термическая стабильность [2]. Туннельное магнетосопротивление возникает на границе раздела двух ферромагнитных материалов, разделённых тонким слоем диэлектрика. Когда поток электронов проходит из одного ферромагнитного материала (закреплённого слоя) в антипараллельно ориентированный ферромагнитный материал (свободный), последний при превышении определённого порогового значения скачкообразно изменяет свою намагниченность, переходя в параллельную конфигурацию. Для создания массива памяти из магнитно-туннельных переходов (МТП), каждое устройство обычно интегрируется с изолирующим транзистором, который может быть включен для выборочного пропускания тока через интересующие устройства МТП, например, во время операции считывания. Для STT MRAM один и тот же транзистор используется для пропускания коммутационного тока через целевые устройства MTJ. Поскольку каждая ячейка памяти обычно имеет один транзистор и один МТП эта конкретная архитектура известна как архитектура MRAM 1T-1MTJ [3].

Электросопротивление туннельной ячейки определяется туннельным барьером и площадью контакта. При этом следует учитывать толщину барьера, материал контакта, наличие дефектов или примесей в барьере или контакте, температуру, при которой осуществляется измерение, а также внешнее напряжение.

При разработке ячеек STT-MRAM необходимо учитывать ряд физических аспектов, влияющих на характеристики такой памяти. Например, для изменения намагниченности свободного слоя в магниторезистивных ячейках используется спин-поляризованный ток. Это позволяет избавиться от растущих магнитных полей и тока, необходимых для записи битов в уменьшенных спин-вентильных элементах (MTJ), за счет снижения критической плотности тока переключения. При низком значении тока можно значительно сократить время и энергию записи в STT-MRAM. Однако уменьшение значения электрического тока I увеличивает частоту отказов при хранении и вероятность возникновения помех при чтении и ошибок при записи. Эти проблемы могут иметь существенные последствия для проектирования архитектур интегральных микросхем (ИМС) на основе STT-MRAM. В ячейке МТП с туннельными барьерами MgO критическая плотность тока переключения примерно в три раза меньше, чем в МТП с барьерами . Это связано с более эффективным спиновым переносом благодаря более высокому коэффициенту поляризации электронов. Кроме того, низкие значения RA= ≈ 50 Ом•мкм2 и *Jc0* = 2,2 × 10 6 А/см2 для ячейки МТП с барьерами MgO позволяют создавать MRAM с высокой плотностью размещения ячеек и быстрым временем доступа в несколько наносекунд.

Формирование перпендикулярной магнитной анизотропии в ячейке МТП позволяет использовать меньшие значения *Jc0* для переключения намагниченности свободного слоя. Это приводит к более низкому значению ТМР. При этом необходимо учитывать влияние толщины свободного слоя на характеристики ТМР и *Jc0* при синтезе структуры STT MRAM с оптимальными параметрами.

Для дальнейшего уменьшения величины *Jc0* рекомендуется использовать двухбарьерные МТП-структуры, состоящие из двух изолирующих барьеров MgO с различным сопротивлением, двух закреплённых слоёв, намагниченных антипараллельно друг другу, и свободного слоя, помещённого между двумя изолирующими барьерами. Это позволяет получить критическую плотность тока переключения *Jc0* = 0,52 МА/см2 при 30 мс. Это значение *Jc0* в 2-3 раза меньше, чем у структуры МТП с одним изолирующим барьером из MgO, и обусловлено улучшением эффективности момента переноса спина.

*Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23-91-01012)*

**Список использованных источников**

1. Абгарян К.К., Бажанов Д.И., Соболев Н.А. Многомасштабное моделирование многослойных наногетероструктур на основе ферромолибдата стронция. // Материалы III международной конференции «Математическое моделирование в материаловедении электронных компонентов» МММЭК–2021. 25–26 октября 2021 г., Москва, c. 53-57 [https://doi.org/10.29003/m2455.ММMSEC‑2021](https://doi.org/10.29003/m2455.ММMSEC2021).
2. Spin-transfer torque magnetic random access memory (STT-MRAM) / D. Apalkov, A. Khvalkovskiy, S. Watts, et al. // ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems. – 2013. – Vol. 9, No. 2. P. 1–35.
3. Dmytro Apalkov, Bernard Dieny, J. M Slaughter. Magnetoresistive Random Access Memory. Proceedings of the IEEE, 2016, 104, pp.1796 - 1830. ff10.1109/JPROC.2016.2590142ff. ffhal-01834195

ASPECTS OF PHYSICAL MODELING OF STT-MRAM MAGNETORESISTIVE MEMORY BASED ON MTJ CELL WITH MGO TUNNEL BARRIER

V.S. Scherbakov

Abstract: The work is devoted to the issues of physical modeling of magnetoresistive memory cells. The influence of electrical resistance, tunneling magnetoresistance (TMR) and critical switching current on the recording and reading speed of the device is considered.

Key words: magnetoresistance, magnetic tunnel junctions (MTP), non-volatile memory.