

# МАГНИТОРЕЗИСТИВНАЯ ПАМЯТЬ MRAM КОМПАНИИ EVERSPIN TECHNOLOGIES

И. Романова

Современные технологии памяти, основанные на хранении электрического заряда и реализованные в полупроводниковых микросхемах типа СОЗУ, ДОЗУ и флеш-памяти сталкиваются с трудностями при переходе к технологическим нормам менее 20 нм. Поэтому в течение последнего десятилетия активно проводились исследования, направленные на разработку альтернативных технологий памяти. По мнению специалистов, наиболее перспективной является технология магниторезистивной памяти – MRAM, в которой для хранения информации используется не электрический заряд, а изменение состояния вещества. К основным ее преимуществам относятся энергонезависимость и высокая производительность. MRAM объединяет достоинства оперативной памяти с произвольным доступом и флеш-памяти. От последней MRAM отличается высокой надежностью и большим сроком службы.

**И**стория компании Everspin Technologies началась в июне 2008 года, когда корпорация Freescale Semiconductor объявила о решении выделить бизнес, связанный с разработкой и производством памяти MRAM (magneto-resistive random-access memory), в самостоятельное предприятие. Компания Freescale передала Everspin все свои наработки в области MRAM. По условиям соглашения, Everspin Technologies поставляла (и поставляет) микрочипы MRAM для клиентов Freescale и для самой Freescale, которая продолжает использовать данный тип памяти в своих встраиваемых устройствах.

## СТРУКТУРА ЗАПОМИНАЮЩЕЙ ЯЧЕЙКИ MRAM

В отличие от других типов запоминающих устройств информация в магнитно-резистивной памяти хранится не в виде электрических зарядов или токов, а в магнитных элементах памяти. Компания использует запоминающие ячейки двух типов, которые различаются технологией записи и считывания информации (см. рисунок).

**Ячейка памяти MRAM Everspin I типа** состоит из управляющего транзистора и МТJ (магнитного туннельного перехода), который формируется из нескольких слоев: слоя с фиксированной поляризацией, тонкого диэлектрического туннельного барьера и свободного магнитного слоя. Технология записи информации и считывания основана на изменении величины магнитного поля (см. рис.а). Когда на МТJ-элемент подается смещение, электроны поляризуются магнитным слоем и пересекают диэлектрический барьер (туннелирование). Таким образом, МТJ-элемент имеет малое сопротивление, когда магнитный момент свободного слоя сонаправлен магнитному моменту фиксированного слоя, и высокое – когда магнитный момент свободного слоя противоположен магнитному моменту фиксированного слоя. Подобная динамика сопротивления в результате изменения магнитного состояния устройства известна как магнито-резистивный эффект. Отсюда и название магниторезистивной RAM.

Устройство памяти организовано по принципу сетки, состоящей из отдельных ячеек, содержащих элемент памяти и транзистор.

По величине протекающего тока можно определить сопротивление данной ячейки и, как следствие, полярность перезаписываемого слоя. Обычно одинаковая ориентация намагниченности в слоях элемента интерпретируется как лог. 0, в то время как противоположное направление намагниченности слоев (для него характерно более высокое сопротивление) – как лог.1. Такая память в 1 тыс. раз быстрее традиционной EEPROM и не имеет ограничения по количеству циклов перезаписи.

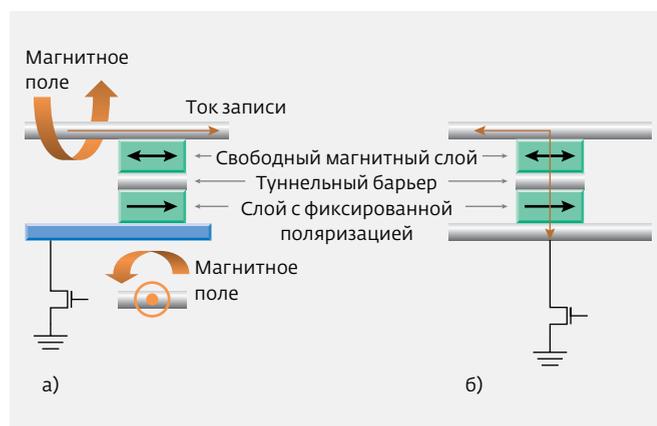
В процессе записи по взаимно перпендикулярным разрядной (bit line) и числовой (word line) шинам, между которыми находится структура МТJ, пропускается электрический ток. Он создает магнитное поле, которое меняет направление намагниченности в свободном ферромагнетике. При выполнении операции чтения открывается развязывающий транзистор, и ток проходит через структуру МТJ.

Однако в этом случае (ячейка I типа) для создания поля требуется большой по величине ток, что затрудняет применение запоминающих устройств с ячейками I типа в портативных устройствах с низким энергопотреблением. Кроме того, с уменьшением размера микросхем (т.е. при переходе на меньшие топологические нормы) индуцированное поле может перекрывать соседние ячейки на маленькой площади, что с большой вероятностью приведет к ошибкам записи. Поэтому в памяти MRAM данного типа необходимо использовать ячейки достаточно большого размера.

**В ячейке памяти MRAM Everspin II типа** (см. рис.б) применяется новая технология записи информации – перенос спинового момента (spin-torque-transfer-STT) или переключение с помощью переноса спина, то есть используются электроны с заданным состоянием спина («поляризованные»). При таком способе записи информации в ячейку памяти требуется ток меньшей силы, и нет препятствий для перехода на топологические размеры 65 нм и менее.

## ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ MRAM EVERSPIN

Магнитно-резистивная память с произвольным доступом компании Everspin объединяет магнитные запоминающие элементы со стандартным технологическим процессом КМОП, используются пять уровней металлизации, включая шины программирования, окруженные материалом с высокой проницаемостью для концентрации магнитного потока. Архитектура, структура запоминающих



Виды ячеек памяти MRAM: а – тип I, информация записывается путем изменения величины магнитного поля; б – тип II, запись информации производится в результате переноса спинового момента

элементов и технология режима переключения ячеек памяти запатентованы компанией Everspin. В результате применения этой технологии была изготовлена память с большой логической емкостью, низкой стоимостью, полной энергонезависимостью, высокой скоростью чтения/записи (как у СОЗУ) и неограниченным количеством циклов чтения/записи. Таким сочетанием свойств не обладает ни одна другая технология стандартной или энергонезависимой памяти.

Динамику развития памяти MRAM в компаниях Freescale и Everspin по годам можно представить так:

- 1984 год – открытие гигантского магниторезистивного эффекта (GMR);
- 1998 год – работы компании Motorola в области памяти MRAM после двухлетних исследований привели к появлению туннельного магнитного перехода МТJ;
- 2006 год – Freescale выпустила первую коммерческую схему MRAM емкостью 4 Мбит;
- 2008 год (начало года) – Everspin Technologies отделилась от Freescale Semiconductor и получила 20 млн. долл. на создание схем MRAM-памяти;
- 2008 год (конец года) – Everspin анонсировала MRAM емкостью 256К-4 Мбит;
- 2009 год (начало года) – Everspin выпустила семейство MRAM с SPI-интерфейсом;
- 2009 год (конец года) – Everspin отгружает первые образцы встраиваемых MRAM;
- 2010 год (начало года) – Everspin выпустила MRAM емкостью 16 Мбит;
- 2010 год (конец года) – Everspin квалифицирует первую встраиваемую MRAM-память;

- 2011 год (начало) – Everspin выпустила 2 млн. встраиваемых MRAM;
- 2011 год (конец года) – Everspin выпустила 4 млн. встраиваемых MRAM;
- 2012 год – Everspin объявила о выпуске первых схем памяти ST-MRAM (spin-torque-transfer);
- 2014 год – Everspin начала серийное производство ST-MRAM емкостью 1 Мбит с интерфейсом Quad SPI.

### ПРЕИМУЩЕСТВА ПАМЯТИ MRAM КОМПАНИИ EVERSPIIN TECHNOLOGIES

- **Малые габариты.** MRAM поставляется в малогабаритных BGA и DFN корпусах, которые можно использовать в современных компактных конструкциях.
- **Повышенная надежность и широкий диапазон рабочих температур.** Устройства MRAM работают от входного напряжения 3 В в широком диапазоне рабочих температур (от -40 до 85°C), при экстремальных условиях окружающей среды (влажность, облучение, температура до 125°C). Данные сохраняются в течение более 20 лет после каждой записи без резервного копирования или резервного аккумулятора. Важная информация записывается в MRAM со скоростями, сопоставимыми с СОЗУ, и полностью сохраняется при перебоях с электропитанием. Это единственная энергонезависимая память, способная восстановить информацию при резком превышении температуры.
- **Незначительный коэффициент программных ошибок.** Технология MRAM в отличие от технологий флеш-памяти, СОЗУ, СОЗУ с резервной батареей (BBSRAM, battery backed SRAM) и nvSRAM невосприимчива к нейтронным и альфа-частицам. Тем самым гарантируется снижение коэффициента программных ошибок на два порядка по сравнению с любым иным конкурирующим энергонезависимым решением.
- **Высокая экологичность.** MRAM-продукты RoHS совместимы и не содержат свинца. Отпадает необходимость в резервной батарее, что снимает вопрос ее замены и обеспечивает высокую надежность решения.
- **Заменяет несколько типов памяти.** MRAM-продукты выполняют функции не только внутрисистемной памяти (заменяют флеш-память), быстрого буфера данных (заменяют СОЗУ), но и функции энергонезависимого хранилища данных (заменяют EEPROM, nvRAM или BBSRAM). К сожалению, широкую коммерциализацию MRAM сдерживает более высокая стоимость, меньшая плотность по сравнению с конкурирующими

технологиями, что ограничивает область ее применения. Кроме того, у MRAM выше энергопотребление в активном режиме по сравнению с СОЗУ.

### СРАВНЕНИЕ MRAM С ДРУГИМИ ВИДАМИ ПАМЯТИ

К достоинствам MRAM относятся нулевая потребляемая мощность при хранении данных, очень низкая мощность в режиме ожидания, неограниченный срок службы и относительно высокие скорости. Низкая резервная мощность может быть обеспечена благодаря тому, что для MRAM не характерны потери (в режиме ожидания все напряжения равны нулю), требуется ограниченное количество адресных шин, отсутствуют источники питания с накачкой, которые нужно обслуживать. Активная мощность чтения сравнима со значением для ДОЗУ. Активная мощность записи выше, чем у СОЗУ и ДОЗУ, но намного ниже, чем у флеш-памяти. Для MRAM активная мощность записи реализуется током разрядной шины, в то время как шиной записи управляют многие разряды. Характеристики считывания для MRAM сравнимы с флеш и ДОЗУ, но ниже, чем у СОЗУ. Время записи цикла сравнимо с ДОЗУ, намного больше, чем у СОЗУ, но меньше, чем у флеш-памяти.

Выбор технологии зависит от ее назначения. В некоторых случаях предпочтения определяются исключительно особенностью применения. Рекомендуется выбирать MRAM, если важны энергонезависимость и низкая мощность в режиме ожидания; в иных случаях можно использовать СОЗУ или ДОЗУ. Более того, если для приложения максимально возможные характеристики, мощность и долговечность записи важнее других свойств, MRAM будет оптимальным выбором; в иных случаях можно использовать флеш-память. Сравнительные характеристики современных видов памяти (с параллельным интерфейсом и произвольной выборкой объемом 1 Мбит), изготовленных по различным технологиям, приведены в табл. 1.

### ПАМЯТЬ MRAM EVERSPIIN TECHNOLOGIES

Компания – один из лидеров по производству памяти MRAM. С конвейеров предприятия сошло около 20 млн. чипов памяти объемом 512 кбит и 2 Мбит. Сегодня наиболее востребованы MRAM-чипы объемом 256 кбит, 1 Мбит и 4 Мбит. Самый большой объем памяти элементов MRAM, производимых Everspin, составляет 16 Мбит.

Everspin предлагает их использовать для аэрокосмических и военных коммуникационных, информационных и управляющих систем, систем безопасности и автономных систем регистрации

Таблица 1. Сравнительные характеристики различных современных видов памяти

Виды памяти	СОЗУ	ДОЗУ	Флеш (NOR)	Флеш (NAND)	FeRAM	MRAM	ST-RAM
Энергонезависимость	Нет	Нет	Да	Да	Да	Да	Да
Площадь ячейки, F <sup>2</sup>	50–120*	6–10	10	5	15–34	16–40	6–20
Время чтения, нс	1–100	30	10	50	20–80	3–20	2–20
Запись/удаление, нс	1–100	15	1 мкс/10 мс	1 мс/0,1 мс	50/50	3–20	2–20
Количество циклов записи	10 <sup>16</sup>	10 <sup>16</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>12</sup>	>10 <sup>16</sup>	>10 <sup>16</sup>
Энергия записи	Низкая	Низкая	Очень высокая	Очень высокая	Низкая	Высокая	Низкая
Нежелательное потребление энергии	Ток утечки	Ток обновления	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
Напряжение питания, В	–	3	6–8	16–20	2–3	3	<1,5

\* Площадь ячейки памяти в 50–120 раз больше площади минимальной топологической ячейки F<sup>2</sup>

данных (черных ящиков, замены устройств памяти на аккумуляторных батареях). Их производство в будущем ориентировано на применение в цифровых фотоаппаратах, ноутбуках, смарт-картах, мобильных телефонах, персональных компьютерах и прочей бытовой технике. Состав и характеристики семейства микросхем MRAM компании Everspin приведены в табл. 2.

Первые микросхемы памяти ST-MRAM (Spin-torque magnetoresistive RAM) для высокопроизводительных систем хранения компания Everspin выпустила в 2012 году. Это были микрочипы 64 Мбит ST-MRAM, получившие наименование EMD3D064M. Они выполнены в стандартных корпусах WBCA и предназначены для использования в высокопроизводительных системах хранения данных. Благодаря фирменной технологии чипы, совмещающие достоинства динамической и флеш-памяти, характеризуются малым временем доступа и обеспечивают высокую скорость передачи данных.

Характеристики выпускаемых компанией чипов ST-MRAM: 1,6 млрд. операций ввода/вывода в секунду, пропускная способность до 3,2 Гбайт/с и задержки, исчисляемые наносекундами. Для сравнения характеристики накопителя OCZ Vertex 4 на 512 Мбит: 120 тыс. операций ввода/вывода в секунду, пропускная способность 500 Мбайт/с и микросекундные задержки.

Однако в силу некоторых недостатков данного типа памяти ее можно рассматривать в качестве вспомогательного решения для поддержки флеш-памяти, а не полной ее замены. Основным недостатком, как уже отмечалось, – высокая стоимость. Остается надеяться, что со временем проблема будет решена, как было в случае с твердотельными накопителями, цена которых поначалу также составляла десятки тысяч долларов. Еще одна проблема – высокое энергопотребление.

Чип EMD3D064M соответствует требованиям JEDEC к интерфейсу DDR3, изготавливается в виде модулей формата DDR3.

### НОВАЯ МИКРОСХЕМА ПАМЯТИ MRAM ОБЪЕМОМ 1 МБИТ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ QUAD SPI-ИНТЕРФЕЙСОМ

В феврале 2014 года компания Everspin Technologies представила микросхему памяти MRAM объемом 1 Мбит с интерфейсом Quad SPI, объединяющим четыре линии последовательного ввода/вывода. Изготовленная по технологии spin-torque микросхема обозначается MR10Q010.

Сочетание интерфейса Quad SPI и памяти MRAM обеспечивает высокую скорость записи без задержек, характерных для флеш-памяти и EEPROM. Пропускная способность новой памяти, функционирующей на тактовой частоте 104 МГц, составляет 52 Мбайт/с. MR10Q010 поддерживает полный набор

Таблица 2. Характеристики микросхем компании Everspin

Тип ИС	Объем MRAM	Организация	Напряжение питания, В	Тип корпуса
16-разрядная параллельная шина I/O				
MR4A16	16 Мбит	1 Мбит × 16	3,3	
MR4A16*	4 Мбит	256 кбит × 16		
MR0A16*	1 Мбит	64 кбит × 16		
8-разрядная параллельная шина I/O				TSOP2 (44 и 54 вывода) BGA (48 выводов) SOIC (32 вывода)
MR4A08	16 Мбит	1 Мбит × 8	3,3	
MR2A08*	4 Мбит	512 кбит × 8		
MR0A08	1 Мбит	128 кбит × 8		
MR256A08	256 кбит	32 кбит × 8		
MR0D08	1 Мбит	128 Кбит × 8	1,8	
MR256D08	256 кбит	32 кбит × 8		
MR0DL08	1 Мбит	128 кбит × 8	1,8; 2,7	
MR256DL08	256 кбит	32 кбит × 8		
Последовательный SPI-интерфейс				
MR25H40*	4 Мбит	512 кбит × 8	2,7–3,6	
MR20H40	4 Мбит	512 кбит × 8, 50 МГц		
MR25H10*	1 Мбит	128 кбит × 8		
MR25H256*	256 кбит	32 кбит × 8		
MR10Q010	256 кбит	Quad SPI, 104 МГц		

\* Схемы соответствуют стандарту AECQ100 (автомобильная промышленность, повышенная влажность, диапазон рабочих температур от –40 до 125 °C). Остальные схемы имеют диапазоны рабочих температур: коммерческий – от 0 до 70 °C и промышленный – от –40 до 85 °C (105 °C).

команд Quad SPI, включая операции быстрого чтения и записи, при которых адрес и данные передаются по всем четырем линиям для уменьшения количества тактов синхронизации. Предусмотрено два варианта напряжения питания – 3,3 и 1,8 В.

Использование последовательного интерфейса позволяет обойтись меньшим количеством выводов, уменьшить размеры корпуса микросхемы, упростить топологию печатных плат. Микросхемы MR10Q010 выпускаются в стандартных корпусах SOIC (7,5×10,3 мм) с 16 выводами, тогда как в случае параллельного интерфейса понадобился бы корпус с 20 выводами.

В августе 2014 года в Санта-Кларе на конференции по флеш-памяти компания Everspin

Technologies продемонстрировала первую серийно выпускаемую оперативную магнитно-резистивную память на основе эффекта передачи спинового момента ST-MRAM. Эту схему компании Everson и Mobivil (поставщики платформ и решений для хранения данных и офисных систем) применили в системе хранения данных с последовательной шиной PCIe. Благодаря наличию ПЛИС компании Altera и ST-MRAM от Everspin в системе реализуются достоинства энергонезависимой флеш-памяти и высокая пропускная способность ДОЗУ, тем самым обеспечиваются улучшение эксплуатационных характеристик, повышение защиты данных от несанкционированного доступа и сбоя

системы, а также надежности твердотельных систем хранения.

В октябре 2014 года сообщалось о том, что компания Globalfoundries, крупнейший производитель полупроводниковых устройств, подписала соглашение с компанией Everspin и намерена инвестировать в развитие памяти следующего поколения MRAM. Как отмечают эксперты, это важный шаг на пути к массовому внедрению перспективной технологии. Globalfoundries вложит средства в производство микросхем ST-MRAM на пластинах диаметром 300 мм по 40-нм и 28-нм технологиям. Кроме того, компания выкупила часть акций Everspin и согласно контракту становится ее партнером по производству ST-MRAM.

\* \* \*

Компания Everspin Technologies – ведущий разработчик и производитель магнитной оперативной памяти и первый в мире поставщик серийно выпускаемых схем магниторезистивной памяти. В ее портфеле более чем 600 действующих патентов, многие из которых имеют большое значение для развития MRAM-технологии.

*Часть материала предоставлена Н.Королевым, компания Inteltek Russia.*

## ИСТОЧНИКИ

- **Попков А.Ф., Звездин К.А., Чиненков М.Ю., Дюжев Н.А., Звездин А.К.** Спиновой транспорт и проблемы магнитной оперативной памяти (MRAM). – Инженерная физика, 2012, № 9, с. 19–34.
- **Теряева Н.** Кто первым оседлает вертлявый спин. <http://open-dubna.ru/13-nauka/741-kto-pervym-osedlaet-vertlyavyj-spin.html>.
- **Бабурин С., Самоделов А.** Магниторезистивная память MRAM компании Everspin Technologies. – Компоненты и технологии, 2012, № 10, с. 51–54.
- **Грязнов Е.Г., Мансуров А.Н., Петросянц К.О.** Конструкции ячеек радиационно-стойких энерго-независимых ОЗУ, интегрированных в КМОП КНИ процесс. – Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем-2012. Сборник трудов под общ. ред. академика РАН А.Л.Степковскогo. М.: ИППМ РАН, 2012, с. 608–611. <http://www.mes-conference.ru/data/year2012/pdf/D166.pdf>.
- **Зюбин А.Ю.** Спинтроника и магниторезистивная память. <http://itkalininingrad.ru/articles/7/0/27454>.
- **Шишков А.** Современная компонентная база. ОЗУ. <http://frelamk.narod.ru/olderfiles/1/OZURAMnvRAM.pdf>.