

МАГНИТОРЕЗИСТИВНАЯ ПАМЯТЬ MRAM — БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ ОЗУ И ПЗУ В ОДНОЙ МИКРОСХЕМЕ

Михаил Соколов, инженер по применению, компания Freescale Semiconductor
Александр Гришин, инженер, МЭИ (ТУ)

Исследование магниторезистивных структур как энергонезависимых элементов для хранения информации началось еще в первой половине XX века. Но только летом 2006 г. была представлена первая в мире микросхема энергонезависимой памяти, использующая технологию MRAM.

В некоторых публикациях этот факт называют прорывом в области разработки памяти за последние 10 лет. Так ли это, и что из себя представляет магниторезистивная память — на эти вопросы отвечает данная статья. Также приводится подробное описание характеристик микросхемы MR2A16A — первого продукта в линейке памяти MRAM.

ТЕХНОЛОГИЯ MRAM — ДОЛГИЙ ПУТЬ К УСПЕХУ

История создания магниторезистивной памяти MRAM (Magnetoresistive Random Access Memory) насчитывает уже не один десяток лет. В частности, в России также проводились работы по созданию магниторезистивной памяти для применения в военной и аэрокосмической областях. Однако практически все попытки создания серийной памяти MRAM не приводили к появлению надежного продукта, пригодного для серийного производства.

Такие крупные фирмы, как IBM, Cypress, Toshiba, Renesas, Hitachi, Mitsubishi, Motorola и др., работали над созданием памяти более 10 лет. Компания Motorola приступила к исследованиям в области магниторезистивных структур в 1995 г. совместно с агентством перспективных исследований МО США (DARPA

US). После отделения всего сектора полупроводниковых компонентов от Motorola в 2004 г. уже независимая компания Freescale Semiconductor продолжила работы по доведению продукта до серийного производства. В результате 10 июля 2006 г. был анонсирован законченный коммерческий продукт, использующий технологию MRAM, — автономный модуль MR2A16A с объемом памяти 4 Мбит.

Магниторезистивная память является революционной технологией, обладающей всеми необходимыми свойствами для того, чтобы стать действительно универсальной. Кроме того, она имеет ряд уникальных особенностей, открывающих широкие рыночные перспективы.

ПРЕИМУЩЕСТВА МАГНИТОРЕЗИСТИВНОЙ ПАМЯТИ

Объем мирового рынка микросхем памяти, по некоторым оцен-

кам, превышает 48 млрд. долл. США и продолжает расти. Чтобы выйти на рынок и не быть статистом во втором десятке производителей устройств памяти, необходимо предложить новый, уникальный продукт, сочетающий в себе преимущества всех распространенных технологий: энергонезависимое хранение данных практически неограниченное время без необходимости регенерации, скорость чтения/записи, сравнимую с лидирующей на сегодняшний день технологией SRAM, неограниченное число циклов стирания/записи данных, высокую масштабируемость и плотность ячеек для создания микросхем памяти различного объема. Задача на первый взгляд невыполнима, однако наиболее близко к ее решению подошла технология MRAM. Конечно, скорость чтения/записи еще не достигла долей наносекунд, пока не отработаны технологические процессы создания микросхем MRAM объемом сотни мегабит и в компактных корпусах, стоимость не всегда та, что хотелось бы. Но уже сейчас можно с достаточной уверенностью утверждать, что технология MRAM преодолевает эти недостатки и через несколько лет постепенно начнет отвоевывать значительную часть рынка у существующих технологий памяти. На чем основаны такие утверждения? Рассмотрим более подробно особенности памяти MRAM, отличающие ее от распространенных технологий (см. табл. 1).

Таблица 1. Сравнительные характеристики основных типов памяти

	MRAM	SRAM	DRAM	FLASH	FRAM
Скорость чтения	Высокая	Самая высокая	Средняя	Высокая	Высокая
Скорость записи	Высокая	Самая высокая	Средняя	Низкая	Средняя
Масштабируемость	Хорошая	Хорошая	Ограниченная	Ограниченная	Ограниченная
Плотность ячеек	Средняя/высокая	Низкая	Высокая	Средняя	Средняя
Энергонезависимость	Да	Нет	Нет	Да	Да
Число циклов стирания/записи	Неограниченное	Неограниченное	Неограниченное	Ограниченное	Ограниченное
Ток утечки ячеек	Низкий	Низкий/высокий	Высокий	Низкий	Низкий
Возможность работы при низких напряжениях	Да	Да	Ограниченная	Ограниченная	Ограниченная
Сложность производства	Средняя	Низкая	Средняя	Средняя	Средняя

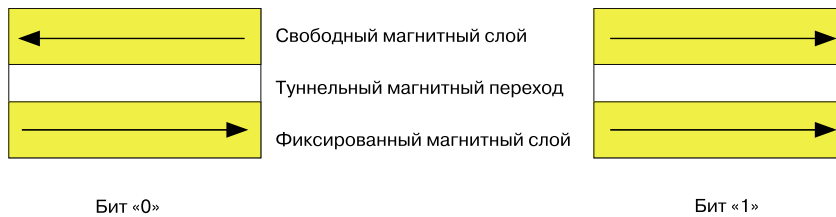


Рис. 1. Магнитные слои битовой ячейки 1T1MTJ памяти MRAM для значений «0» и «1»

Энергонезависимая память **EEPROM** (ЭСППЗУ) на данный момент находится на последних стадиях своего жизненного цикла. Значительно более медленная скорость работы, а также ограниченное количество циклов перезаписи по сравнению с MRAM не позволяют использовать эту память в качестве оперативной. Она годится только для хранения кода программ либо данных, не требующих частого изменения либо обращения к ним.

Основным недостатком памяти типа **Flash** (флэш) является малое число циклов перезаписи. В зависимости от условий эксплуатации флэш-память может быть перезаписана примерно 10 тыс. — 1 млн. раз прежде, чем битовая ячейка перестанет функционировать.

В отличие от флэш-памяти, число циклов перезаписи памяти MRAM бесконечно благодаря принципиально другой технологии работы битовых ячеек. Здесь программирование происходит путем изменения полярности магнитных слоев, а данная операция не разрушает материал, из которого состоят ячейки памяти.

К другим недостаткам флэш-памяти стоит отнести низкую скорость записи, а также побочный характер стирания/записи ячеек памяти. В MRAM можно выполнять любые операции над отдельными ячейками независимо. Кроме того, магниторезистивная память не требует предварительного стирания бита перед его перезаписью.

Динамическая память **DRAM** требует частой регенерации ячеек для сохранения данных, что приводит к повышенному потреблению электроэнергии и не позволяет использовать ее в качестве энергонезависимой памяти.

Статическая память **SRAM** не является энергонезависимой. К тому же, вследствие низкой плотности ячеек технология SRAM не позволяет создавать память значительного объема (десятки — сотни мегабит) в малом форм-факторе.

Статическую память с резервным батарейным питанием (**Battery Backed SRAM**) можно назвать универсальной памятью, но с существенными ограничениями. Встроенные батареи имеют ограниченный срок службы, лимитированную емкость вследствие компактных размеров батареи, а ее наличие в устройстве создает дополнительные проблемы при хранении, монтаже и эксплуатации памяти. Нельзя забывать и про сильную температурную зависимость характеристик батарей и дополнительные сложности при утилизации устройств.

Скорость записи/стирания памяти MRAM больше, чем у Battery Backed SRAM. Отсутствие батареи означает большую надежность и долговечность памяти MRAM, независимость ее рабочих характеристик от температуры во всем диапазоне, определенном производителем.

Энергонезависимая ферроэлектрическая память **FRAM** до недавнего времени наиболее полно соответствовала определению «универсальной памяти» из всех доступных на рынке серийно выпускаемых микросхем. Однако и у нее есть ряд недостатков, самый серьезный из которых заключается в большом размере ее ячеек. Благодаря усилиям разработчиков он постепенно приближается к физическому пределу, за которым дальнейшее уменьшение габаритов сопряжено с серьезными техническими и технологическими проблемами. Однако при этом ячейки остаются достаточно крупными, что не позволяет создавать микросхемы памяти большого объема с малыми габаритами. На сегодняшний день объем памяти микросхем FRAM составляет от единиц килобит до единиц мегабит. Производители предпринимают попытки создать память объемом десятки мегабит, однако серийное производство микросхем объемом 16, 32 либо 64 Мбит если и будет возможно, то не раньше чем через 3–5 лет.

Технология MRAM не накладывает ограничений на объем памяти. По сравнению с FRAM скорость чтения/записи ячеек памяти MRAM ощутимо

выше.

Модули памяти FRAM требуют повторной перезаписи данных в ячейки после считывания. Этот эффект связан с деградацией битовых ячеек памяти FRAM при операции чтения. Как следствие, это может привести к потере данных, если произойдет случайное отключение питания во время операции чтения, что для энергонезависимой памяти является очень существенным недостатком.

СТРУКТУРА И ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ БИТОВЫХ ЯЧЕЕК MRAM

Первый коммерческий продукт, использующий технологию MRAM, микросхема MR2A16A состоит из массива ячеек памяти, каждая из которых содержит один транзистор и один магнитный туннельный переход (1T1MTJ). Магнитный туннельный переход (MTJ) является основой битовой ячейки MRAM. Он состоит из очень тонкого диэлектрического слоя оксида алюминия (AlOx), помещенного между двумя магнитными слоями. Каждый из магнитных слоев имеет свой вектор магнитного поля. Верхний магнитный слой называют свободным слоем, он может изменять вектор своего поля. Магнитный слой основания называют фиксированным слоем, вектор его магнитного поля заблокирован и не изменяется.

Направление вектора магнитного поля свободного слоя определяет состояние бита как логического нуля или единицы. Если векторы намагниченности свободного слоя и фиксированного слоя ориентированы в одном направлении, сопротивление структуры MTJ низкое (см. рисунок 1). Если векторы намагниченности свободного и фиксированного слоев развернуты на 180° относительно друг друга (противоположны), сопротивление структуры MTJ высокое. Величина сопротивления перехода MTJ определяет, будет ли прочитано содержимое ячейки как «0» или «1» при прохождении через ячейку тока чтения.

Во время операции установки бита магнитный вектор свободного слоя принимает одно из двух возможных состояний. Направление вектора поля задается с помощью внутренних медных проводников, расположенных в перпендикулярных направлениях относительно друг друга на вершине и в основании структуры MTJ. Импульсы тока, протекающего через перпендикулярно расположенные медные проводники, создают магнитное поле, которое изменяет намагниченность свободного слоя той

битовой ячейки, которая находится в области перекрещивания проводников (см. рис. 2).

Такая трехслойная структура повышает скорость и стабильность операций стирания/записи, однако требует более высокого тока для выполнения этих операций, чем ячейки традиционной памяти. Однако на практике среднее потребление остается на том же уровне, так как при записи байта данных не все биты требуют изменения, если только мы не меняем значение байта с «FF» на «00» и обратно. Кроме того, процесс стирания/записи занимает крайне малое время порядка 25 нс. В результате по показателю потребления микросхема памяти типа MRAM выигрывает по сравнению с другими типами ПЗУ, которые, к тому же, существенно медленнее.

При проектировании памяти MRAM, пригодной для серийного производства, разработчики столкнулись с серьезной проблемой, а именно с высокой чувствительностью к случайному перемагничиванию. При изменении определенного бита памяти высока вероятность того, что свободный магнитный слой соседних битов может быть также непреднамеренно изменен. Для повышения стабильности процесса установки бита и устранения эффекта непреднамеренного перемагничивания медные проводники с трех сторон закрыли специальным изолирующим экраном, предотвращающим паразитные навод-

ки на соседние битовые ячейки. Кроме этого, изолирующий экран направляет и фокусирует магнитное поле только на целевую битовую ячейку, что позволило существенно снизить ток программирования. В итоге импульсы тока на линии 1 и линии 2 меняют вектор намагниченности свободного слоя определенной ячейки, не внося изменения в остальные биты в том же ряду или столбце (см. рис. 2).

МИКРОСХЕМА ПАМЯТИ MR2A16A

Микросхема MR2A16A является первым продуктом от компании Freescale в линейке микросхем памяти MRAM. Модуль памяти MR2A16A изготовлен по технологии 0,18 мкм и является уже вторым поколением устройств на базе данной технологии. Емкость микросхемы составляет 4 Мбит с организацией 256K × 16 бит. Управление осуществляется по стандартным входам: chip enable, write enable, output enable и upper/lower byte select, обеспечивающим гибкость системы и предотвращающим конфликтные ситуации при обращении к шине (см. табл. 2). В зависимости от состояния управляющих входов данные могут быть записаны/считаны как в 8-битном, так и в 16-битном формате. Устройство также поддерживает полностью статические операции. Внутренняя структура микросхемы памяти представлена на рисунке 3.

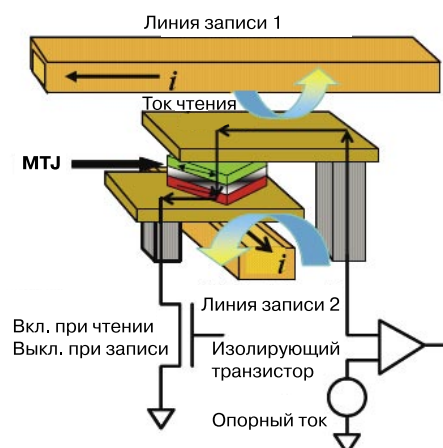


Рис. 2. Битовая ячейка 1Т1МТJ: упрощенная структура, режимы чтения и записи

Таблица 2. Функции выводов MR2A16A

Сигнал	Функция
A[17:0]	Вход адреса
$\bar{E}$	Выбор чипа
$\bar{W}$	Разрешение записи
$\bar{G}$	Разрешение чтения
$\bar{UB}$	Выбор старшего байта
$\bar{LB}$	Выбор младшего байта
DQL[7:0]	Запись/чтение данных, младший байт
DQU[15:8]	Запись/чтение данных, старший байт
V_{DD}	Питание 3,3 В
V_{SS}	Земля
NC	Не используется

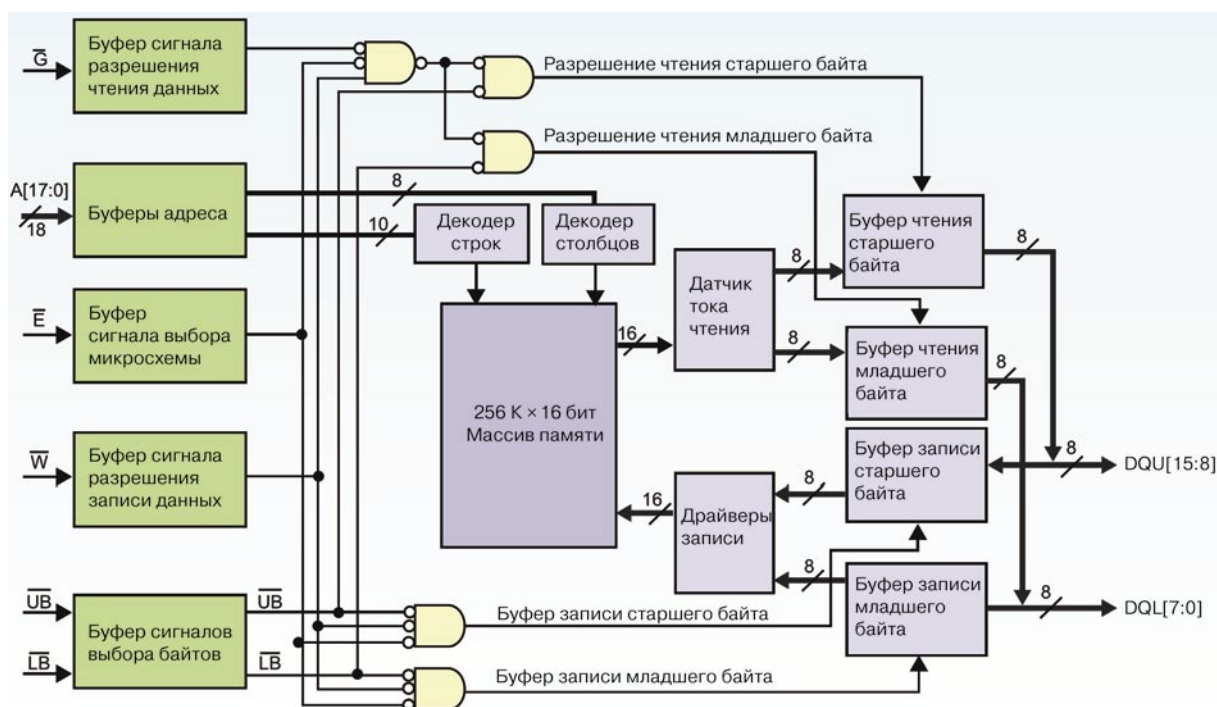


Рис. 3. Блок-схема микросхемы MR2A16A



Рис. 4. MRAM в качестве альтернативы памяти Battery Backed SRAM

Времена циклов чтения/записи/стирания малы, симметричны по длительности и составляют 35 нс. Диапазон рабочих напряжений микросхемы — 3...3,6 В, встроенная схема мониторинга питания предотвращает запись ячеек памяти при снижении уровня питающего напряжения более чем на 0,5 В относительно рабочего. Рабочий температурный диапазон микросхем MRAM образца 2006 г. составляет 0...70°C. Во втором квартале 2007 г. компания Freescale начнет серийный выпуск микросхем MR2A16A с рабочим диапазоном — 40...105°C. В третьем квартале 2007 г. компания планирует анонсировать новые продукты на базе технологии MRAM. Ожидается, что следующими в линейке микросхем будут модули памяти объемом 1 Мбит и 16 Мбит.

Микросхемы MR2A16A выпускаются в корпусе 44-TSOP (type-II) в соответствии с техническими условиями RoHS. В корпус микросхемы встроено защитное экранирование от внешних электромагнитных помех. Конфигурация выводов MR2A16A полностью соответствует микросхемам памяти типа SRAM, по принципу работы с памятью MRAM также схожа с SRAM. Поэтому чипы памяти MR2A16A могут применяться в существующих устройствах и системах, использующих память SRAM, без каких-либо изменений в схеме.

Данные сохраняются в ячейках за счет намагниченности, а не за счет заряда, что позволяет сохранять информацию без регенерации

и без питающего напряжения 10 лет и более. Переключение состояния битов осуществляется без перемещения атомов и электронов внутри материалов, поэтому отсутствует эффект постепенной деградации внутренней структуры битовой ячейки и обеспечивается стабильность характеристик памяти во время всего срока службы микросхемы. Благодаря этому число циклов перезаписи памяти MRAM практически бесконечно (более 10^{16}), а структура ячеек памяти и рабочие характеристики не деградируют в процессе эксплуатации во всем диапазоне рабочих температур и напряжений.

Эксперименты показали, что ячейки памяти MR2A16A выдерживают более 58 трлн. циклов записи и стирания, работая в наихудших эксплуатационных условиях. До настоящего времени не было зарегистрировано ни одного сбоя в работе ячеек памяти, и эксперимент по тестированию количества циклов записи/стирания ячеек памяти MRAM продолжается. В ходе испытаний микросхемы MR2A16A работали на частоте 4 МГц при температуре окружающей среды 90°C и на частоте 28,5 МГц при температуре окружающей среды 70°C.

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТИ MRAM

На сегодняшний день основными факторами, сдерживающими начало массового применения памяти MRAM, являются стоимость микросхем, ску-

дость линейки продуктов с различным объемом памяти, а также новизна технологии. Пока разработчикам доступна только одна микросхема объемом 4 Мбит. По мере удешевления технологии производства и появления новых продуктов MRAM от различных производителей стоимость элементов памяти будет стремительно снижаться. Однако уже сейчас можно говорить о многочисленных областях электронной промышленности, в которых использование магниторезистивной памяти будет экономически оправдано.

Наиболее высока потребность в памяти MRAM в коммерческих системах, где требуется сохранение данных при различных нештатных ситуациях, например аварийном отключении питающего напряжения. Эта память является также идеальным решением для различных регистраторов и устройств типа «черного ящика». Данные могут сохраняться на скоростях, сравнимых с памятью типа SRAM, при этом они не будут утеряны вследствие отключения электроэнергии.

Другим ключевым рынком применения памяти MRAM являются приложения, в которых используется память SRAM с батарейным резервным питанием либо NVSRAM (см. рис. 4). По экономической эффективности, техническим и потребительским параметрам замена памяти на MRAM в подобного рода приложениях оправдана более чем в 80% случаев.

Рынок устройств автомобильной электроники будет в числе первых

и основных потребителей магниторезистивной памяти. Осталось дожидаться появления микросхем MRAM с автомобильным либо промышленным температурным диапазоном, тем более что уже давно назрела потребность в более надежной, долговечной, быстрой и эффективной памяти, нежели распространенные ЭСППЗУ и флэш-память. В одних электронных системах автомобиля уже сейчас процесс записи не успевает за потоком исходных данных, в других данные необходимо сохранять достаточно часто — все это заставляет разработчиков систем идти на различные ухищрения.

Используя MRAM, автомобильные аварийные регистраторы также будут в состоянии собрать и хранить значительное количество данных непосредственно перед и во время аварии, что может быть крайне полезно, например, для страховых компаний.

К другим областям применения памяти MRAM можно отнести следующие:

- персональные компьютеры, офисная техника (мобильные и стационарные ПК, принтеры, факсы, сканеры и т.п.);
- мобильные, носимые устройства (сотовые телефоны, MP3-плееры, фото- и видеокамеры, КПК и т.п.);
- замена ОЗУ с резервным батарейным питанием;
- хранение первоначальных установок и программ загрузчиков в разнообразных устройствах;
- энергонезависимые буферы хранения оперативной информации в серверах и RAID-массивах;
- счетчики и расходомеры (электричество, тепло, вода и прочее);
- авиационная техника, военные приложения;
- охранно-пожарные системы (журналы событий и т.п.);
- хранение данных в различных медицинском оборудовании;
- расширение оперативной памяти в коммуникационных приложениях и приложениях, требующих частого обращения к обрабатываемым данным.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Компания Freescale планирует развивать продукты MRAM в двух направлениях: выпуск отдельных чипов памяти и интеграция в собственные 8-, 16- и 32-разрядные микроконтроллеры и микропроцессоры.

По мере совершенствования технологии магниторезистивной памяти архитектура встраиваемых систем подвергнется радикальной перемене.

В настоящее время MRAM имеет наилучший потенциал для замены комбинаций различных типов памяти, например SRAM + флэш + ПЗУ, применяемых сейчас в большинстве микроконтроллеров и систем на кристалле, так как обладает достоинствами всех перечисленных типов. Таким образом, станет возможна архитектура микроконтроллеров с единственной универсальной памятью (single-memory architecture).

Через 3–5 лет возможно появление персональных компьютеров с магниторезистивной памятью. На первоначальной стадии начнется производство ПК, в которых флэш-память для хранения базовой системы ввода/вывода (т.н. BIOS) будет заменена на память MRAM. В дальнейшем по мере увеличения объемов и скоростей работы MRAM начнется постепенная замена оперативной и кэш-памяти в ПК.

Уже сейчас появляются портативные ПК, в которых накопители на жестких дисках заменяются памятью типа флэш. Если в процессе развития технологии MRAM не возникнет ограничений на создание памяти объемом десятки и сотни гигабит в компактном форм-факторе, следует ожидать появления быстродействующих накопителей для хранения прикладного программного обеспечения и данных. Это даст возможность создавать персональные компьютеры и другие системы и устройства, которые будут загружаться практически мгновенно по сравнению, например, с нынешними ПК, в которых процесс загрузки занимает от десятков секунд до нескольких минут. Кроме того, появится возможность возобновлять выполнение программ после включения устройства с того момента, на котором оно было прервано при выключении напряжения питания.

В результате через несколько лет технология MRAM постепенно начнет не только осваивать новые области применения электронной памяти, но и сможет взять на себя значительную часть уже имеющегося рынка полупроводниковой памяти, заменяя распространенные сегодня энергонезависимые ЭСППЗУ, флэш, FRAM, а также наиболее популярные быстродействующие типы памяти, как статическая SRAM, динамическая DRAM и другие.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lee T. MRAM Joins the Memory Market // *Electronic Engineering Times — Asia*, October 16–31, 2006.
2. www.freescale.com/mram.