

Перспективные технологии производства памяти. Современное состояние

Леонид ВИХАРЕВ
lv-lv@mail.ru

Введение

В современной электронике применяется несколько видов полупроводниковой памяти, различающихся по емкости (объему), рассеиваемой мощности, уровню питания, внутренней организации, типу интерфейса, быстродействию, габаритам и другим характеристикам. Производится тысячи разновидностей этих микросхем с различными параметрами, но, пожалуй, одним из главных отличий является отношение памяти к наличию питания. Одни типы (FLASH, EEPROM, OTP EPROM) способны сохранять записанные данные при выключенном питании, другие — нет. Есть и еще одно важное различие: одни виды допускают обращение по любому адресу, то есть к произвольной ячейке, а другие, в силу технологических или иных особенностей, имеют ограничения по адресации данных. Пока нет универсального варианта, разработчику, к сожалению, приходится ставить на одну плату два, три, а то и больше разных видов памяти. И каждый из них требует формирования своих, особенных диаграмм записи и чтения. Если они вырабатываются аппаратными методами, то растут габариты платы, увеличивается число ИС, снижается надежность устройства. А если формировать адреса и сигналы управления программно, то невероятно разбухает программная часть. Да и не всегда удается достичь требуемой скорости обращения к памяти.

Попытки создать универсальную память, обладающую достоинствами всех видов, — энергонезависимостью, малым временем доступа и произвольной адресацией, велись непрерывно. Испытывались различные физические принципы, опробовались новые материалы, разрабатывались и менялись технологии. В статьях [1], [2], [3] и [5] уже обсуждались основные достоинства и недостатки этих технологий. (Правда, авторы, кажется, пришли к противоположным выводам относительно потенциальных возможностей и будущности этих технологий.) Со времени публикации статей минуло почти три года. За этот период произошли заметные события — появились новые микросхемы памяти, причем некоторые из них стали серийным продуктом, изменились структуры ячеек памяти, яснее обозначились возможности, достоинства и недостатки раз-

личных технологий. Наконец, появились совершенно новые технические решения. Далее в этой статье приводится еще одна точка зрения на проблему, и кратко описывается ее современное состояние.

Перспективные технологии

Кремниевые полупроводниковые технологии почти исчерпали свои ресурсы, и поэтому неотвратимо приближается эра новых технических решений. В декабре 2005 года было опубликовано официальное сообщение International Technology Roadmap for Semiconductors [11] от имени Международного комитета производителей. (Текст документа можно найти, например, на http://www.sia-online.org/downloads/Issue_ITRS.pdf.) В сообщении говорится о начале перехода к посткремниевой эре в схемотехнике. Производители из Японии, Европы, Кореи, США и Тайваня планируют в ближайшее время представить объединенный план перехода на новую технологию. Вероятно, универсальная память, как важнейший компонент электронных устройств, если когда-нибудь и появится, то будет продуктом именно новых, а не традиционных кремниевых технологий.

Основным отличием современных подходов к разработке энергонезависимой памяти является применение совершенно новых физических принципов и механизмов хранения информации:

- перемещение заряда в кристалле или молекуле вещества (сегнетоэлектрическая память FRAM);
- изменение электрического сопротивления ячейки в зависимости от изменения магнитного поля (магнито-резистивная память MRAM);
- изменение фазового состояния вещества и связанного с ним изменения электрических свойств (CRAM или PC Memory);
- использование наномеханических переключателей, имеющих два стабильных положения (NRAM).

Хотя все последние годы исследования шли по всем направлениям, но, по меньшей мере, в двух из них стал просматриваться реальный результат. Однако прежде чем говорить об этих наиболее перспективных технологиях, необходимо хотя бы несколько слов сказать о других исследованиях, о проблемах

и успехах, о достижениях настоящего времени. Пусть там сегодня еще нет серийного продукта, но уже существуют экспериментальные образцы, обладающие привлекательными свойствами. В технических решениях заложен хороший потенциал и есть настойчивое желание добиться результата.

Приблизительно с 2000 года ведутся настойчивые попытки разработать технологию серийного производства памяти на веществах с изменяемым фазовым состоянием. На так называемых халькогенидах на основе селена, серы или теллура. Эти вещества (халькогениды) меняют свое строение при нагревании, переходя из кристаллической фазы в аморфное состояние. В этом состоянии вещество остается после остывания. Но если его вновь нагреть и выдержать в расплавленном состоянии короткое время (около 50 нс), то оно вновь вернется к исходному, кристаллическому виду. Широко известны оптические запоминающие устройства (CD ROM), которые реализуются именно на таких материалах.

Как оказалось, при смене фазового состояния меняются не только оптические, но и электрические характеристики вещества. Проводимость кристаллического перехода отличается от проводимости аморфного в десятки и даже сотни раз. Эту особенность и используют в новых ИС запоминающих устройств. Кроме энергонезависимости привлекательными качествами ЗУ на халькогенидах являются также исключительно высокая радиационная стойкость, нечувствительность к электрическим и магнитным полям, что крайне важно при создании аэрокосмических аппаратов и военной техники. (Напомним, что сбои в работе ИС памяти, вызванные влиянием ионизирующих излучений, — частая причина отказа оборудования в околоземных спутниковых системах. А полеты к другим планетам абсолютно невозможны без надежной электроники.) По этой причине повышенный интерес к исследованиям в данной области проявляют структуры, связанные с космосом и обороной.

Первыми занялись разработками технологии специалисты фирмы Ovonyx. Компании удалось добиться успеха в своих исследованиях и определить основные принципы технологии производства памяти в интегральном исполнении. Патенты на нее быстро

разошлись по свету. Попытки усовершенствовать процессы и получить промышленные образцы таких ЗУ велись в ряде крупнейших фирм (STMicroelectronics, BAE Systems). Конечно же, такой гигант, как Intel, тоже не обошел вниманием указанную проблему, но он, впрочем, принимает участие в разработках вообще всех перспективных технологий. Однако удача сопутствовала не всем. Прошли годы, но лишь одна BAE Systems (компания — один из крупных поставщиков электронных систем для вооруженных сил США и NASA), сообщила [14] о начале серийного производства C-RAM (Chalcogenide Random Access Memory). В других компаниях такие ЗУ называют PCM (Phase Change Memory), или OUM (Ovonyx Unified Memory).

Объявленная BAE микросхема, получившая наименование 251A184, с сентября 2006 года выпускается в ограниченных партиях и будет поставлена на поток весной следующего года. Микросхема имеет следующие параметры:

- объем — 4 Мбит,
- организация — 512 К×8,
- питание — 3,3 В,
- длительность цикла при операциях чтения — 70 нс,
- длительность цикла при записи — 500 нс,
- рабочий диапазон температур — military.

Об электрических параметрах фирма практически ничего не сообщает, ограничиваясь общей фразой о том, что ИС имеет низкое потребление.

Временные характеристики C-RAM далеки от рекордных, к тому же длительности процессов записи и считывания не одинаковы. С такими качествами данный тип памяти вряд сможет стать универсальным, зато он способен выдерживать без каких-либо сбоев облучение в 1 Мрад (рад — единица измерения поглощенной дозы излучения, 1 рад = 0,01 Грей), то есть способна работать в условиях космоса и в очагах радиоактивного заражения с высоким уровнем излучения.

Остальным участникам исследований похвастаться нечем, если не считать доклада компании ST на симпозиуме в Гонолулу в середине 2004-го, где они единственный раз продемонстрировали миру чип на 8 Мбит [13]. (Параметры микросхемы разыскать в Интернете не удалось.) Вероятно, технические проблемы, такие как потребляемая мощность, сложности теплоотвода, перегрев соседних ячеек, который наблюдается тем отчетливее, чем больше объем памяти, меньше размеры и чем выше плотность ячеек, пока не удается решить экономичными методами.

Другая технология, в которой использованы самые современные достижения, — память на нанопереключателех, реализуется на углеродных нанотрубках. (Приставка «нано» означает применение прецизионных технологий, в которых размеры основных элементов структуры меньше 100 нм (< 0,1 микрона), а также продукты, в принципах работы кото-

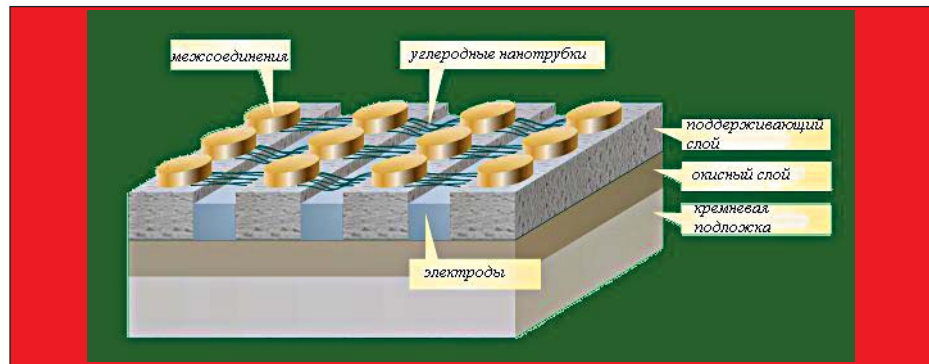


Рис. 1. Структура матрицы памяти фирмы Nantero

рых проявляются законы квантовой физики.) Здесь использованы новые, ранее неизвестные материалы и недоступные решения.

Всем со школьных времен хорошо известны такие структурные формы существования углерода, как графит и алмаз. Углеродная нанотрубка — это новая форма углерода, представляющая собой свернутые в пустотелую трубочку с диаметром в несколько нанометров и длиной в десятки микрон «сеточки», состоящие из атомов углерода. Сеточки образуются структурами, напоминающими пластинчатые молекулы графита. Впервые они были обнаружены японской компанией NEC в 1991 году, в процессе производства фуллеренов. Эти структуры, представляющие собой порошок черного цвета, очень похожий на сажу, интересны не своими размерами и необычной формой, а, прежде всего, особыми качествами. Оказывается, строение нанотрубки определяет ее электронные свойства: они могут быть металлами, полуметаллами или полупроводниками. Так, многослойные трубки имеют свойства, присущие полупроводникам.

Первая ячейка памяти на нанотрубках, разработанная в компании NEC, представляла собой сеть скрещивающихся в пространстве углеродных трубок, часть из них могла приходить в соприкосновение друг с другом, меняя сопротивление цепи. Программирование состояния, то есть запись данных, производилось путем подачи электрического тока к нужному участку, считывание — измерением сопротивления цепи, точнее, сравнением его с некоторым пороговым уровнем. Этот тип памяти обещал прекрасные перспективы в будущем, так как ячейки получались малопотребляющими при записи и энерго-независимыми при хранении данных. Однако, кроме высокой стоимости производства, дело осложнялось техническими проблемами. Технология требовала идентичности свойств нанотрубок и строгого контроля за их пространственной ориентацией. Достичь этого удавалось с большим трудом.

Несколько лет назад о своих первых успехах в данном направлении объявила новая американская компания Nantero (www.nantero.com), которая ведет исследования в партнерстве

с ON Semiconductors, LSI Logic и уже знакомой нам BAE Systems. Nantero удалось найти оригинальное решение проблемы: в новой структуре вся поверхность предварительно обработанной должным образом кремниевой пластины покрывалась углеродными нанотрубками, а затем часть из них удалялась методом обычной литографии. На рис. 1 представлена структура матрицы памяти фирмы Nantero.

В исходном состоянии нанотрубки натянуты и не касаются поверхности расположенных ниже электродов. Расстояние между плоскостью размещения углеродных трубок и поверхностью электродов равно всего 13 нм. При записи информации напряжение прикладывается к электродам и элементам межсоединений. Находящиеся над местом пересечения эластичные трубки прогибаются вниз под действием электрического поля и касаются поверхности электродов, меняя сопротивление цепи (рис. 2). Трубки удерживаются в таком положении под действием сил Ван Дер Ваальса после снятия напряжения [15]. (Некоторая избыточность трубок лишь повышает надежность системы.) Подача обратного напряжения позволяет им вновь распрямиться и разорвать контакт между элементом межсоединения и электродом. Таким образом можно записывать и стирать информацию. Пространственная ориентация

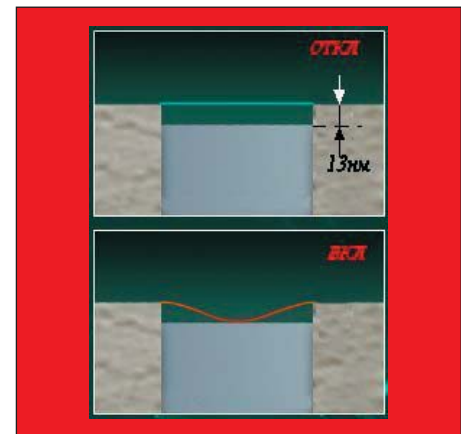


Рис. 2. Замкнутое и разомкнутое состояние нанотрубок в ячейке памяти Nantero

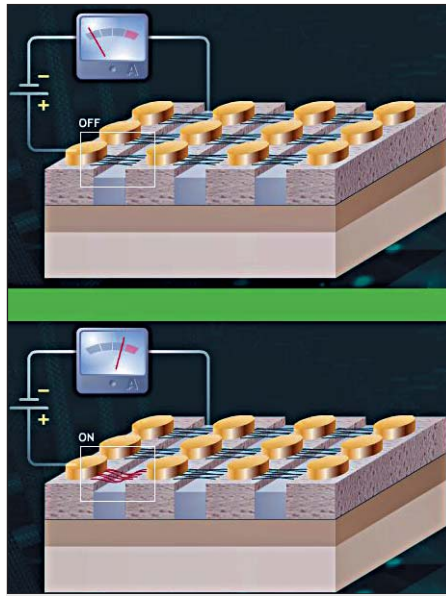


Рис. 3. Считывание информации с ячейки NRAM: «1» — верхний рисунок, «0» — нижний рисунок

трубок и интервал между ними при данной технологии не играют особой роли. Упрощения сказываются на стоимости конечного продукта, снижая ее до разумных пределов.

В процессе чтения измеряется сопротивление цепи между электродом и элементом межсоединения. Если оно мало (если трубки касаются электрода), то полагают, что в ячейку записан «0», в противном случае — «1». При тестировании опытных образцов скорость записи данных в ячейку не превышала 5 нс. На рис. 3 поясняется принцип работы ячейки.

Оказалось, что для выполнения записи и стирания данных не требуется больших токов и зарядов. Память получается очень экономичной. Во всяком случае, лабораторные экземпляры обещают чудесные параметры в будущем: благодаря применению нанотехнологий размеры ячейки должны быть меньше, чем у DRAM, и, следовательно, объемы памяти будут больше. Потребляемая мощность ниже, а скорость доступа выше. Поскольку углеродные волокна имеют высокую прочность, а операции записи и чтения не нарушают структуры углеродных трубок, то срок их службы будет практически неограничен. В отличие от Flash-памяти число циклов записи может быть бесконечным. Радиационная и электромагнитная стойкость NRAM тоже много выше, чем у традиционных кремниевых Flash. (Вероятно, именно эти качества побудили компанию BAE Systems принять участие в разработке технологии.) К сожалению, пока все это не удается воплотить в серийный продукт, имеющий конкурентную стоимость.

Нанотехнологии — это абсолютно новое явление в электронике, и накопленного опыта пока еще не достаточно, чтобы уверенно прогнозировать их применимость в тех или иных областях техники. Однако заложенный в них потенциал очень велик, и по мере раз-

вития и совершенствования нанотехнологии смогут потеснить сегодняшних фаворитов.

Хотя оба типа описанных технологий энергонезависимой памяти (память OVONYX и память на наноперемычателях) довольно интересны и обладают привлекательными качествами, но все же самые большие ожидания связаны с другими исследованиями. В явные лидеры вышли две принципиально разные технологии, позволяющие уже сегодня получать универсальную память с качествами идеальной памяти (энергонезависимость, произвольный доступ, высокая скорость работы). Это ферроэлектрическая (FRAM) и магнито-резистивная (MRAM) технологии.

Память FRAM и MRAM

В России хорошо известна только одна из них — FRAM. В статьях [1] и [2] уже описывались принципы работы и структура ячеек памяти, поэтому лишь кратко напомним суть дела. Основа FRAM — конденсатор, представляющий собой две пластины с тонким слоем сегнетоэлектрика между ними. (Сегнетоэлектрики — группа соединений, обладающих способностью при приложении к ним электрического тока изменять свои физические свойства. В ряде случаев, после прекращения воздействия, изменения в материале сохраняются, что позволяет использовать этот класс соединений в качестве носителя информации в запоминающих устройствах.) Принцип работы запоминающей ячейки FRAM (рис. 4) основан на перемещении атома сегнетоэлектрика в кристалле в одно из двух стабильных положений под действием электростатических сил внешнего электрического поля. Приложенный к обкладкам конденсатора потенциал поляризует вещество, и направление поляризации представляет собой двоичную информацию, хранящуюся в ячейке. Следовательно, его состояния могут быть использованы для записи логической переменной со значениями «0» или «1». Такой эффект известен довольно давно, и вещества, в которых он ярко проявляется — тоже.

За многие годы разработки и совершенствования о FRAM успели узнать во всех концах планеты. Производятся и поставляются несколько десятков типов ИС с различным

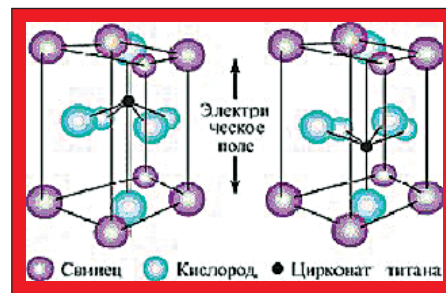


Рис. 4. Принцип работы сегнетоэлектрической памяти FRAM — поляризация вещества внешним электрическим полем

объемом, интерфейсом и напряжением питания. Разработчики быстро оценили достоинства интересной новинки. Микросхемы, выполненные по этой технологии, продаются на нашем рынке примерно с 2002–2003 гг.

В России популяризации новых технологий в большой степени способствовали отечественные дистрибьюторы. Так, продукция компании Ramtron — ведущего разработчика, держателя патентов и всяческих ноу-хау по технологии FRAM, как мне кажется, стала хорошо известна благодаря активной рекламной кампании, проводимой фирмой «Элтех». (Нужно сказать спасибо сотрудникам этой компании, пропагандирующим самые современные технологические достижения.) В стране возник и стал нарастать спрос на данный тип энергонезависимой памяти. Заметим, что постепенно интерес к данным ИС стали проявлять и другие отечественные дистрибьюторы. Во всяком случае, сегодня, при попытке отыскать, например, ИС FM24C64 (Ramtron), такие специализированные поисковые системы, как www.efind.ru, www.e7e.ru, www.kazus.ru, www.iclogic.com, www.rel.ru, www.ictop.com, выдают десятки адресов фирм, предлагающих такую память.

Что же, можно порадоваться за отечественных инженеров-электроников — они не отстают от мирового прогресса (за что еще раз спасибо фирме «Элтех»!). Впрочем, хотя FRAM делает не одна компания, о продукции других производителей «Элтех» скромно умалчивает. Компания стала дистрибьютором фирмы Ramtron и, видимо, не заинтересована в продвижении на рынок конкурентной продукции. Остальные же поставщики электронных компонентов почему-то почти ничего не сообщают ни о микросхемах иных производителей, ни о достижениях на других направлениях.

А ведь есть и другая технология (MRAM), пожалуй, не менее перспективная. Она столь же активно не пропагандируется никем. Возможно, тому есть свои причины и основная из них — недостаточно широкий (пока еще) спектр выпускаемых продуктов. Новых ИС MRAM буквально единицы, и, значит, выбирать пока не из чего, тогда как FRAM производится в десятках модификаций несколькими компаниями.

Порой, читая в отечественной периодике статьи о достоинствах FRAM, приходишь к мысли, что мировой выбор в технологиях производства энергонезависимой памяти уже сделан и остальные исследования свернуты. Но так ли это на самом деле? Сомнительно...

Исследования по технологии производства MRAM ведут такие известные компании, как IBM, Infineon, Motorola (Freescale), Toshiba, NEC, Supress. Все они — весьма серьезные фирмы на рынке электроники, и подозревать их в легкомысленной трате денег на бесперспективные исследования не стоит. По мнению специалистов компании Northen Lights semiconductor Corp. [9], MRAM обладает

Говоря о сегнетозлектрической памяти, следует иметь в виду, что запоминающие устройства, основанные на этом эффекте, существуют в двух исполнениях: давно известном «классическом» варианте, с реализацией в виде традиционных полупроводниковых ИС, и в варианте на тонких полимерных пленках (PFRAM), который может быть исполнен в изделиях произвольного вида — плоских, цилиндрических, кубических, жестких или гибких. О первом из двух видов технологий сказано уже достаточно. Второй вариант пока малоизвестен, но обладает хорошим потенциалом.

Полимерный сегнетозлектрик разработан специалистами шведской компании Opticon и передан для дальнейших исследований в дочернюю фирму Thin Film Electronics. Этот полимер может наноситься на подложку любого вида, например, на пленку, заключающую в себе «тонкопленочные транзисторы», подобную той, что используется в TFT LCD-мониторах и телевизорах. Принцип работы тот же, что и в «классической» технологии: прикладываемое напряжение поляризует молекулу полимера, находящуюся на пересечении столбцов и строк в матрице памяти, а сенсорная схема чувствует вектор поляризации.

Запоминающие устройства на полимерах могут иметь любое исполнение — с однократным считыванием

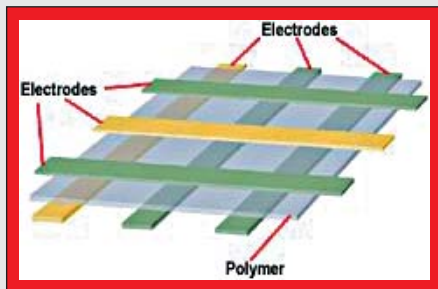


Рис. 5. Структура полимерного сегнетозлектрического ЗУ

ваем данных или многократным обращением. В зависимости от способа выполнения PFRAM, меняется длительность циклов чтения и записи. Она может быть сопоставима с циклами доступа к DRAM или даже быть короче. Иными словами, время доступа может быть около 30-50 нс. В отличие от Flash-памяти, где стирание информации может быть на порядок продолжительнее, чем запись, в PFRAM эти скорости симметричны (см. материалы компании Thin Film Electronics [4]). Число циклов перезаписи в полимерных ЗУ может достигать 100 тыс., то есть сравнимо с ресурсом Flash-памяти.

Полимеры могут наноситься на подложку любым способом — при помощи струйных принтеров, офсетной печатью, флексографией и т. п. Особый интерес представляют ЗУ на пленках (рис. 5). Пленки могут иметь толщину менее 1 мкм и накладываться друг на друга слой за слоем, образуя запоминающее устройство гигантской емкости. Теоретически, простота производства и высокая плотность матрицы памяти, позволят создавать в будущем очень дешевые запоминающие устройства, превосходящие по объему сотню CDROM, но с размером не больше магнитной карты. Производство не требует особых помещений и прецизионного дорогостоящего оборудования. ЗУ могут изготавливаться в «гаражных» условиях и объемы производства могут быть огромными. Если при обычных технологиях объем можно измерять в количестве п/п пластин в минуту, то для полимерных запоминающих устройств счет идет на десятки метров квадратных в минуту. При этом шаг при печати может составлять 50 мкм, а толщина пленки немногим превышает 1 мкм (рис. 6). Последующая резка и сборка также просты и дешевы. Пленки могут просто склеиваться друг с другом или наклеиваться на плату. Металлизация контактных проводников — дело несложное и давно отлаженное. PFRAM ЗУ могут быть очень маленького размера и очень большой емкости. Простота производства позволяет создавать, например, устройства идентификации с уникальным кодом боль-

шой длины и тем самым гарантированно защититься от подделки.

Сегодня делаются попытки производить запоминающие устройства с низкой скоростью переключения — единицы килогерц. Конечно, столь малая скорость ограничивает область использования полимерных ЗУ. Однако им уже теперь может быть отведено достаточно широкое поле применения. В торговле, например, они могут использоваться для идентификации товаров. Запоминающие устройства на полимерах могут иметь любое исполнение — с однократным считыванием данных или многократным обращением. Одноразовые метки с очень низкой стоимостью — давно ожидаемый продукт на многих предприятиях торговли. Они позволят полностью заменить голографические наклейки. В частности, их можно применять вместо акцизных марок, наклеивая на некоторые товары, такие как алкоголь и табачные изделия. Поскольку повторяемость кода практически исключена, то легче будет проконтролировать объемы производства, подлинность и качество товара. Они могут работать как метки с контактным или бесконтактным (RFID) считыванием везде, где их быстрое действие не является критическим фактором. В складских системах, в системах контроля доступа, в бытовой фототехнике (для хранения снимков), в сложных игрушках — повсюду, где главное не скорость, а легкость применения, надежность и очень низкая стоимость.

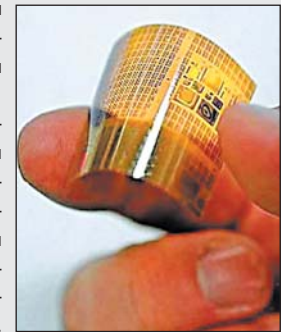


Рис. 6. Пример физической реализации полимерного ЗУ на пленке

рядом преимуществ перед всеми остальными типами памяти, в том числе перед FRAM. (Компания производит ряд специальных изделий, оснащенных встроенной энергонезависимой памятью, в частности микроконтроллеры и RFID-карты.) Достоинства названной технологии, по оценке специалистов компании, отражены в таблице 1.

Возможно, сегодня не все преимущества MRAM очевидны и лишь немногие из них имеют практическое подтверждение. Однако те немногие ИС, которые уже делаются, по некоторым параметрам лучше всех остальных видов энергонезависимой памяти. В первую очередь — это принципиальная неограниченность числа циклов перезаписи и высокое быстродействие. Вот почему нужно помнить, что технология развивается и совершенствуется всего лишь 10 лет и ее резервы сегодня далеко не исчерпаны. Поскольку в нашей стране она пока мало известна, необходимо рассказать о ней подробнее.

Таблица 1. Сравнительные характеристики различных технологий памяти

Свойства	Тип памяти					
	MRAM	DRAM	SRAM	FLASH	EEPROM	FeRAM
Высокая плотность	Да	Да	Нет	Да	Нет	Нет
Энергонезависимость	Да	Нет	Нет	Да	Да	Да
Произвольный доступ	Да	Да	Да	Нет	Нет	Да
Неразрушающее чтение	Да	Нет	Да	Да	Да	Нет
Неограниченное число обращений	Да	Да	Да	Нет	Нет	Нет
Быстрое считывание	Да	Да	Да	Да	Да	Да
Быстрая запись	Да	Да	Да	Нет	Нет	Да
Низкое потребление при записи	Да	Да	Да	Нет	Нет	Да
Цикл чтения	5–70 нс	~100 нс	5–100 нс	~100 нс	~100 нс	50–150 нс
Цикл записи	5–70 нс	~100 нс	5–100 нс	> 1 мс	> 1 мс	50–150 нс
Напряжение записи, В	<5	<5	<5	5	12	<5
Срок хранения данных (без питания), лет	бесконечно	0	0	> 10	> 5	> 10
Стойкость (число циклов записи)	> 10 ¹⁵	> 10 ¹⁵	> 10 ¹⁵	~10 ⁶	~10 ⁶	~10 ¹⁵
Радиационная стойкость	Да	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет*

*Некоторые параметры в этой таблице, видимо, могут быть оспорены, либо они применимы не ко всем разновидностям технологии. Так, компания Selic (<http://www.celis-semi.com>) сообщает, что планирует начать производство 2-Мбит FRAM, обладающих высокой стойкостью к ионизирующему излучению.

За время, прошедшее с момента появления первых лабораторных образцов и до сего дня, были опробованы несколько принципиально различных подходов. В корпорации Honeywell еще в 1997 году удалось создать первый коммерческий образец магнитной памяти, но он оказался существенно дороже и в 10 раз медленнее, чем ячейка DRAM, а, кроме того, плотность элементов в нем была очень низкой. В результате продукт не стал массовым. Как пишут в статье [12], команда, работавшая в Honeywell, сделала ставку на «гигантский магниторезистивный» эффект GMR (Giant MagnetoResistance), открытый более 10 лет назад. Он состоит в том, что в магнитном поле электрическое сопротивление тонкой магнитной пленки немного меняется. Данный эффект находит применение в современных накопителях на жестких дисках, но не подходит для ИС, так как GMR-устройства потребляют довольно большой ток. Ученые из корпорации IBM работали в другом направлении — они попытались создать устройство, основанное на туннельном эффекте, который проявляется в протекании тока через тонкий изолятор, разделяющий два магнитных слоя. Слабый туннельный ток менялся почти на 30% в зависимости от того, в каком направлении действовали поля соседних магнитов (в одном или в противоположных). Исследователям удалось создать матрицу емкостью 14 бит, для хранения каждого из них требовалось всего 200 нм, а время переключения составляло не более 5 нс. Опытные образцы магнитных запоминающих устройств разрабатывались также корпорацией Toshiba. Здесь в основе запоминающей ячейки был многослойный магнитный вентиль, выполненный в полупроводниковой структуре кристалла. Длитель-

ность цикла записи-чтения для этих устройств была примерно такой же, как у ячеек IBM. Теоретически же время переключения спина электрона (а значит, и магнитного момента) в веществе происходит за время, равное единицам пикосекунд. Отсюда становится понятным потенциальное быстродействие, присущее ячейкам памяти MRAM.

Несколько лет потратила на исследования компания Motorola. В процессе работы изучались различные способы реализации ячейки памяти. Наконец, в 2003 году фирма Freescale (в недавнем прошлом — Motorola) сообщила, что готовится к началу серийного производства 4-Мбит памяти. В конце 2005 года поставленную задачу удалось решить, и производство чипов было поставлено фирмой на поток.

В июне 2004 года компании IBM и Infineon, объединившие усилия в разработке технологии MRAM и создавшие совместную компанию Altis Semiconductors, впервые сообщили об опытных экземплярах ИС с объемом памяти 16 Мбит [8]. Позже, 24 января 2006 года IBM опубликовала подробный отчет о достигнутых результатах [6]. В отчете сообщается о параметрах памяти, и они таковы, что привести их нужно обязательно. Объем, как уже говорилось, равен 16 Мбит. Цикл доступа не превышает 40 нс. Структура ячейки памяти — 1Т1МТJ (один транзистор, один магнитный туннельный переход.) Память произведена по 0,18-мкм технологии. Тем не менее представители фирм заявили, что эта память не будет тиражироваться и служит лишь отчетом мировому сообществу о состоянии дел. Специалисты компаний продолжают исследования с целью дальнейшего совершенствования технологии.

14 июля 2006 года компания NEC объявила о том, что ею разработаны две новые структурные ячейки MRAM типа 2Т1МТJ и 5Т2МТJ [7] (2Т1МТJ — два транзистора и один магнитный туннельный переход, 5Т2МТJ — 5 транзисторов и 2 магнитных перехода). Первая из них позволяет MRAM работать с частотой обращения 200 МГц, а вторая — 500 МГц. Огромные скорости доступа! Напомним, на всякий случай, что речь идет об энергонезависимой памяти, а не о какой-нибудь уникальной оперативной памяти типа SRAM. Такие скорости и объемы в других технологиях не достигнуты даже в экспериментальных образцах. (Для сравнения: сегодня максимальный объем серийно производимой памяти FRAM — 1 Мбит. Время цикла в произвольном доступе около 350 нс, то есть меньше 3 МГц.)

Из приведенных сообщений следует, во-первых, что технология жива и интересна многим, во-вторых, что она развивается и совершенствуется, и, в-третьих, полученные результаты подтверждают теоретически предсказанные уникальные, рекордные параметры MRAM. Но прежде чем был получен первый коммерчески интересный продукт, компаниям пришлось потратить много усилий и проверить многие инженерные решения.

Старая или «обычная»

ячейка MRAM, ее недостатки

В первых вариантах ячеек MRAM эффект магнитного туннельного перехода проверялся на сравнительно простой структуре. Магнитное поле, генерируемое проводником тока, вызывало поворот вектора магнитной индукции свободного слоя. Состояние бита («0» или «1») определяется направлением тока генерирующего магнитное поле. Вследствие технологического разброса в массиве ячеек памяти существовали вариации в величине генерируемых магнитных полей. (Структура «старой» ячейки представлена на рис. 7.) Поэтому для уверенного переключения всех ячеек приходилось подавать многократно больший ток, чем это было бы необходимо при оптимальных условиях. В то же время требовалось удерживать магнитные поля на «полувыбранных» элементах массива в состоянии, гарантирующем надежное сохранение битов в неизменном виде. («Выбранные» — это ячейки, находящиеся на пересечении линий строк и столбцов, а «полувыбранные» — ячейки, расположенные в магнитном поле, генерируемом только одним из проводников, при протекании тока только по одной из линий.)

Сопротивления магнитного туннельного перехода (МТJ) для этих двух состояний отличались не достаточно сильно (на 15–30%) С ростом объемов матрицы памяти и уменьшением физических размеров ячейки сокращаются интервалы между проводниками и усиливается влияние магнитного поля на состояние соседних ячеек. Понятно, что никакого эффективного экранирования внутри кристалла не сделаешь. Электромагнит-

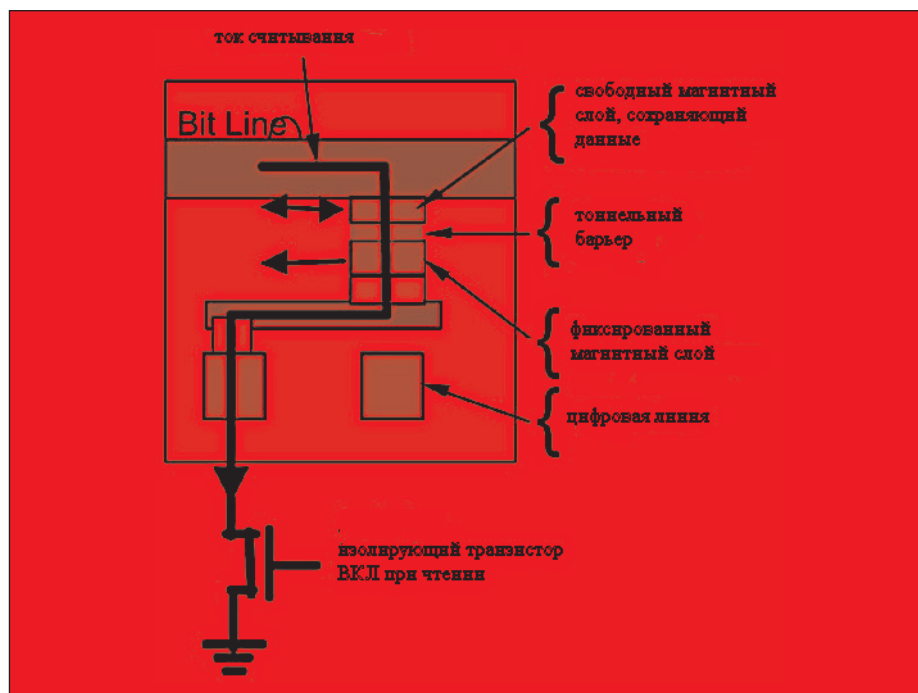


Рис. 7. Ячейка MRAM со «старой» структурой

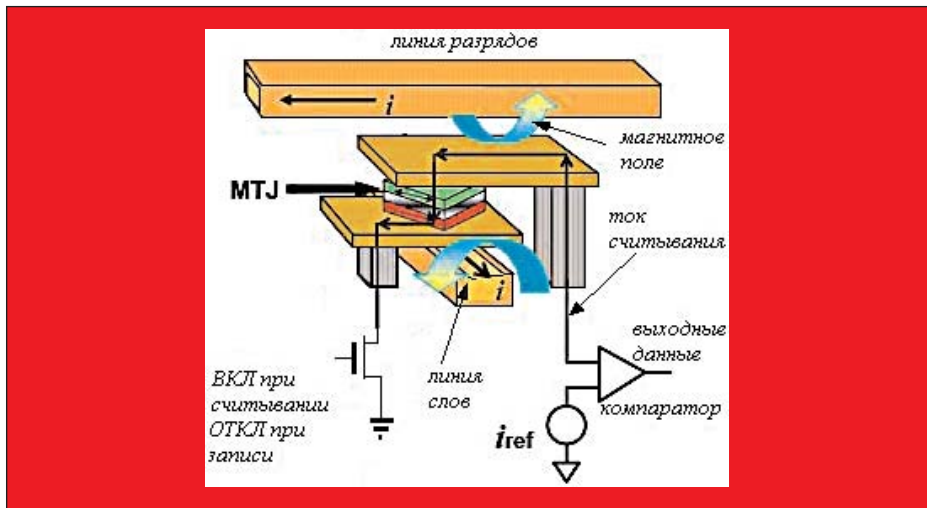


Рис. 8. Новая структура ячейки памяти MRAM

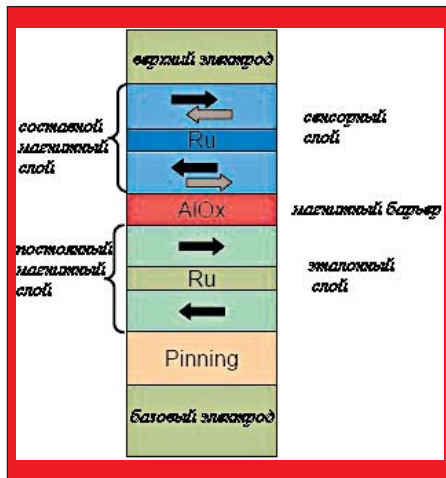


Рис. 9. Структура магнитного туннельного перехода в новой ячейке памяти Freescale

ные наводки приводили к сбоям в работе памяти. Требовалось обеспечить довольно узкое «рабочее окно», внутри которого разряды уверенно бы программировались в нужное состояние при записи и также надежно сохранялись бы в исходном состоянии при «полувыборке». Было нелегко выполнить жесткие требования к качеству материалов, стабильности и повторяемости технологических процессов. В результате конечный продукт имел высокую стоимость.

Новая структура ячейки памяти MRAM от Motorola (Freescale)

В новой структуре ячейки памяти нет «полувыбранных» битов. Благодаря применению новой структуры свободного слоя, иной ориентации бита и специальной последовательности токовых импульсов, состояние разряда в массиве памяти может быть запрограммировано в «переключаемом» режиме, названном в честь его изобретателя методом Савченко». (Савченко — сотрудник компании

Motorola, выходец из СНГ.) Структурная схема новой ячейки памяти приведена на рис. 8. Переключательным новый метод назван потому, что одна и та же токовая импульсная последовательность используется как для записи «0», так и для записи «1». И всякий раз состояние свободного магнитного слоя переключается в противоположное магнитное состояние. Этот тип переключения значительно отличается от «обычного», где магнитный момент свободного слоя просто следовал за состоянием прикладываемого поля.

Режим переключения Савченко основан на уникальном поведении составного антиферромагнитного свободного слоя (SAF), который формируется из двух ферромагнитных слоев, разделенных тончайшей немагнитной прослойкой, связывающей их вместе. Структура этого «слоеного пирога», образующего вместе со стабильным слоем, имеющим неизменный магнитный момент, магнитный туннельный переход, приведена на рис. 9.

Моментно-сбалансированный составной слой SAF откликается на прикладываемое магнитное поле иначе, чем единственный магнитный слой «обычной» ячейки. Под действием поля, генерируемого токовыми линиями, два его антипараллельных магнитных момента будут вращаться примерно перпендикулярно прикладываемому магнитному полю. Импульсная токовая последовательность будет передвигать магнитные моменты слоев, поворачивая их в противоположном направлении по отношению к исходному положению. Она состоит из четырех фаз, в соответствии с которыми вращаются моменты свободного слоя. Процесс поясняется рис. 10.

Очевидно, что каков бы ни был уровень тока, как бы близко ни располагались ячейки в матрице памяти, одиночная линия выборки не сможет переключить магнитный момент свободного слоя в противоположное состояние. Просто потому, что необходимой импульсной последовательности в полувы-

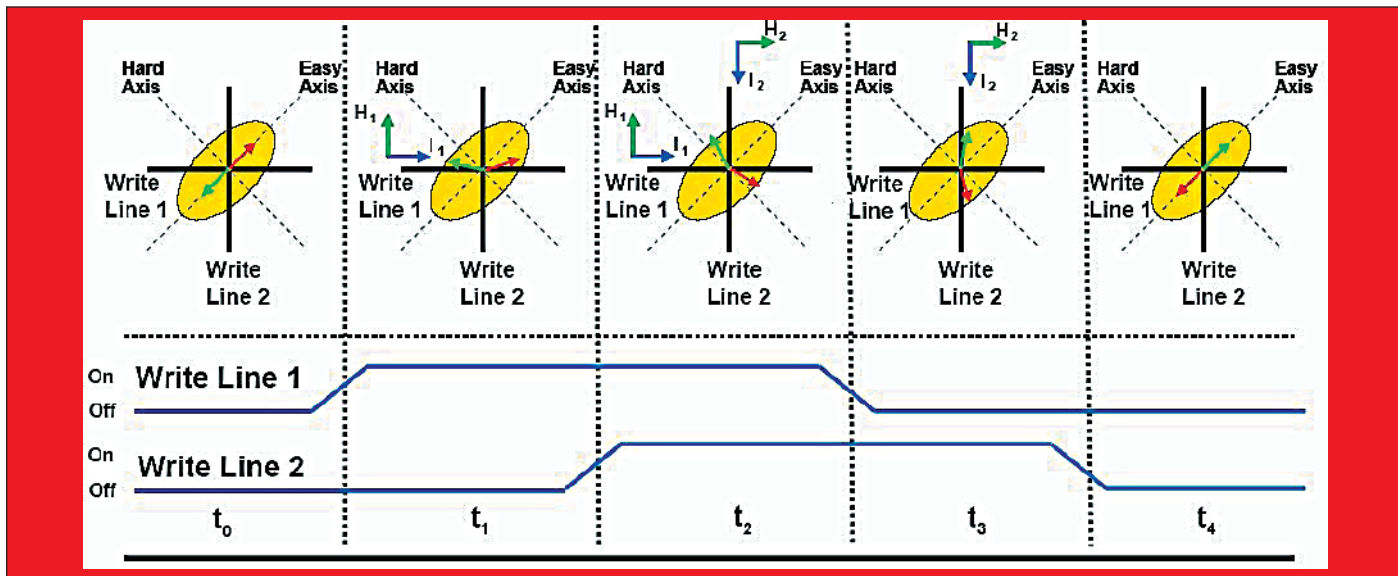


Рис. 10. Временная диаграмма сигналов записи и соответствующие ей повороты магнитных осей в составном сенсорном слое ячейки MRAM (Freescale)

бранных разрядах не бывает. Она имеет место только на адресуемой ячейке, то есть на пересечении линий строк и столбцов, где есть магнитное поле от двух токовых линий. По этой причине существенно возрастает надежность работы ИС, удается полностью избежать нарушений, присущих «старой» структурной ячейке. [17].

Благодаря свойственной ячейке симметрии токовая последовательность обязательно переключает бит, и, следовательно, для выяснения необходимости перепрограммирования (перезаписи) разряда необходимо произвести предварительное чтение. Потребность в таком чтении, однако, практически не сказывается на скорости выполнения операции записи. Оно производится встроенными схемами и абсолютно незаметно для пользователя. В результате, в серийных ИС памяти MR2A16A объемом 4 Мбит, выпускаемых компанией Freescale, время цикла для операций записи и чтения равно 35 нс, что при параллельной загрузке данных (16 разрядов) позволяет достичь темпа накопления данных около 450 Мбит/с. Это очень хороший показатель, превзойти который в сегнетоэлектрической памяти пока не удалось. Заметим, что в ИС FRAM фирмы Ramtron также выполняется лишний цикл при любом обращении к ячейке памяти (цикл восстановления данных). Но в отличие от MRAM это чтение заметно влияет на длительность операций.

В памяти FRAM, с целью ускорения доступа, в некоторых ИС ввели особый режим — страничный доступ. Суть его в том, что в пределах выбранной страницы (в ИС FM20L08T, например, ее объем равен 8 байт) доступ может выполняться в ускоренном режиме, обеспечивая темп до 320 Мбит/с, но при произвольном обращении к памяти темп резко снижается. Это происходит из-за необходимости смены начального адреса и переустановки сигналов управления. В момент снятия управляющих сигналов начинается цикл восстанавливающего чтения, длительностью от 290 до 350 нс (в зависимости от типа операции чтение/запись), что приостанавливает дальнейшие обращения к ИС и еще больше снижает средний темп доступа. В итоге даже в самых быстрых ИС FRAM при произвольном обращении цикл доступа не может быть короче 350 нс. Например, в FM20L08T максимальная скорость записи не превышает 23 Мбит/с (почти в 20 раз медленнее, чем в памяти MRAM).

Исследования по технологии MRAM продолжаются, и их цель — дальнейшее совершенствование структуры ячейки памяти и процессов производства. А совершенствовать есть что: большая потребляемая мощность — один из главных недостатков данной технологии.

Классические решения

Не застыли на месте исследования и в традиционных технологиях энергонезависи-

мой памяти. Flash-память преодолевает все новые рубежи плотности и при этом становится все менее энергоемкой. Пока ни одна из серийных ИС памяти, сделанных по другим технологиям, не может приблизиться к Flash по этим характеристикам. Лидирующая четверка мировых производителей данного типа памяти — INTEL, AMD, TOSHIBA и SAMSUNG — все время совершенствует техпроцессы, переходя ко все более маленьким технологическим размерам. Преодолен рубеж в 90 нм, и начинается подготовка к переходу на 65-нм технологию.

По-прежнему Flash делится на два класса — NOR-память, характеризующуюся сравнительно коротким временем доступа и большими размерами сторов, и NAND-память, которой свойственны меньшие размеры секторов, более высокое напряжение программирования и более длительные циклы доступа к данным. Первый тип памяти чаще применяется для хранения программного обеспечения, а второй — для хранения данных. Второй тип является наиболее массовым и имеет меньшую стоимость. Его основной недостаток — относительно низкая скорость записи. Впрочем, это препятствие можно частично преодолеть посредством встраивания скоростных буферных регистров

Эволюция Flash-памяти четко подчиняется закону Мура и повторяет путь развития DRAM. Размер ячейки непрерывно сокращался и за 10 лет изменился в 30 раз [20]. Структуры ячеек памяти тоже совершенствуются, но характерные для них ограничения и отрицательные черты остаются неизменными. Самым важным технологическим новшеством Flash было изобретение инженерами Intel многоуровневой ячейки памяти, позволяющей хранить в одной ячейке 2 разряда данных. Однако, по мере роста объемов ИС, физические размеры ячейки становятся все более миниатюрными, и для рассеивания оксидных перегородок, изолирующих плавающий затвор, требуется все меньшее напряжение [19]. Это сказывается на надежности памяти и ограничивает число циклов обращения.

Заключение

К сожалению, ни один из разрабатываемых сегодня подходов не лишен недостатков, и пока еще память, изготовленная по новым технологиям, не может полностью и повсеместно заменить «старые» варианты. Имеющиеся сегодня образцы ИС не являются идеальной и универсальной памятью, сочетающей лучшие качества SRAM (высокая скорость работы и произвольный доступ), Flash и DRAM (низкое потребление и очень высокая плотность ячеек). Но мечта многих разработчиков стала понемногу приобретать реальные очертания. Вот только момент ее окончательного воплощения в конкретный продукт откладывается на неопределенное время.

Вероятно, разнообразие требований, предъявляемых к электронной аппаратуре, наложит свой отпечаток и на применимость тех или иных типов энергонезависимой памяти. Будут существовать области электроники, где предпочтение отдается, например, быстродействию, но будут также области, где важнее энергопотребление. Скорее всего, еще долгое время не удастся разработать тот единственный тип технологии, который позволил бы производить память со всеми желаемыми свойствами идеального универсального чипа и при этом имел бы низкую стоимость.

По мнению автора, ни одна из новых технологий по объемам продаж в ближайшие несколько лет не сможет представить серьезной конкуренции Flash. Гигантская емкость, очень низкое энергопотребление и все продолжающееся сокращение времени доступа делают этот тип памяти незаменимым. Тем не менее Flash не сможет подменить собой все остальные типы и стать ни оперативной памятью данных в измерительных приборах, ни программной памятью компьютеров в силу присущих ей ограничений по числу обращений и по возможностям адресации. Она лучше всего подходит для записи и хранения больших и редко обновляющихся массивов информации, и ее не рекомендуется применять в устройствах с частой перезаписью.

Ближайшим конкурентом Flash сегодня является память типа FRAM в традиционном интегральном исполнении, но имеющиеся серийные образцы пока еще сильно отстают от Flash. Причем лучшие образцы ИС в обеих технологиях по объему памяти отличаются более чем в 1000 раз, по удельному энергопотреблению почти во столько же раз, а по времени доступа микросхемы Flash и FRAM почти одинаковы. Единственным преимуществом FRAM — возможность произвольной адресации. Число циклов записи FRAM хоть и велико, но тоже, как и у Flash, конечно. Разрушающее чтение и необходимость в восстановлении данных ограничивают скоростные параметры данного типа памяти. Разумеется, это не означает, что данная технология — тупиковая ветвь развития энергонезависимой памяти. ИС FRAM несомненно найдут свою нишу на рынке электронных приборов хотя бы потому, что они почти идеально подходят для взаимодействия с 8-разрядными микроконтроллерами, поскольку имеют примерно равные скорости работы. К тому же эту память характеризует относительно низкое потребление. (В сравнении с существующими серийными ИС MRAM, например, оно меньше примерно в 10 раз!)

Магнито-резистивная память MRAM быстрее всех остальных конкурентов и не имеет ограничений на число обращений, но энергопотребление и стоимость не позволяют применять ее в массовых товарах. Если бы эра электронных компонентов, начавшаяся с появлением IBM PC, не сменилась эрой мо-

Таблица 2. Параметры серийных микросхем энергонезависимой памяти

Параметр	Flash		FRAM		MRAM		PCM
	Intel	Samsung	Ramtron	Fujiitsu	Cypress	Freescale	BAE Sys.
Наименование	JS29F16G08	K9NBG08U5M	FM20L08	MB85R1001	CY9C62256	MR2A16A	251A184
Объем памяти	16 Гбит	32 Гбит	1 Мбит	1 Мбит	256 кбит	4 Мбит	4 Мбит
Организация	2 Гбит×8	4 Гбит×8	128 кбит×8	128 кбит×8	32 кбит×8	256 кбит×16	512 кбит×8
Интерфейс	параллел.	параллел.	параллел.	параллел.	параллел.	параллел.	нет данных
Длительность цикла записи в страничном режиме	220 мкс/стр.**	200 мкс/стр.**	30 нс *	нет	нет	нет	нет данных
Длительность цикла записи при произвольном доступе, нс.	произвольный доступ возможен, но работа в таком режиме нерациональна		350	250	70	35	500
Длительность цикла чтения при произвольном доступе	25 мкс	20 мкс	350 нс	250 нс	70 нс	35 нс	70 нс
Напряжение питания, В	2,7–3,6	2,7–3,6	3,3	3,3–3,6	2,7–3,6	3,0–3,6	3,3
Число циклов обращения	10 ⁵	10 ⁵	неогранич	10 ¹⁵	10 ¹⁵	неогранич	нет данных
Длительность хранения данных, лет	10	10	10	10	10	10	нет данных
Ток потребления standby, мкА	40	20	25	100	90	9 000	нет данных
Ток потребления в активном режиме, мА	25	25	22	10	60	105	нет данных
Произвольная адресация данных	произвольный доступ возможен, но работа в таком режиме нерациональна		да	да	да	да	нет данных
Радиационная стойкость	низкая		нет данных	нет данных	нет данных	нет данных	высокая
Удельная стоимость бит/\$	низкая		средняя	средняя	высокая	высокая	нет данных

* в пределах страницы

** около 100 нс/байт с учетом подготовительных операций и около 25 нс/байт без них

бильной и портативной электроники с батарейным питанием, то перспективы MRAM виделись бы более радужными, чем теперь. К сожалению, локомотив, тянувший за собой все исследования, поменялся. Сейчас экономичность — одно из важнейших качеств, каким должен обладать претендент на место универсальной памяти. Конечно, MRAM найдется место в аппаратуре и, прежде всего, в стационарных высокоскоростных устройствах с обычными источниками питания, таких как оптоволоконные линии связи, радиолокация, научные исследования в ядерной физике и т. п., но массовым продуктом она пока быть не сможет.

Память PCM или CRAM, как и ЗУ на нанотрубках, еще только начинают свое движение и не успели себя показать, поэтому прогнозировать их судьбу трудно. Мне кажется, тем не менее, что перспективы NRAM все-таки лучше.

Параметры некоторых серийных ИС энергонезависимой памяти приведены в таблице 2.

Литература

1. Валентинова М. Полупроводниковая энергонезависимая память. На перепутье // Электроника. Наука, технология, бизнес. 2003. № 5.
2. Зайцев И. Сравнение новых технологий энергонезависимой памяти // Компоненты и технологии. 2004. № 4.
3. Вихарев Л. Микросхемы энергонезависимой памяти: накануне революции // Компоненты и технологии. 2003. № 9.
4. Материалы сайта компании Thin film electronics <http://www.thinfilm.se/tech/default.aspx>
5. Чеканов Д. Куда направляется флэш? Обзор технологий энергонезависимой памяти: заменяем флэш? Материалы сайта <http://toms-hardware.ru/mainboard/200412011/index.html>

6. Gallagher W. J. and Parkin S. S. P. Development of the magnetic tunnel junction MRAM at IBM: From first junctions to a 16-Mb MRAM demonstrator chip. <http://researchweb.watson.ibm.com/journal/rd50-1.html>
7. Сообщение с сайта компании NEC <http://www.nec.co.jp/press/en/0607/1401.html>
8. Сообщение с сайта IXBT www.ixbt.com/news/hard/archive.shtml?2003/0605
9. Сообщение с сайта компании NL Semiconductors <http://www.nlsemi.com/MRAMcomparison.htm>
10. Нечаев Г. Наступление наноэры. Материалы сайта http://www.interself.ru/info/article.php?article_id=4
11. Сообщение международного комитета International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) <http://www.itrs.net/papers.html>
12. Борзенко А. Технологии памяти для мобильных устройств // Байт. 2002. № 01. <http://www.bytemag.ru/?ID=600652>
13. Сообщение с сайта компании STMicroelectronics <http://www.st.com/stonline/press/news/year2004/t1480h.htm>
14. Сообщение с сайта компании Bae Systems http://www.eis.na.baesystems.com/news_room/new_product_release/c_ram.htm
15. Борзенко А. Нанопамять // PCWeek/RE. 2005. № 13.
16. Презентация вице-президента компании INTEL на сайте университета Мерилэнд http://www.ece.umd.edu/courses/enee759h.S2003/references/Stefan_Korea_022703.pdf
17. Engel B. N., Åkerman J., Butcher B., Dave R. W., DeHerrera M., Durlam M., Grynkewich G., Janesky J., Pietambaram S. V., Rizzo N. D., Slaughter J. M., Smith K., Sun J. J., Tehrani S. A 4-Mb Toggle MRAM Based on a Novel Bit and Switching Method. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 41, N. 1, JANUARY 2005.
18. Эпоха гигантских эффектов. Сообщение сайта http://www.newsit.ru/hardware/id_25928/
19. Нечай О. Флэш-память: не так долговечна, как хотелось бы. Сообщение на сайте <http://www.terralab.ru/storage/269493/>
20. IMST White book. March 2006. Innovative Mass Storage Technologies <http://www.imst.org>