

# Микросхемы энергонезависимой памяти: накануне революции

**Необходимость сохранения кодов программ, различных настроек, констант и другой информации привела к появлению особого типа приборов — постоянной энергонезависимой памяти. Зародившись как громоздкая, требующая мощных источников питания феррит-диодная память, эта группа приборов проделала длинный путь, прежде чем приняла знакомые и привычные сегодня формы и характеристики.**

**Леонид Вихарев**

vleo@atel.ru

Почти полвека назад энергонезависимая память впервые была реализована в виде полупроводникового элемента. Несмотря на то что ее возможности были еще очень скромны, такая память сразу стала пользоваться устойчивым спросом. По мере развития полупроводниковых технологий в целом, совершенствовались технологии и этой группы устройств. Производители в борьбе за рынок стремились превзойти друг друга в повышении качества микросхем. Так было положено начало гонкам длиной почти в полвека, конца которым по-прежнему нет и сегодня. Поскольку до недавнего времени обеспечить должный уровень всех основных параметров в одном устройстве не представлялось возможным, то приходилось искать компромиссное решение. Прогресс в технологии микроэлектронных приборов вывел на рынок множество различных типов устройств памяти. Хорошо известны такие типы, как ROM, EPROM, EEPROM, Flash и NVSRAM.

Очень коротко напомним их основные свойства, отличия друг от друга и сферы применения.

**ROM и EPROM** — микросхемы с однократным программированием содержимого ячеек памяти. Невозможность его изменения — основная причина их ограниченного применения. Используются чаще всего для прошивки кодов программ-загрузчиков микроконтроллеров.

**NVSRAM.** Фактически, это — обычная статическая память оперативного типа, допускающая обращение к произвольной ячейке массива. Число циклов записи и чтения не ограничено. Микросхемы дополнительно оснащены встроенным резервным источником питания, схемами контроля уровня напряжения, переключателями и компараторами. Длительность хранения данных ограничивается возможностями резервного источника питания и составляет в среднем около 10 лет. Емкость памяти может достигать нескольких мегабит. Они необходимы там, где требуется высокая скорость записи данных при условии произвольной адресации. На ее базе выполняются буферные массивы данных в измерительных системах, ОЗУ микроконтроллеров и другие узлы в электронных приборах. Примером такой

памяти могут быть компоненты американской фирмы Dallas Semiconductor (недавно фирма вошла в состав корпорации MAXIM). Аналогичные микросхемы производит также французская компания STMicroelectronics (в недавнем прошлом — SGS Tomson), корейская Hanbit и некоторые другие.

Особняком стоят устройства, производимые фирмой Simtek. В ее микросхемах встроены сразу два типа памяти — SRAM и EEPROM, взаимодействующие друг с другом. В условиях нормального питания прием данных производится в статическую память, откуда затем по мере заполнения содержимое переписывается в перепрограммируемое ПЗУ. При этом обеспечиваются одинаково высокие скорости записи и чтения — около 20 нс. При включении питания выполняется «восстановление данных», заключающееся в перезаписи данных из EEPROM в SRAM за короткий интервал времени. В случаях нарушения питания, а также по его выключению производится внеочередная запись данных из SRAM в EEPROM. В качестве резервного источника питания используется небольшой конденсатор, энергии которого достаточно для выполнения перезаписи. Однако сложность устройства отражается на стоимости микросхем и сдерживает их широкое применение.

**EEPROM.** Там, где не требуется произвольный порядок доступа и частое обновление данных, но значительно важнее малые габариты, низкое потребление и стоимость, там удобнее применять электрически перепрограммируемые ПЗУ с последовательным или параллельным интерфейсом. Запись и стирание данных в них выполняются электрическим образом (в ранних сериях применялось ультрафиолетовое стирание). Микросхемы этой группы обладают сравнительно большой емкостью, высокой скоростью доступа при чтении и крайне низкой скоростью при записи. Число циклов записи хотя и велико, но все-таки ограничено. Перед выполнением записи новых данных, как правило, требуется выполнить стирание ранее записанного массива. Это очень неудобно и к тому же отнимает много времени. Основное применение EEPROM — хранение кодов программ и некоторых констант в микроконтроллерных системах. Производители

ли — десятки (если не сотни) компаний, среди которых есть и отечественные заводы. Из основных следует назвать Atmel, AMD, Microchip, ST, Winbond, Toshiba.

**FLASH** — один из самых современных видов энергонезависимой памяти. Эта группа микросхем не требует полного стирания записанного ранее массива данных перед его частичным обновлением. Flash-память характеризуется большими емкостями и малым энергопотреблением. Процедура записи относительно кратковременна, но редко имеет время цикла меньше 50 нс. (В EEPROM запись выполняется много медленнее, чем во Flash, но известно, например, что SRAM и DRAM, которые, правда, не относятся к энергонезависимым видам памяти, способны работать с частотой записи 200–300 МГц, то есть имеют время цикла записи не выше 3–5 нс. В сравнении с ними Flash-память — медленная.)

Важными свойствами, отрицательно сказывающимися на применимости данной группы приборов, являются невозможность произвольного доступа к данным и принципиальная ограниченность числа циклов записи. Хотя допустимое число циклов перезаписи неуклонно увеличивается из года в год, но все же оно предельно. Что же касается порядка доступа к данным, то он определен технологией изготовления. В микросхемах этой группы чтение и запись данных возможны только массивами. Но для того чтобы не производить перезапись большого фрагмента данных после каждого обращения к прибору, в его состав вводится буферный накопитель, содержимое которого после заполнения переписывается в основную память. Этот буферный элемент не обладает энергонезависимостью, и его данные могут быть утрачены, если питание платы выйдет за допустимые пределы до наступления момента перезаписи. Зато введение этого буфера в схему чипа позволило резко увеличить скорость записи.

В попытках снизить неудобства, связанные с необходимостью группового (страничного, секторного) характера чтения-записи, изготовители вынуждены, совершенствуя технологические процессы, делать сектора все более и более мелкими. Наименьшие размеры страницы памяти имеют микросхемы фирм Atmel и SST. Конечно, такой прием в какой-то мере снижает остроту проблемы, но полностью ее все-таки не решает. Упомянутые ограничения не позволяют использовать Flash в качестве ОЗУ или памяти с произвольным доступом в различных высокоскоростных измерительных устройствах. Применяется Flash в тех же целях, что и EEPROM, а также для хранения не слишком быстро и часто обновляющихся оперативных данных. Используется в автономных измерительных приборах (расходомерах, весах), кассовых аппаратах, цифровых фотокамерах, MP3-проигрывателях, цифровых диктофонах и другой технике. Основные производители — те же, что и производители EEPROM.

**FRAM** — новый тип энергонезависимой памяти. Его основным преимуществом перед всеми ранее упомянутыми видами памяти является сравнительно высокая скорость

записи данных и произвольная адресация. Первые элементы FRAM были созданы корпорацией Ramtron ([www.ramtron.com](http://www.ramtron.com)) еще в 1984 г. Лицензию у нее приобрели все крупнейшие производители памяти, среди которых Hitachi, Toshiba, IBM, Rohm, Samsung Electronics, Siemens (Infineon), Texas Instrument и Fujitsu (именно эта фирма производит на своих фабриках разработанные в Ramtron микросхемы). Некоторыми из них начал промышленный выпуск чипов с пока еще скромными емкостными параметрами. Лидером, естественно, является компания-прародитель, производящая около 30 разновидностей микросхем FRAM.

Дело сдерживается тем, что в них используются совершенно нетрадиционные технологии и неполупроводниковые материалы — в элементах FRAM применяется сегнетоэлектрическая пленка. Эта пленка создается на основе сплавов окислов металлов. Отсюда и проникла в название типа памяти буква «F» — «ферро», хотя железо в их числе и не значит. (**Сегнетоэлектрики** — группа соединений, обладающих способностью при изменении своих физических параметров вырабатывать электрический ток или, наоборот, — при приложении к ним электрического тока изменять свои физические свойства. В ряде случаев после прекращения воздействия тока изменения в материале сохраняются, что делает этот класс соединений применимым для использования в качестве носителя информации в запоминающих устройствах.) Вещества, составляющие материал пленки, плохо сочетаются с традиционными полупроводниковыми материалами и способны загубить не только чип, но производственное оборудование.

Принцип работы запоминающей ячейки FRAM (рис. 1) основан на том, что внешнее электрическое поле перемещает атом сегнетоэлектрика в кристалле в одно из двух стабильных положений. Следовательно, его состояния могут быть использованы для записи логической переменной со значениями «0» или «1».

Основа FRAM — это конденсатор, представляющий собой две пластины с тонким слоем ферроэлектрика между ними. Приложенный к обкладкам конденсатора потенциал поляризует ферроэлектрик. Направление поляризации представляет собой двоичную информацию, хранящуюся в ячейке. При повторном приложении потенциала заряд, затрачиваемый на реполяризацию, будет зависеть от того, совпадает направление электрического поля с тем, которое поляризовало

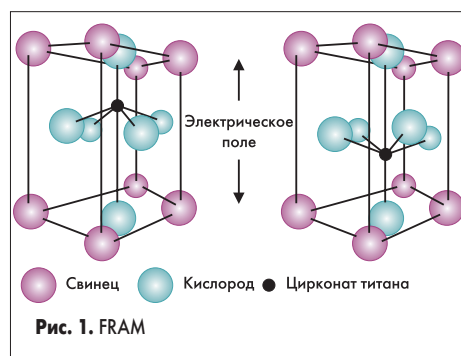
ферроэлектрик в прошлый раз, или нет. Если направление поля не совпадает, то на изменение поляризации потребуется значительный дополнительный заряд. Таким образом, если при повторном наложении потенциала наблюдается электрический ток, то направление не совпадает с предыдущим. По наличию или отсутствию тока перезаряда можно судить о содержимом ячейки.

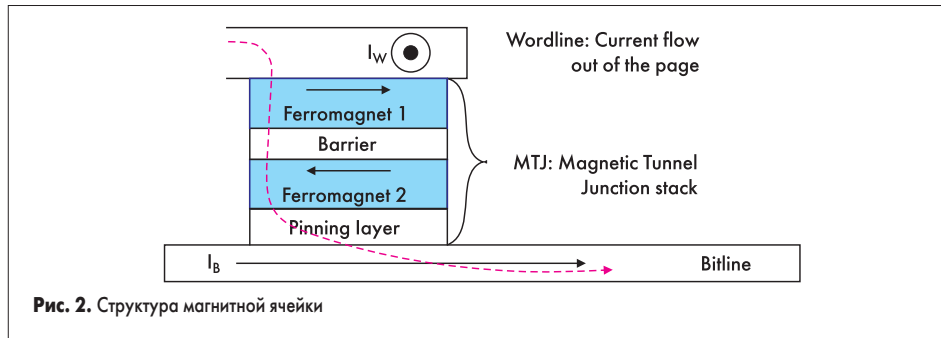
Как и в случае с динамической памятью (DRAM), чтение данных приводит к их разрушению и поэтому информацию нужно восстанавливать после каждой операции считывания. Эта особенность технологии приводит к тому, что цикл обращения к памяти удлиняется. При периодическом обращении к памяти необходим специальный временной интервал для того, чтобы успеть за это время восстановить содержимое прочитанных ячеек. В микросхеме введены узлы, выполняющие такое восстановление. В остальное время хранение данных не требует какого-либо питания микросхемы, что позволяет производить устройства с рекордно низким потреблением.

FRAM пока еще не может сравниться по быстродействию с динамической, а тем более, со статической памятью. Самые быстрые из них имеют время выборки не меньше 70 нс. Хуже того, сегодня потенциальные возможности этих приборов удалось использовать лишь в самой минимальной мере, и они пока еще не достигли параметров лучших образцов Flash-памяти. Так, например, лучшими серийно производимыми микросхемами FRAM сегодня являются приборы объемом  $8 \times 32$  кбит = 256 кбит, что много меньше достигнутого во Flash-технологиях. Здесь, как известно, давно пройдены рубежи в 128 Мбит. Однако в принципе FRAM — сильный конкурент Flash-памяти и EEPROM. Ramtron и Fujitsu уже давно продемонстрировали 1-мегабитный кристалл FRAM и готовятся к производству еще более емких серийных приборов. На основе лицензированной у Ramtron технологии компании Texas Instrument удалось получить образец 64-мегабитного кристалла.

Итак, недостатки данных микросхем: обязательная пауза между циклами чтения-записи, ограничивающая быстродействие памяти и конечное число циклов записи (хотя и очень большое — триллионы циклов). Из этого последнего свойства вытекает принципиальная неприменимость в качестве ОЗУ. Сегодня же у них пока еще малая емкость, сравнительно низкое (по отношению к DRAM и SRAM) быстродействие. Но не будем забывать о таком важном плюсе, как возможность произвольной адресации при записи. До сей поры это качество отсутствовало у всех остальных типов энергонезависимой памяти, кроме NVSRAM.

**MRAM** — еще один новый и современный тип памяти. Основные свойства: произвольная адресация, очень высокая скорость записи, сравнимая со скоростью микросхем SRAM и DRAM, низкое энергопотребление и, конечно, энергонезависимость. Еще одно важное качество — неограниченность числа циклов записи.





Сверхвысокое быстродействие позволяет (впервые в истории электроники!) использовать MRAM в качестве ОЗУ. Представьте себе компьютеры, не требующие никакой предварительной загрузки программ по включению питания. Все необходимые программы и данные не нужно больше перекачивать с диска, так как они остались в памяти после последнего сеанса работы. Диски вообще уйдут в прошлое. Компьютер после включения становится практически сразу и с мгновенно готовым к работе. Тоже произойдет и сотовыми телефонами, которых на планете «расплодилось» уже несколько сотен миллионов штук. Все записи номеров, все установки будут готовы к использованию мгновенно. Отныне никакие результаты измерений не будут утрачены при внезапном отключении питания. Эта память войдет во все типы приборов, начиная с тестеров и заканчивая огромными томографами ЯМР.

К основным достоинствам нового типа памяти относятся также малое энергопотребление, низкая стоимость и высокая плотность элементов (ячеек хранения). Более того, разработчики утверждают, что технологический процесс для производства MRAM проще и дешевле, чем для DRAM, а кроме того, не требует экзотических материалов.

Как MRAM устроена? Все атомы в ферромагнитном материале ведут себя подобно тонким магнитам и реагируют на внешнее магнитное поле, пытаясь выстраиваться в соответствующем направлении. Являясь ферроэлектрическим материалом, они выстраиваются в домены, в которых все атомарные магниты ориентированы в одном направлении и вместе создают большой магнит. Запоминающий элемент представляет собой «сэндвич», в котором слой магниторезистивного материала заключен между двумя слоями ферромагнетика. Свойство, заключающееся в способности изменять свою ориентацию только под влиянием магнитного поля, позволяет применять их в качестве идеального энергонезависимого запоминающего элемента. Из нескольких возможных подходов

к изготовлению магниторезистивных приборов исследователи фирмы Motorola выбрали соединение магнитным туннелем как основу своей магнитной ячейки. Это соединение состоит из двух магнитных слоев, разделенных тонким слоем изолятора-диэлектрика. Но в туннельном соединении оксид имеет толщину меньше чем в 2 нм, и некоторые электроны могут проникать сквозь него из одного ферромагнитного слоя в другой.

Будем считать, что когда магнитные моменты доменов в двух слоях ориентированы в одном направлении, то элемент имеет значение «0», а когда в противоположных — «1». Обращает на себя внимание и тот факт, что для управления элементом памяти в принципе достаточно управлять магнитным моментом только в одном из ферромагнитных слоев, а во втором слое оно может оставаться постоянным. Если приложить внешнее магнитное поле, то все домены сориентируются в его направлении. (Это внешнее магнитное поле образуется при протекании тока по проводнику, что известно всем еще из школьного курса физики.) Если поле снять, то они останутся в данном положении. Если теперь приложить поле в направлении, противоположном первоначальному, то домены перевернутся.

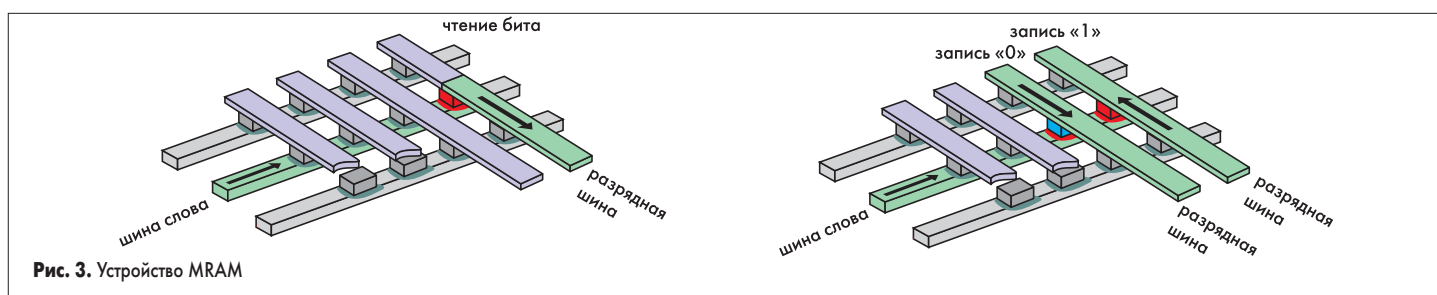
Проводимость магниторезистивного слоя, как известно, зависит от магнитного поля, в которое он помещен. Внутри запоминающего элемента MRAM сопротивление находящегося в нем магниторезистивного материала будет определяться ориентацией магнитных моментов ферромагнитных слоев. В одном из магнитных слоев домены фиксированы в одном направлении. В другом слое они в ответ на воздействие внешнего поля могут быть развернуты в противоположном направлении. В результате они могут быть либо параллельны, либо антипараллельны элементам фиксированного слоя. Эти два состояния запоминают «1» или «0».

В отличие от магнитных лент или жестких дисков компьютеров здесь нет считывающих головок и принцип работы здесь другой. В MRAM при чтении производится измерение

сопротивления изолирующей прослойки между двумя магнитными слоями. При считывании транзистор включается и измеряет туннельное сопротивление в ячейке памяти, которая изолирована от остального массива. Если два магнитных слоя параллельны, то сопротивление низкое, если они антипараллельны — оно высокое. Отсюда разница в протекающих токах. Но не нужно вводить в схему АЦП, так как достаточно определить в выборе одного из двух возможных состояний. В 1-мегабитном приборе фирмы Motorola такое сравнение выполняется для одного эталона на каждые 64 ячейки. Совпадение направления с направлением эталонного слоя определяет, будет ли это сопротивление высоким или низким. Данные записываются в ячейку путем подачи тока по двум проводникам: битовой (разрядной) линии, которая проходит через магнитное туннельное соединение, и цифровой линии, которая проходит над ними.

В предлагаемых на сегодняшний день решениях на базе MRAM для записи данных используется массив взаимно перпендикулярных шин, в точках пересечения которых размещены запоминающие элементы (рис. 3). При этом изменение состояния элемента возможно только при одновременном прохождении тока через обе пересекающиеся его шины. Наиболее распространенный метод выборки запоминающего элемента для считывания информации из памяти MRAM основан на применении полевых транзисторов. При подобном подходе размер ячейки памяти, которая будет состоять из описанного выше запоминающего элемента и транзистора, задается именно последним, поскольку он значительно больше. Таким образом, возможно достичь той же степени интеграции ячеек, что и в динамической памяти. Более того, в технологии DRAM, как отмечают специалисты, размер ячейки даже в большей мере зависит от размера конденсатора, а не транзистора. По этой причине степень интеграции MRAM может быть даже выше. Следовательно, емкость микросхем MRAM-памяти может быть выше, чем у DRAM.

Главный и единственный ее недостаток — отсутствие в настоящее время на рынке серийных микросхем этого типа. Все! Остальное — сплошное преимущество. Немного жаль, конечно, что единственный минус перечеркивает все плюсы. Но светлое будущее электроники уже не за горами! MRAM — отнюдь не призрак, не мираж и не плод воспаленного воображения. Перспектива получить в свое распоряжение практически весь рынок приборов памяти привлекает многие крупные компании. Работы над практической реализацией MRAM ведутся во многих фирмах,



причем довольно давно. В июне 2002 года компания Motorola впервые продемонстрировала миру 1-мегабитный кристалл. В конце октября 2003 года изготовлен чип объемом 4 Мбит, а в 2004 году планируется начать массовое производство MRAM. На пятки компании Motorola наступают исследователи из объединенной группы, созданной компаниями Infineon и IBM, а также NEC и Toshiba.

Два последних типа памяти способны произвести революционные изменения в электронике. Вероятно, MRAM или FRAM в будущем просто вытеснят с рынка все остальные типы памяти. Фирмы-победители могут получить огромные прибыли, поэтому борьба технологий не может закончиться ничем. Вполне могут появиться еще более интересные находки. Ставить последнюю точку в истории развития технологий памяти рано. ■■■■

### Литература

1. С. Добрусенко, Т. Ткачева. Сегнетоэлектрические FRAM-приборы производства Ramtron // Компоненты и Технологии. 2003. № 2.
2. Н. Ракович. Надежность стального капкана. Энергонезависимая память Simtek // Компоненты и Технологии. 2003. № 7.
3. А. С. Такиев. Будущие технологии памяти: FeRAM изнутри. <http://www.3dnews.ru/cpu/feram-memory>.
4. В. Темченко. Время использовать FRAM // Электронные компоненты. 2000. № 1.
5. А. Борзенко. MagRAM: последует ли магнитная буря? // PC Week/RE. 1999. № 48.
6. А. Борзенко. Технологии памяти для мобильных устройств. <http://www.bytemag.ru/Article.asp?ID=652>.
7. Сообщение с сайта компании Motorola: [http://www.motorola.com/mediacenter/news/detail/0,,3158\\_2591\\_23,00.html](http://www.motorola.com/mediacenter/news/detail/0,,3158_2591_23,00.html).
8. Сообщение с сайта компании IBM: [http://www.ibm.com/news/hk/2003/06/20030610\\_mram.html](http://www.ibm.com/news/hk/2003/06/20030610_mram.html).