

ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМАЯ ПАМЯТЬ

НА ПЕРЕПУТЬЕ



Уже многие десятилетия полупроводниковая промышленность ищет "универсальную" микросхему памяти, которая была бы дешевой, быстродействующей, маломощной и вдобавок сохраняла бы данные при отключении питания. В последнее время, по мере замены магнитных накопителей меньшими по размерам и потребляемой мощности твердотельными микросхемами памяти, последнему свойству, известному как энергонезависимость, уделяется особое внимание. Несмотря на годы неудач и раздражающе медленного прогресса, промышленность вкладывает все больше средств в разработку альтернативных микросхем памяти. Успешное решение поставленных задач приведет к появлению памяти, способной завоевать прочные позиции на рынке и заменить ДОЗУ, СОЗУ и флэш. Ставка здесь – контроль рынка энергонезависимой памяти, который к 2006 году, согласно прогнозу фирмы Semico Research, достигнет 30 млрд. долл. Вот почему сегодня в области разработки альтернативных микросхем памяти наблюдается "золотая лихорадка". Почти все ведущие производители изучают возможности, по крайней мере, одной новой технологии из более пяти разрабатываемых сейчас проектов. Победителя или победителей, получивших путевку в жизнь, пока определить нельзя. Но следить за развитием событий, конечно, не бесполезно.

В современных компьютерах, автомобилях, сотовых телефонах, мультимедийных смарт-картах используются миллиарды микросхем памяти. Причем в основном это – микросхемы флэш-памяти, важным достоинством которых является энергонезависимость. Но в последнее время внимание разработчиков электронной аппаратуры все больше привлекают новые типы энергонезависимых ЗУ, сопоставимых по быстродействию с ОЗУ (время записи – несколько наносекунд) и выдерживающих практически неограниченное число циклов перезаписи на протяжении многих лет (флэш-память начинает терять данные через 10^6 циклов). Правда, пока они не могут конкурировать с современными достаточно дешевыми и постоянно совершенствуемыми энергонезависимыми типами памяти. Так, флэш, сто-

ившие в 2000 году до 2 долл./Мбайт, в 2003-м продаются по цене 0,3 долл./Мбайт. Но после выпуска восьми поколений флэш-памяти перспективы "светлого будущего" этих микросхем уже не столь радужны, как прежде. Разработчики фирмы Intel, выпустившей первые флэш в 1986 году, считают, что, освоив 90- и 65-нм технологию, на базе существующей архитектуры можно создать еще два-три поколения микросхем этой памяти. Но затем потребуются новые варианты, например схемы с вертикальным набором конденсаторов и других элементов ячейки памяти. Однако такой подход пока не проверен и, вероятно, не дешев. Это, конечно, не значит, что флэш-память находится на стадии вымирания: в 2000 году Intel выпустила миллиардную микросхему флэш-памяти, а в 2003-м надеется одолеть планку в 2 млрд. отгруженных схем. Но удастся ли фирме дойти до уровня в 3 млрд. схем? Очевидно, пока не поздно, необходимо интенсивно искать новые типы памяти.

И поиски ведутся достаточно давно. Одной из первых привлекла внимание разработчиков сегнетоэлектрическая память (FRAM). Несмотря на неудачи на ранних этапах развития, сегодня FRAM уже используются в электрических счетчиках и сетевых серверах, а вскоре найдут применение и в системах управления воздушными подушками автомобилей. Фирма Texas Instruments объявила о намерении начать в 2005 году выпуск чипов сотовых телефонов и других изделий со встроенными FRAM. Изделия разработчика и ведущего производителя памяти этого типа – компании Ramtron – рассмотрены в предыдущем номере журнала¹. Поэтому остановимся на других типах альтернативной энергонезависимой памяти. Это уже достаточно известные типы ЗУ – магниторезистивные ОЗУ (MRAM), полимерная сегнетоэлектрическая память (PFRAM) и так называемые OUM ЗУ².

MRAM

MRAM-технология выглядит весьма многообещающей: теоретически время записи может составить 2,3 нс (на три порядка меньше, чем у самых быстродействующих схем флэш-памяти, и в 20 раз меньше, чем у FRAM), время выборки – 3 нс, или в 20 раз меньше, чем у ДОЗУ. К тому же, число циклов перезаписи этих схем практически не ограничено (много больше 10^{15}). Благодаря малому току считывания (2 мА) MRAM потребляет на два порядка меньшую мощность, чем ДОЗУ. А радиационная стойкость MRAM делает их весьма перспективной заменой СОЗУ, которые по мере уменьшения размеров элементов все больше подвержены мягким отказам. И еще один немаловажный фактор успеха MRAM – в микросхемах памяти этого типа используются те же магнитные материалы, что и в магнитных накопителях, технология которых хорошо отработана. К тому же, MRAM легко изготавливаются поверх кремниевой микросхемы. Таким образом, MRAM

¹ ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2003, №4, с.14.

² ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2001, №5 с.24, № 6, с.24.

сочетают высокую пропускную способность памяти и энергонезависимость при малой потребляемой мощности. Благодаря такому сочетанию важнейших параметров MRAM весьма перспективны для применения в устройствах с батарейным питанием. Карманный компьютер с MRAM-памятью сможет работать как любой домашний прибор и сразу же "оживать" при включении. Еще одно применение MRAM, привлекающее пристальное внимание разработчиков электронных систем, – встроенная память, способная заменить несколько типов ЗУ.

Но мера успеха той или иной технологии – ее стоимость, которая в большой степени зависит от размера ячеек памяти и плотности их упаковки. Вот почему, даже если MRAM смогут стать универсальными устройствами и заменить различные типы памяти, используемые одновременно в современных системах, остается главный вопрос – станут ли они конкурентоспособны и по удельной стоимости в пересчете на бит?

Отличительная особенность ферромагнитных материалов – ориентация магнитных моментов большей части проводящих электронов при воздействии магнитного поля в одном направлении. Это позволяет создавать структуры с двумя магнитными состояниями. Причем магнитное поле, необходимое для изменения направления вектора магнитного момента, невелико. Два-три года назад рассматривали несколько возможных вариантов структуры ячейки магниторезистивной памяти. Сегодня ведущие разработчики MRAM (Motorola, IBM, Infineon, TSMC) остановились на вертикальной структуре с туннельным переходом (MTJ) и с управляющим транзистором (1T/1MTJ) или без него. Туннельный переход образуют два слоя ферромагнитного материала, разделенные чрезвычайно тонким (менее 2 нм) слоем изолятора (обычно оксид алюминия), формирующего туннельный барьер (рис. 1). В 1T/1MTJ-структуре магнитный момент одного слоя неизменен (фиксирован), тогда как у второго слоя он изменяется. Когда векторы магнитных моментов обоих магнитных слоев направлены в одну сторону, сопротивление туннельного перехода (ячейки) минимально и через барьер проходит туннельный ток. Это соответствует логическому 0. Если же векторы магнитных моментов антипараллельны, сопротивление перехода велико и туннельный ток не протекает через барьер. Это – логическая 1. В процессе записи данных в ячейку памяти нужная ориентация магнитного момента "нефиксированно"

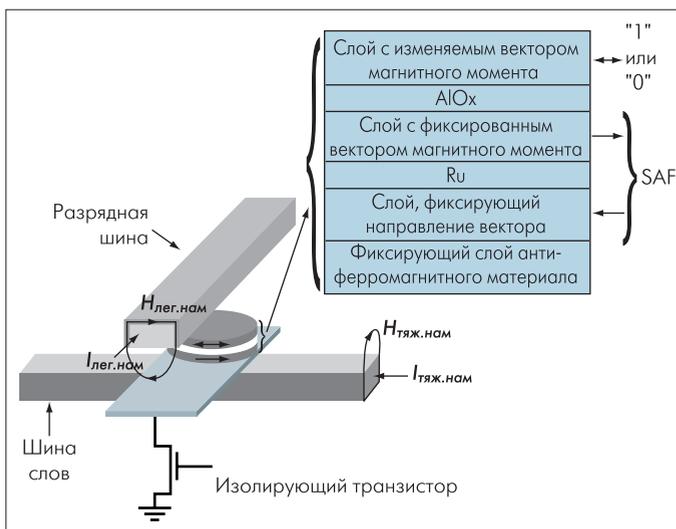


Рис. 1. Ячейка MRAM-памяти (источник: фирма Motorola). При записи изолирующий транзистор отключен, при считывании – включен, и через туннельный переход может протекать ток. Слой антиферромагнитного материала и промежуточный фиксирующий слой обеспечивают неизменность направления вектора магнитного момента второго слоя туннельного перехода

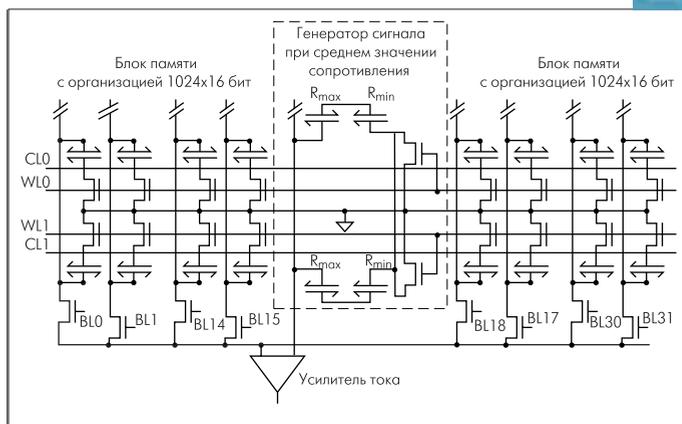


Рис. 2. Схема блока ядра магнитной памяти с генератором опорного тока

го" слоя устанавливается за счет пропуска тока через проходящую над ячейкой разрядную шину и подачи напряжения на соответствующую перпендикулярную ей шину слов. При считывании измеряется ток ячейки, зависящий от ориентации моментов образующих ее магнитных слоев. Таким образом, очевидно, что важнейшая характеристика ячейки MRAM – разность сопротивлений туннельного перехода, или так называемое магниторезистивное отношение, равно сейчас 10–50%. Увеличению этого показателя уделяется большое внимание.

Для развязки шин используется тонкопленочный диод с высоким отношением сопротивлений во включенном и отключенном состоянии. Истинное значение тока (большой или малый) устанавливается в соответствии с током опорной ячейки, присоединенной к шине слов, проходящей под ячейкой. Таким образом, опорная ячейка "обслуживает" несколько ячеек памяти (рис. 2). Данные, хранимые в памяти MRAM-типа, не требуют периодического обновления, как в ДОЗУ. Но ток записи может превышать ток считывания в восемь раз.

На симпозиуме по СБИС 2002 года в Гонулулу фирма **Motorola** – лидер на современном этапе развития магнитной памяти – представила первую опытную микросхему 1-Мбит MRAM с 1T/1MTJ-ячейкой памяти площадью 7,2 мкм². Схема с организацией 64К x 16 бит изготовлена на пластинах диаметром 200 мм по 0,6-мкм технологии с пятислойной металлизацией, двумя слоями поликремния и медными межсоединениями. (Совместимость MRAM-технологии с технологией медных соединительных линий – необходимое условие формирования будущих систем-на-чипе, в которых подобные схемы памяти объединены с ядром контроллера.) Микросхема содержит два блока памяти емкостью 512 Кбит каждый. В свою очередь, каждый блок состоит из 16 секций емкостью 32 Кбит. Время считывания и записи при напряжении питания 3 В не превышает 50 нс.

Для фокусировки магнитного потока, индуцируемого током, на медные соединения наносится так называемый концентратор потока – слой мягкого ферромагнитного материала с высокой магнитной проницаемостью. Благодаря концентрации магнитного поля у туннельного перехода удалось вдвое уменьшить мощность, потребляемую ячейкой. Усовершенствована и опорная ячейка, генерирующая сигнал при среднем (между максимальным и минимальным) значении сопротивления, в результате чего удельная потребляемая мощность в пересчете на бит уменьшается еще в два раза. В итоге потребляемая мощность схемы памяти снижена в четыре раза. При этом опорная ячейка "обслуживает" одну 32-Кбит секцию блока памяти. И еще одну проблему удалось решить разработчикам – получить магниторезистивное отношение 40–50%.

Создание MRAM такой емкости потребовало тщательного контроля процесса ее изготовления. Чтобы уменьшить вероятность загряз-

нения инструментария и используемых материалов, туннельный переход ячейки формируется после создания кремниевых транзисторов и большей части соединительных линий (рис.3). Успешно решена и задача прецизионного контроля толщины диэлектрического слоя, которая с момента начала разработки MRAM в 1995 году рассматривалась разработчиками как одна из важнейших. Разброс толщины диэлектрического слоя, равной 1,5 нм, по 200-мм пластине не превышает 1%. Правда, пока еще нельзя утверждать, что такой прецизионный контроль удастся обеспечить при освоении массового производства новых микросхем, но и данных, которые бы препятствовали проведению этой операции, нет. Motorola планировала начать опытные поставки микросхемы в 2003 году, а в 2004-м приступить к ее массовому производству.

Успехи фирмы в разработке MRAM во многом обусловлены финансовой поддержкой DARPA. В совместном с фирмами STMicroelectronics и Philips Semiconductor исследовательском центре во Франции Motorola ведет работу по созданию микросхемы памяти емкостью 4 Мбит с 0,18-мкм нормами и площадью ячейки менее 1 мкм². С переходом к 0,18-мкм нормам разработчики надеются уменьшить площадь ячейки в будущих 4-Мбит MRAM до 0,7 мкм², а время считывания/записи – до 10 нс. По мнению специалистов фирмы Motorola, если удастся снизить потребляемую мощность в процессе записи и обеспечить производство микросхем по 90-нм технологии с приемлемым выходом годных, MRAM станут хорошим кандидатом для выполнения встроенной памяти (табл. 1).

На пятки Motorola наступают фирмы **IBM и Infineon**, представившие на симпозиуме по СБИС-технологии (июнь 2003 года) опытный образец MRAM-матрицы емкостью 128 Кбит совместной разработки. Матрица выполнена по стандартной 0,18-мкм технологии логических микросхем с трехслойными медными межсоединениями. Площадь ее базовой ячейки памяти составляет 1,4 мкм². Значения времени вы-

Таблица 1. Сравнительные характеристики MRAM, выполненных с различными нормами, и других типов встраиваемой памяти

Характеристика	MRAM			Флэш	СОЗУ	ДОЗУ	FRAM
	0,6 мкм	0,18 мкм	90 нм	90 нм	90 нм	90 нм	90 нм
Объем, Мбит	256 Кбит – 1	1–32	4–256	4–64	4–64	16–256	4–64
Диаметр пластины, мм	150/200	200	200/300	200/300	200/300	200/300	200/300
Быстродействие, МГц	16	50–100	75–125	20–100 (при считывании)	50–2000	20–100	15–50
Эффективность использования матрицы, %	40–60	40–60	25–40	50–80	40	40–60	40–60
Напряжение, В	3,3	3,3/1,8	2,5/1,2	2,5/1,2; 9–12 (внутреннее)	2,5/1,2	2,5/1,2	2,5/1,2
Увеличение стоимости КМОП-технологии, %	–	15–25	15–25	25	0	15	15–25
Площадь ячейки, мкм ²	7,2	0,7–1	0,15–0,25	0,2–0,25	1–1,3	0,25	0,4
Площадь блока, мм ² /Мбит	12,0	2–3	0,3–0,5	0,6–1	1,2–1,7	0,6	0,8
Рабочий ресурс, число циклов перезаписи	>10 ¹⁵	>10 ¹⁵	>10 ¹⁵	>10 ¹⁵ (считывание), <10 ⁶ (запись)	>10 ¹⁵	>10 ¹⁵	>10 ¹³ (считывание/запись)
Энергонезависимость	+	+	+	+	–	–	+

борки и записи одинаковы – 5 нс. Отмечается, что уровень сигнала переключения ячейки контролируется в пределах 2% по всей матрице, что обеспечивает переключение одного туннельного магнитного перехода без "перебрасывания" состояния другого.

По утверждению разработчиков, созданная ими MRAM по рабочему ресурсу на два порядка превосходит микросхемы флэш-памяти. Правда, пока ток записи велик – 6 мА, и поэтому сейчас усилия специалистов обеих фирм направлены на уменьшение толщины туннельного барьера с целью снижения потребляемой мощности микросхемы. Изучаются также пути масштабирования площади ячейки памяти с целью уменьшения ее до менее 0,1 мкм².*

Сейчас специалисты сформированного в конце 2000 года альянса ведут два параллельных проекта по разработке MRAM. Первый предусматривает создание встраиваемой памяти с 1Т/1МТJ ячейками. Второй, получивший название бестранзисторного проекта, предусматривает разработку MRAM с так называемой узловой архитектурой. В этой схеме доступом к единичной ячейке памяти управляют сигналы пересекающихся шин слов и разрядов. Благодаря возможности пакетирования матриц (2x4 или 6x8 бестранзисторных ячеек) схемы памяти такого типа по плотности записи вдвое превосходят MRAM с 1Т/1МТJ-архитектурой. Но пока MRAM с узловой архитектурой – не самая простая с точки зрения воплощения память.

Недавно партнеры объявили, что производство MRAM будет сосредоточено на совместной венчурной фирме Altis Semiconductor во Франции. Сегодня эта фирма закончила проверку 0,18- и 0,13-мкм промышленных технологий с медными и алюминиевыми соединительными линиями, по которым планируется в 2004 году освоить производство опытных образцов 256-Мбит MRAM, которые, возможно, станут лишь демонстрационными устройствами. Промышленные образцы такой памяти появятся, по оценкам Altis, не ранее конца 2005 – начала 2006 года. Кроме того, ведутся работы по освоению 90-нм технологии MRAM. На эти работы фирма Altis намерена затратить 170 млн. евро (~200 млн. долл.). Серьезную помощь в осуществлении планов Altis может оказать решение правительства Франции, стремящегося превратить страну в европейский центр разработки полупроводниковых приборов, выделить фирме 28,3 млн. долл. на трехлетнюю программу освоения промышленного производства MRAM.

*Для справки: сейчас самая маленькая ячейка памяти микросхемы MRAM-типа занимает площадь 0,6 мкм², шеститранзисторная ячейка СОЗУ с 90-нм топологическими нормами – около 1 мкм², ячейка ДОЗУ с теми же размерами элементов – 0,2 мкм². Специалисты Toshiba сообщили о создании ДОЗУ по 65-нм технологии, площадь ячейки которой равна 0,11 мкм².

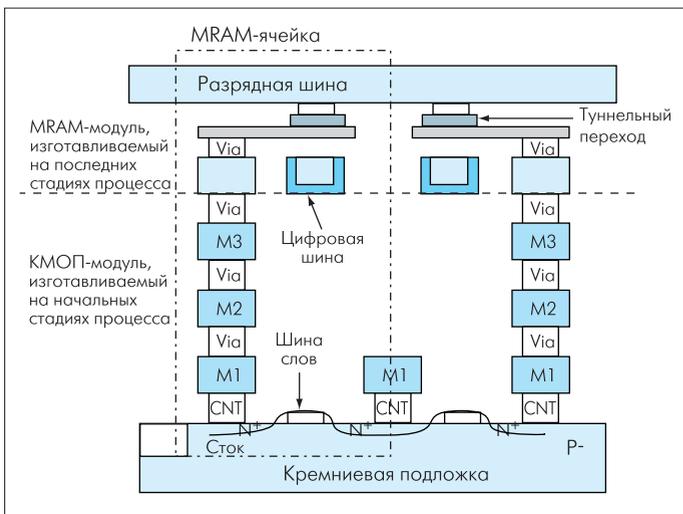


Рис.3. Поперечное сечение MRAM-ячейки. M1, M2, M3 – слои металлизации, Via – сквозные отверстия

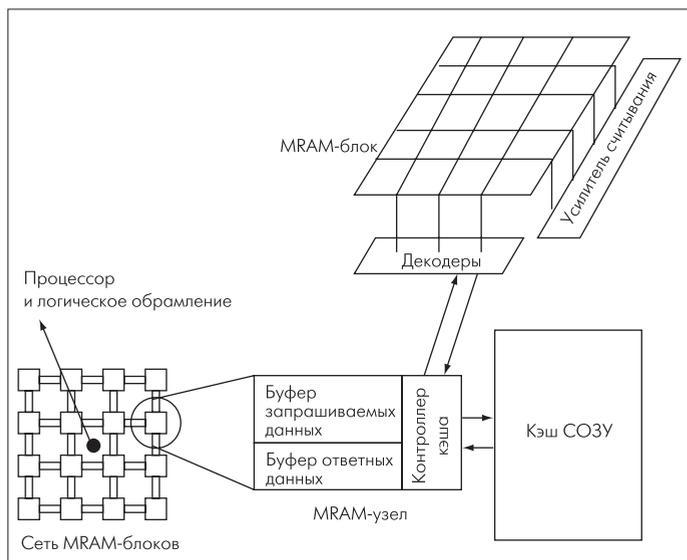


Рис.4. Предлагаемая специалистами фирмы IBM базовая архитектура MRAM-памяти

Совместно с отделением компьютерных технологий Университета шт. Техас на фирме проводилось исследование наиболее приемлемой для дальнейшего совершенствования и освоения в производстве архитектуры встраиваемых MRAM, способных заменить в системе необходимые процессору внешние ДОЗУ. Предложена базовая архитектура, состоящая из независимо выбираемых блоков MRAM-памяти, распределенных по всему чипу и объединенных соединительными линиями, по которым кэш первого уровня обмениваются пакетами данных с контроллерами каждого блока памяти (рис.4). Для записи в кэш данных, хранимых в каждом блоке, кэш-СОЗУ второго уровня разбивается на несколько кэшей меньшего объема, каждый из которых соединен с MRAM-блоком. Эти L2-кэши характеризуются малым временем запаздывания благодаря относительно малым объемам и широкополосным вертикальным каналам связи с MRAM-блоком. Каждый кэш выполняется в активном слое под соответствующим блоком памяти. Здесь же находятся декодеры, усилители считывания и другие активные элементы. Такая архитектура сокращает число конфликтных ситуаций при неудачном обращении в кэш и при одновременном обращении к L2-кэшам обеспечивает большую пропускную способность памяти.

В конце 2002 года фирмы **Toshiba** и **NEC** объявили о решении затратить 10 млрд. иен (83 млн. долл.) на совместную разработку MRAM емкостью 256 Мбайт. Магнитные туннельные переходы будут объединены с элементами КМОП-схемы, выполненными по 0,18-мкм технологии. Ожидается, что опытные образцы MRAM-памяти появятся к концу 2004 финансового года. При этом специалисты NEC ответственны за разработку процессов изготовления и интеграции туннельных переходов, а Toshiba — за улучшение рабочих характеристик ячейки, в том числе уровня выходного сигнала.

Опыт разработки MRAM у обеих фирм немалый. Еще на Международной конференции по электронным приборам 2001 года фирма NEC сообщила о создании функционирующей MRAM-ячейки площадью 0,1 мкм². А специалистами Toshiba предложен туннельный магниторезистивный (TMR) элемент с двойным туннельным переходом, выходной сигнал которого вдвое больше, чем у обычных MRAM. В отличие от MRAM-ячейки с трехслойным туннельным переходом, в схеме памяти фирмы двойной переход сформирован пятью слоями. В центре структуры находится магнитный слой с изменяемым вектором магнитного поля, заключенный между двумя туннельными барьерами, поверх которых наносятся магнитные пленки с фиксированными

ми векторами магнитного поля. При таком построении схемы напряжение на каждом туннельном переходе равно половине напряжения, приложенного ко всей структуре. Сложность создания структуры заключалась в обеспечении высокой точности формирования туннельных барьеров. В разработанной опытной микросхеме TMR-элементы с двойным туннельным переходом изготавливались поверх КМОП-ключей с 0,18-мкм топологическими нормами. Выходной сигнал опытной схемы превышал ±90 мВ (для схемы памяти емкостью 1 Гбит уровень выходного сигнала должен составлять ±100 мВ, или 200 мВ). Все это позволяет предположить, что последние разработки обеих фирм могут привести к созданию в конечном итоге микросхемы магнитной памяти емкостью 1 Гбайт.

В гонку по освоению производства MRAM вступила и фирма **Samsung**, которая на конференции в Гонолулу 2002 года сообщила о создании опытной 64-Кбит микросхемы с ячейкой размером 2,06 мкм², объединенной с КМОП-элементами, выполняемыми по стандартной 0,24-мкм технологии. Особое внимание разработчики уделили проблеме снижения разброса толщины барьерного слоя (в современных MRAM в зависимости от толщины этого слоя сопротивление перехода может изменяться в пределах от 2,5 до 11 Ом). В микросхему памяти включен блок считывания, устанавливающий значение опорного сигнала для каждой ячейки в зависимости от толщины барьерного слоя ее туннельного перехода. Таким образом, каждая ячейка памяти имеет собственную точку отсчета опорного сигнала.

Высокопроизводительное энергонезависимое КМОП 64-Кбит ЗУ с MRAM-ячейками памяти уже выпустила фирма **Cypress** (рис.5). Микросхема CY9C6264 полностью сопоставима с СОЗУ с организацией 8Кx8 бит. Она может также заменять ЭСРПЗУ, флэш-память и FRAM. Значения времени считывания и записи — 70 нс, мощность, потребляемая в рабочем режиме, — 495 мВт, в нерабочем режиме — 825 мкВт. Число циклов перезаписи превышает 10¹⁵, а продолжительность хранения данных — 10 лет. Монтируется микросхема в 28-выводные корпуса типа DIP, SOIC и TSOP.

Разработку MRAM ведут также фирмы Sony и Taiwan Semiconductor Manufacturing Co.

OUM

Самый старый и вместе с тем самый молодой тип энергонезависимой памяти — унифицированная память фирмы **Ovonyx** (OUM). Работа памяти этого типа основана на эффекте изменения фазы исходного материала (халькогенида), получившем название Ovonic-процесса и применявшемся для создания CD- и DVD-дисков с возможностью перезаписи. Разработка такой памяти ведется не одно десятилетие и не только на фирме Ovonyx. Еще в 1970 году, когда Intel выпустила пер-

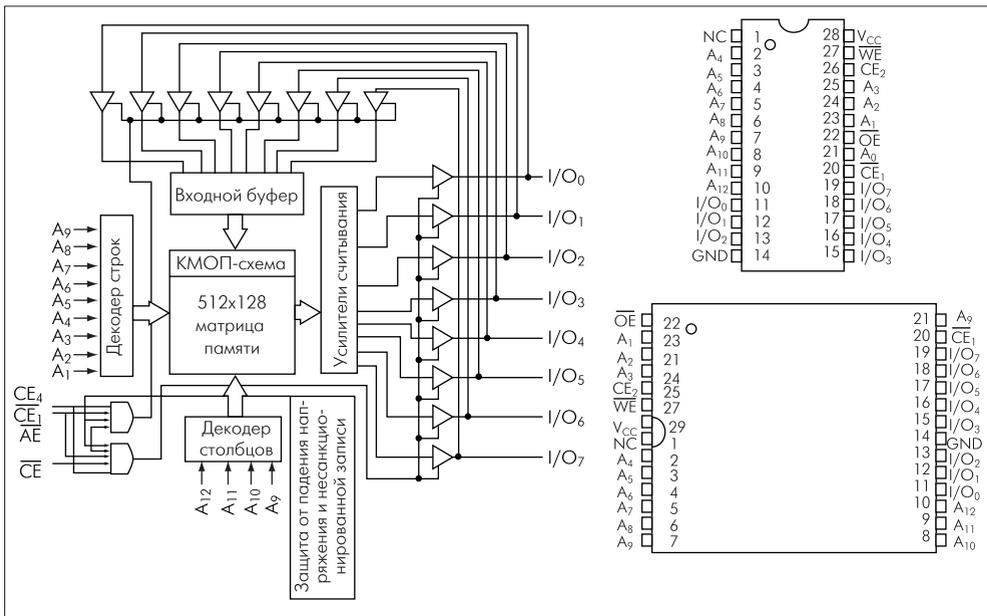


Рис.5. Блок-схема MRAM типа CY9C6264 фирмы Cypress

вую коммерческую микросхему ДОЗУ, в статье нескольких авторов – специалистов фирмы, в том числе и Гордона Мура, этот тип памяти рассматривался как весьма перспективный. Но лишь успехи, достигнутые при разработке оптических дисков с возможностью перезаписи, дали OUM второе дыхание.

При нагреве и последующем охлаждении халькогенид быстро переходит из стабильного аморфного в стабильное кристаллическое состояние. В аморфном состоянии коэффициент отражения материала невелик, а сопротивление велико, в кристаллическом – коэффициент отражения велик, а сопротивление мало. Это и позволяет хранить в памяти такого типа логические 0 и 1. Используемый в современных схемах памяти халькогенид – сплав германия, сурьмы и теллура. Ячейка памяти состоит из верхнего электрода, слоя халькогенида и резистивного нагревательного элемента (рис.6). Так же, как и в MRAM, при считывании данных измеряется сопротивление ячейки памяти, но в отличие от MRAM отношение сопротивлений велико – больше 100. При записи данных халькогенид нагревается до температуры, превышающей его точку плавления, и затем быстро охлаждается, т.е. переходит в аморфную фазу. Чтобы перевести материал в кристаллическое состояние, ячейка нагревается до температуры ниже точки плавления и выдерживается при ней в течение ~50 нс.

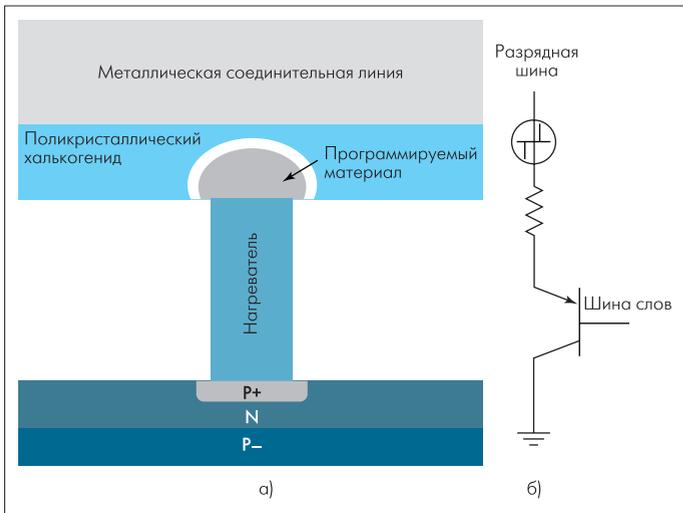


Рис.6. Структура (а) и эквивалентная схема OUM-ячейки памяти (б)

К достоинствам OUM-памяти относятся: простая структура, малая площадь ячейки памяти, возможность неразрушающего считывания и селективной перезаписи данных без стирания, малая потребляемая мощность и большое число циклов перезаписи – более 10^{13} . OUM-матрицы, не требующие при изготовлении высокотемпературных процессов, легко объединять с кремниевыми логическими устройствами.

По мере масштабирования схемы памяти возникает вопрос: насколько близко можно располагать ячейки друг с другом, прежде чем тепло, требуемое для программирования одной ячейки, не станет влиять на соседние ячейки. К счастью, с уменьшением размера ячейки памяти сокращается и количество тепла, необходимого

для ее программирования и, по оценкам специалистов фирмы Intel, в конечном итоге размер OUM-ячейки может составить треть или четверть флэш-ячейки. А как известно, чем меньше площадь памяти, тем ниже ее удельная стоимость. На сегодняшний день наибольший объем памяти OUM-типа (по крайней мере, о котором известно из сообщений разработчика) составляет 4 Мбит. Это совместная разработка фирм Ovonyx и Intel. Напряжение питания схемы равно 3,3 В, минимальный размер элементов схемы – 0,18 мкм. Стремясь скорее освоить промышленную технологию OUM-памяти, Ovonyx заключила соглашения о совместной разработке памяти этого типа с фирмами STMicroelectronics и BAE Systems (Фарнборо, Великобритания). Фирма STMicroelectronics намерена использовать халькогенидную память для замены флэш, а компанию BAE Systems привлекла радиационная стойкость схем памяти этого типа, которые фирма сочла подарком судьбы для космической аппаратуры.

PFRAM

Пожалуй, наибольшую плотность записи данных имеют полимерные сегнетоэлектрические ОЗУ (PFRAM). По оценкам аналитиков фирмы Web-Foot Research, удельный объем такой памяти, отнесенный к одному квадратному сантиметру площади, почти в 20 раз больше, чем у обычной флэш-памяти. Разработки этого типа памяти ведет фирма Intel в содружестве с Thin Film Electronics – дочерней компанией шведской фирмы Optisom, впервые предложившей полимерную память еще в 1994 году. Специалистами Thin Film Electronics получена специфическая группа полимеров с двумя стабильными состояниями поляризации. Это позволяет программировать память путем изменения поляризации пленки сегнетоэлектрического полимера, заключенной между взаимно перпендикулярными металлическими шинами, и обеспечивает энергонезависимость памяти. Таким образом, память не имеет каких-либо механических или подвижных узлов, а для записи данных в ячейке, расположенной в точке пересечения шин, не требуются активные компоненты.

Разработанные на фирме тонкие (толщиной менее 0,1 мкм) пленки полимера можно наносить на любую подложку или поверх друг друга с помощью обычных промышленных процессов, например центрифугированием (а в будущем и с помощью методов струйной печати). Пленка полимера может содержать и тонкопленочные транзисторы схем управления. Для изготовления матрицы памяти требуется



всего три шаблона (против 20–30 при производстве современных ОЗУ). Возможность формирования многослойных структур позволяет получить ранее недостижимый объем памяти и обеспечить оптимальное использование ячеек памяти. Если для функционирования обычной кремниевой схемы памяти объемом 1 Гбит требуется 1,5–6,5 млрд. транзисторов, то для памяти PFRAM-типа такого же объема их нужно только 500 тыс. При этом объем полимерной памяти размером с кредитную карту эквивалентен объему 400 тыс. CD, 60 тыс. DVD или объему устройства, хранящего достаточно данных для воспроизведения в течение 126 лет музыки MPG-формата. При этом увеличение емкости памяти за счет нанесения дополнительных полимерных пленок не влечет за собой существенного увеличения потребляемой мощности (энергия считывания или записи одного разряда информации не превышает 1 пДж).

Считывание данных PFRAM может быть разрушающим и неразрушающим. В первом случае значения времени считывания и записи сопоставимы. Значение времени в зависимости от обработки полимера изменяется в пределах от нескольких наносекунд до нескольких микросекунд. Сейчас усилия разработчиков направлены на уменьшение этого значения. В режиме неразрушающего считывания PFRAM по быстродействию сопоставимо с ДОЗУ. К тому же, архитектура памяти обеспечивает параллельную обработку слов длиной в мегабиты, вместо 64- и 128-бит слов, с которыми работают современные полупроводниковые микросхемы ЗУ. По утверждению разработчиков, благодаря простоте изготовления удельная стоимость чипов памяти в пересчете на мегабит будет столь мала, что они станут одноразовыми изделиями.

Специалисты Intel считают, что PFRAM найдут применение в первую очередь в картах памяти цифровых фотокамер и другом бытовом оборудовании. Но, прежде всего, необходимо решить проблему обработки термочувствительного материала в условиях полупроводникового производства. И на вопрос, когда же начнется массовое производство PFRAM, можно ответить, что при удачном стечении обстоятельств не раньше, чем лет через пять.

PMC

В то время, как FRAM, MRAM, OUM и PFRAM борются за скорейший выход на рынок, на горизонте появляются новые, не менее перспективные, типы энергонезависимой памяти. И одна из них – предложенная учеными Государственного университета шт. Аризона ячейка памяти с программируемой металлизацией (Programmable Metalization Cell – PMC), использующая для записи и считывания информации простой химический процесс. Ячейка, как и многие другие новые типы памяти, имеет многослойную структуру, содержащую твердотельный электролит, заключенный между проводящим слоем химически неактивного материала (например, вольфрама) и тонкой пленкой серебра. Электролитом служит халькогенидное стекло (со-

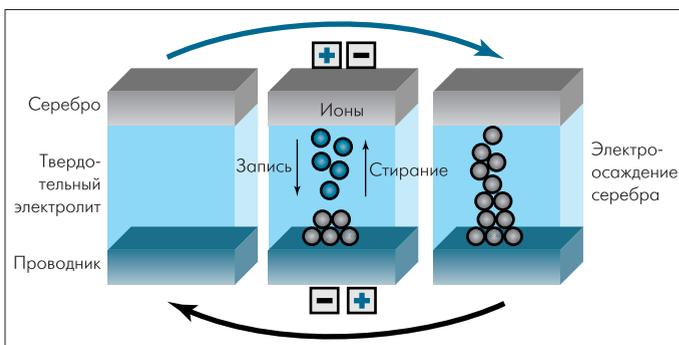


Рис.7. Структура PMC-ячейки памяти

Таблица 2. Характеристики новых наиболее отработанных типов энергонезависимой памяти

Параметр	FRAM	MRAM	OUM
Емкость, Мбит	64	1	4
Коэффициент размера ячейки*	18	10–20	5–8
Рабочий ресурс, число циклов	1016	1014	1012
Напряжение считывания/записи, В	1,5/15	3,3/3,3	0,4/1
Время считывания/записи, нс	40/40	50/50	50/50
Дополнительные операции, необходимые для создания встроенной памяти	2	4	3–4
Производство	Освоено	2004 год	Срок не определен
Основные производители	Fujitsu, Ramtron, Samsung, Texas Instruments	IBM, Infineon, Motorola, NEC, Toshiba	BAE, Intel, Ovonyx, STMicroelectronics

*Кратность квадрату ширины межсоединения, выполненного в нижнем слое металлизации

единение элементов IV или V и VI групп, например серы и селена), способное проводить ионы серебра. Сопротивление такой многослойной структуры велико, но при инжекции ионов серебра они образуют стабильную проводящую цепочку между "обкладками" структуры, и значение сопротивления электролита резко уменьшается на несколько порядков (рис.7). Для инжекции ионов серебра требуется напряжение менее 1 В. При обратном смещении структуры направление ионного тока изменяется, избыточное серебро удаляется из электролита и сопротивление ячейки вновь возрастает. Время переключения из одного состояния в другое не превышает 10 нс. Цикл записи/стирания можно повторять много раз. Значение сопротивления не изменяется при отключении питания, т.е. структура энергонезависима.

Размер ячейки 50 нм, но, по мнению разработчиков, в ближайшее время можно уменьшить его до 10 нм. Операция осаждения халькогенидного стекла совместима со стандартной полупроводниковой технологией. Следовательно, для изготовления новой памяти не требуются какие-либо коренные изменения производственного процесса создания микросхем памяти. Таким образом, PMC-память характеризуется высокими быстродействием и эффективностью, имеет большой рабочий ресурс, проста в изготовлении и по удельной стоимости в пересчете на разряд может быть сопоставима с ДОЗУ. По утверждению разработчиков, уже шесть компаний готовы провести оценку PMC-памяти, а фирма Micron Technologies приобрела лицензию на проведение самостоятельных разработок этого типа ЗУ. По оценкам разработчиков, PMC-память уже к 2006 году сможет найти применение в беспроводных ручных системах. Чтобы этот прогноз оправдался, руководителем разработок, профессором Университета М.Козицким учреждена фирма Axon Technologies.

Как видим, все новые типы энергонезависимой памяти имеют многообещающие характеристики и перспективны для будущих применений (табл.2). Какой или какие из них получат широкое распространение? Очевидно, тот или те, которые окажутся самыми дешевыми, и технология изготовления которых будет совместима с существующими промышленными процессами. Но для получения статистических данных, гарантирующих надежность и высокие параметры коммерческих изделий, потребуется не один год больших усилий.

Electronic Business, Apr. 2003
 IEEE Spectrum ONLine, www.spectrum.ieee.org/WEBONLY/publicfeature/mar03/semi/html
 Proceedings of the IEEE, 2003, v.91,N5, p.703712.
 Electronic Design, July7, 2003
 Материалы фирм Motorola, IBM, Infineon, Cypress Intel, Toshiba, NEC, Samsung, Ovonyx, Opticom.