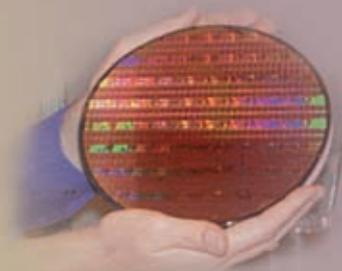


## ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМАЯ ПАМЯТЬ

### КТО ПОБЕДИТ В ГОНКЕ? ЧАСТЬ 2\*



В. Шурыгина

Микросхемы памяти, как автономные, так и встраиваемые, – один из ключевых элементов современной микроэлектроники. Однако по мере уменьшения размеров элементов микросхем памяти и продвижения к «не простому наноуровню» современная полупроводниковая технология сталкивается с множеством фундаментальных и специфических проблем. Поэтому, несмотря на коммерческий успех современных микросхем памяти, полупроводниковая промышленность активно ищет альтернативные типы «универсальной» энергонезависимой памяти с высокими рабочими характеристиками и хорошими возможностями масштабирования ячеек памяти. Острая конкурентная борьба в области встраиваемой памяти и потребность в достаточно дешевых, маломощных, малогабаритных с высоким быстродействием запоминающих устройствах также способствует развитию новых технологий памяти. На сегодняшний день наибольший интерес вызывают такие уже достаточно отработанные микросхемы магнитной памяти, как сегнетоэлектрические и магниторезистивные ОЗУ (Ferroelectric RAM – FRAM и Magnetic RAM – MRAM, соответственно), а также микросхемы памяти с фазовым изменением состояния вещества (Phase Change Memory – PCM). Новые типы памяти готовятся к захвату рынка. Но пока не ясно, какая технология, рассматриваемая сейчас зачастую, как «бумажный тигр», сумеет завоевать потенциально огромный рынок универсальной энергонезависимой памяти, который, согласно прогнозам компании iSupply, к 2019 году может достигнуть 76,3 млрд. долларов.

#### ФАЗОИНВЕРСНАЯ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМАЯ ПАМЯТЬ, РСМ

Один из самых «старых» типов энергонезависимой памяти, на которую сегодня возлагаются большие надежды, – память, выполненная на материале с изменяемым фазовым состоянием, или фазоинверсная память (Phase Change Memory – PCM, PCRAM, PRAM). В памяти этого типа используется свойство халькогенидного стекла (как правило, соединения германия, сурьмы и теллура – GST) при непродолжительном нагреве до температуры свыше 600°C изменять свое стабильное кристаллическое состояние (характеризуемое низким сопротивлением, логическая 1) на столь же стабильное аморфное состояние (с высоким сопротивлением, логический 0). При более продолжительном (~50 нс) нагреве халькогенида до температуры выше температуры кристаллизации, но ниже точки плавления, происходит обратный переход из аморфного в кристаллическое состояние. Для нагрева используется либо ток электрода соответствующей ячейки памяти, либо матрица нагревательных элементов.

Своим появлением фазоинверсная память обязана С.Овшинскому, получившему в 1969 году патент на компьютерную память, выполненную на материале с изменяющимся фазовым состоянием. Но лишь 30 лет спустя, в 1999 году, была образована компания Ovonyx, основная цель которой заключалась в коммерциализации схем унифицированной памяти (Ovonic Unified Memory, OUM) на базе халькогенида. И сегодня компания Ovonyx обладает основными патентами на технологию PCM.

В начале 2000 года лицензии на технологию компании Ovonyx приобрели Intel и STMicroelectronics. В разные годы технологию Ovonyx лицензировали компании Elpida, Samsung, Qimonda, Hynix. А за период с 2003 по 2005 годы заявки на патенты по фазоинверсным ОЗУ подали такие крупные полупроводниковые компании, как Toshiba, Hitachi, Macronix International, Renesas Technology, Elpida Memory, Sony, Matsushita Electric Industrial, Mitsubishi, Infineon Technologies и многие другие.

\* Часть 1 см.: ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2008, №3, с. 84–88.



К достоинствам фазоинверсной памяти относятся малые размеры ячейки, которые могут составлять менее  $10F^{2*}$ , и большее, чем у флэш-памяти, быстродействие. Последнее объясняется не только чрезвычайно малым временем перехода из одного состояния в другое (~5 нс), но и тем, что запись данных не требует стирания хранимых в памяти данных. К недостаткам РСМ относятся приводящие к деградации ее характеристик тепловое расширение GST при записи и миграция металла и других элементов, входящих в состав материала памяти. Но процесс деградации протекает достаточно медленно, и РСМ может выдержать до  $10^8$  циклов считывания/записи (против  $10^5$  для флэш-памяти). Основным недостатком фазоинверсной памяти – большой ток записи (0,5 мА), требуемой для нагрева материала до точки плавления. Правда, с уменьшением размеров ячейки памяти ток записи также уменьшается. И согласно оценкам, минимальный размер элементов ячейки может составлять менее 25 нм. В результате активная площадь ячейки памяти может оказаться много меньше площади управляющего операцией записи транзистора. К тому же процесс формирования ячеек малых размеров достаточно дорог. Поэтому усилия многих изготовителей РСМ или PRAM направлены на увеличение плотности тока записи до более  $10^7$  А/см<sup>2</sup> (против  $10^5$ – $10^6$  А/см<sup>2</sup>, обеспечиваемого обычным транзистором или диодом, также применяемым для управления операцией записи).

Сегодня для получения требуемой плотности тока разрабатываются две «базовые» структуры. Одна, предложенная компанией Samsung, предусматривает формирование планарного РСМ-элемента, расположенного между выводом и его контактом, диаметр которого больше, чем у вывода. В такой структуре ток заданного уровня и продолжительности обеспечивает хорошую кристаллизацию пленки. Во второй структуре, используемой компаниями Intel и Ovonyx, элемент формируется в отверстиях, вытравленных в одном или более диэлектрических пленках. Его размер задается боковыми фиксирующими прокладками. И здесь площадь контактов различна, что позволяет получить большую плотность тока записи при меньшем его значении.

Ряд изготовителей используют нагреватели. Так, компания Samsung предлагает применять в каждой ячейке памяти резистивный нагреватель, управляемый специальной схемой.

Что же достигнуто на сегодняшний день в области разработки фазоинверсной памяти?

До недавнего времени единственным поставщиком фазоинверсной памяти была компания BAE Systems – один из крупнейших производителей электронных систем для вооруженных сил США и НАСА. С сентября 2006 года BAE выпускает ограниченные партии микросхемы РСМ, называемой ком-

панией C-RAM (Chalcogenide Random Access Memory), типа 251A184.

Микросхема имеет следующие параметры:

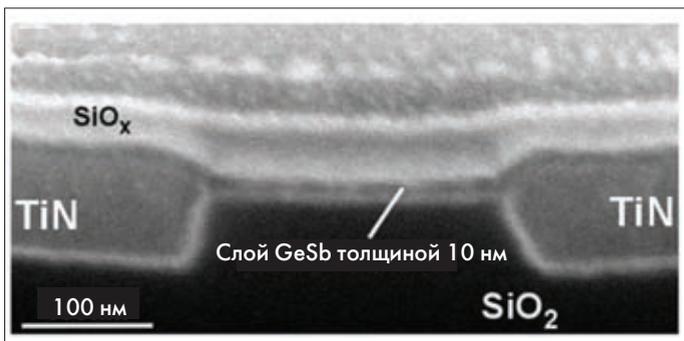
Объем памяти.....	4 Мбит
Организация.....	512K × 8 бит
Длительность цикла при чтении .....	70 нс
Длительность цикла при записи .....	500 нс
Напряжение питания .....	3,3 В
Диапазон рабочих температур .....	-55...125°C

Память без каких-либо сбоев выдерживает облучение в 1 Мрад, т. е. способна работать в условиях космоса и при высоком уровне излучения. Поставляется в 40-выводном плоском корпусе.

Большое внимание фазоинверсной памяти уделялось на Международной конференции по электронным приборам (International Electronic Devices Meeting, IEDM) 2006 года, где компании-разработчики представили результаты своих, правда, пока исследовательских работ. Так, специалисты Hitachi и Renesas сообщили об использовании промежуточной контактной прослойки пятиоксида тантала диаметром 180 нм, расположенной между фазоинверсным GST-слоем и выводом, соединяющим этот слой с управляющим МОП-транзистором. Прослойка малой толщины предотвращает отвод тепла че-



\* F – проектная норма, представляющая собой ширину междоудения, выполненного в нижнем слое металлизации.



**Рис. 1. Система вихрековой дефектоскопии ELOTEST PL500 для сопровождения производства, например для быстрой сортировки материала и дефектоскопии с высоким разрешением**

рез вывод и тем самым способствует быстрому нагреву GST-слоя. Кроме того, благодаря отличной адгезии пленки Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> с фазоинверсным материалом возрастает прочность GST-слоя на отрыв. Уменьшению тока записи способствует и контролируемое легирование GST-слоя кислородом. В результате ток записи новой памяти составляет всего 100 мкА при напряжении питания 1,5 В. Разработанная ячейка памяти будет реализована в перспективных встраиваемых микроконтроллерах следующего поколения для хранения программ и данных.

Специалисты IBM, Macronix и Qimonda (бывшее полупроводниковое отделение фирмы Infineon Technologies) на конференции IEDM 2006 сообщили о создании памяти PRAM-типа, превосходящей по быстродействию традиционную флэш-память в 500 раз при вдвое меньшем потреблении электроэнергии. Размер ячейки – 3×20 нм. В качестве материала с изменяемым фазовым состоянием использован сплав германия и сурьмы с добавлением примесей (рис.1). Правда, массовое производство новой памяти IBM планирует лишь на 2015 год.

На той же конференции компания Samsung подробно описала процесс изготовления PRAM емкостью 512 Мбит, выполненную по 90-нм технологии. Микросхема памяти имеет трехмерную структуру с вертикально расположенными управляющими диодами. Площадь ячейки памяти равна 0,0467 мкм<sup>2</sup> (наименьшая площадь для памяти, работающей без помех от соседних ячеек). Отмечалось также, что для изготовления микросхемы требуется на 20% меньше операций, чем при производстве флэш-памяти NOR-типа. Компания Samsung планировала начать поставки микросхемы в 2008 году.

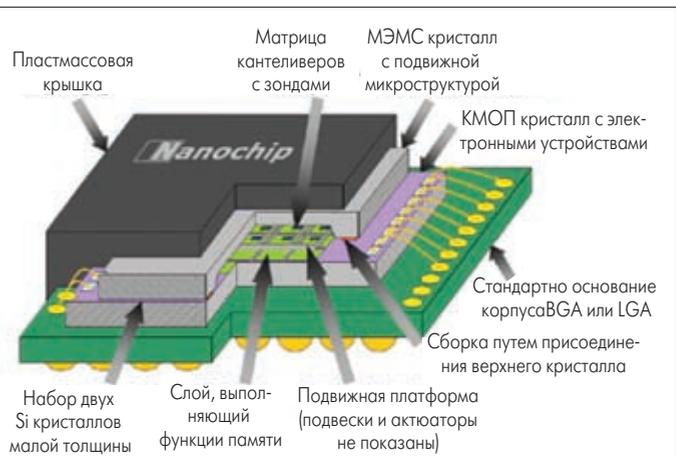
Но, похоже, компании Intel и STMicroelectronics, не объявлявшие график представления разрабатываемых PCM-микросхем, опередили Samsung. Intel и STMicroelectronics с 2003 года ведут совместную программу JDP (Joint Development Program) по разработке фазоинверсной памяти. В 2006 году они объявили о создании PCM емкостью 128 Мбит (кодовое название Alverstone), выполненной по 90-нм технологии. Размер ячейки памяти равен 12F<sup>2</sup>, ток записи – 400 мкА, ресурс – 10<sup>8</sup> циклов считывания/записи, срок хранения данных – более 10 лет. Диапазон рабочих температур составля-

ет -40...85°C. Микросхема памяти предназначена для замены флэш-памяти NOR-типа.

В первой половине 2007 года Intel и STMicroelectronics начали поставлять заказчикам опытные образцы этой памяти для оценки и тестирования. Производители сотовых телефонов и встраиваемых систем познакомятся с достоинствами PCM и смогут оценить преимущества, достигаемые при замене традиционных запоминающих устройств новыми. Отзывы потребителей компании-разработчики PCM используют при создании будущих поколений PCM.

Intel планировала начать массовое производство микросхемы PCM в конце 2007 года, тогда как STMicroelectronics намерена выпускать микросхемы памяти после освоения 45-нм технологии их производства. Производство схем фазоинверсной памяти будет передано новой полупроводниковой фирме Numonux, документы о создании которой Intel, STMicroelectronics и частной компанией Francisco Partners были окончательно подписаны в марте 2008 года.

Но это не единственный результат совместных работ Intel и STMicroelectronics. На Международной конференции по твердотельным схемам (ISSCC) 2008 года они сообщили о создании двухуровневой микросхемы фазоинверсной памяти емкостью 256 Мбит. Разработчикам удалось зафиксировать два дополнительных устойчивых состояния между кристаллической и аморфной фазами GST-материала. Для нагрева ячеек памяти применяется миниатюрный нагреватель, управляемый специально разработанными алгоритмами, позволяющими регулировать количество тепла, получаемого каждой ячейкой в отдельности. При этом, как утверждают авторы, характеристики микросхемы – быстродействие и размер – соответствуют требованиям, необходимым для внедрения ее в производство и коммерциализации. Многоуровневая микросхема фазоинверсной памяти с управляющими биполярными транзисторами выполнена по 90-нм технологии с девяти-слойной медной металлизацией и межслойным диэлектриком с низкой диэлектрической постоянной k. Значение новой разработки нельзя не оценить.



**Рис.2. Структура микросхемы фазоинверсной памяти компании Nanochip, выполненной с применением МЭМС-технологии**



Компания Intel проявляет большой интерес и к новым типам энергонезависимой памяти, пригодных для применения в новых поколениях разрабатываемых ею процессоров. Вот почему Intel совместно с венчурной фирмой JK&B Capital инвестировала 14 млн. долл. довольно молодой компании Nanochip, образованной в 1996 году, на разработку фазоинверсной памяти с использованием МЭМС-технологии. Созданная Nanochip микросхема фактически представляет собой набор из трех микросхем – нижней кремниевой с КМОП-компонентами управления, промежуточной (медиа-платформы) с ячейками PRAM памяти и верхней с матрицей кантеливеров с тонкими наконечниками-зондами диаметром менее 25 нм (рис.2). Монтируется схема в пластмассовый корпус. Ячейки памяти формируются не методами литографии, а перемещением зондов, и плотность их размещения зависит от размера зонда, т.е. объем памяти не зависит от закона Мура. Если зонд перемещать на расстояние, равное одной десятой размера ячейки, сформированной обычными методами, объем памяти увеличивается в 100 раз. При считывании, записи и стирании матрица с МЭМС-зондами сканирует медиа-платформу в направлении X и Y. Выполняемая операция определяется значением напряжения зонда.

Компания Nanochip рассчитывает начать пробные поставки МЭМС-микросхем PRAM емкостью 100 Гбайт (но скорее всего, емкость новых микросхем составит несколько десятков гигабайт) в 2009 году и освоить серийное производство в 2010-м. Размер ячейки памяти равен 15×15 нм. В дальнейшем предполагается уменьшить диаметр зондов до 2–3 нм, и через 10–12 лет создать микросхемы фазоинверсной МЭМС-памяти емкостью до 10<sup>12</sup> бит на квадратный дюйм.

По мнению исполнительного директора компании Nanochip Гордона Найта, МЭМС-микросхемы найдут применение в USB-драйверах, твердотельных накопителях и серверах систем развлечения.

Один из упомянутых недостатков фазоинверсной памяти – деградация материала в ходе эксплуатации. Поэтому интерес представляет разработанный учеными Университета штата Пенсильвания опытный образец PCM на основе GTS-нанопровода длиной в несколько микрон и диаметром в несколько сотен нанометров, формируемый методом самосборки также без применения литографии. Исследование свойств нанопроводов в зависимости от их толщины показало, что при уменьшении толщины уменьшается и значение тока записи: для 200-нм провода сила импульсного тока записи равна 1,3 мА, а для 30-нм – 0,16 мА. Время считывания, записи и удаления информации составляет всего 50 нс. Экстраполяция температурных зависимостей сопротивления GTS-проводов различной толщины показала, что при температуре 80°C данные 60-нм проводов могут храниться до 20 лет, 30-нм проводов – всего три года. А для провода толщиной 150 нм срок хранения информации при 80°C достигает 330 лет. Такую ста-

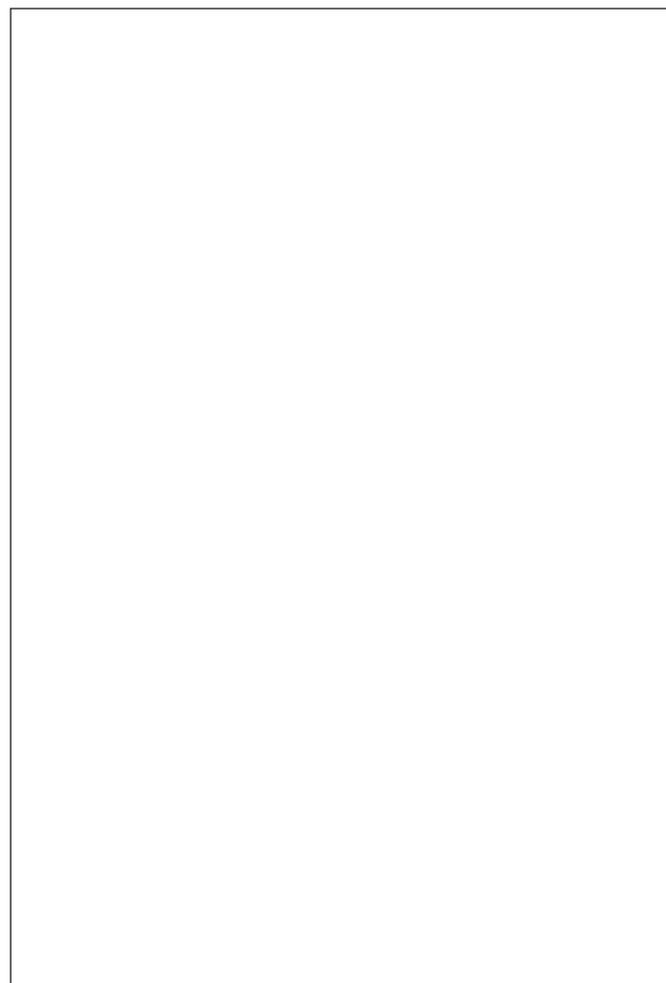
бильность ученые связывают с малой плотностью дефектов в самособирающихся нанопроводах.

Для улучшения характеристик необходимо вести поиск новых составов, а для практического внедрения материала – прежде всего разработать методы получения больших массивов фазоинверсных нанопроводов.

В заключение небезынтересно отметить, что крупнейший изготовитель сотовых телефонов – компания Nokia – в 2007 году начала оценку микросхем фазоинверсной памяти компаний STMicroelectronics, Intel и Samsung.

### МАГНИТОРЕЗИСТИВНОЕ ОЗУ, MRAM

Серьезный конкурент энергонезависимой фазоинверсной памяти – магниторезистивная оперативная память (Magnetoresistive RAM, MRAM). В памяти этого типа данные хранятся в магнитных ячейках, основной элемент которых – магнитный туннельный переход (Magnetic Tunnel Junction, MTJ), образованный двумя слоями сегнетоэлектрика, между которыми заключен тонкий слой диэлектрика. MTJ-структура в свою очередь расположена между двумя взаимно перпендикулярными проводящими линиями (рис.3). Ориентация магнитного поля одного слоя сегнетоэлектрика фиксирована, второго – свободна и зависит от внешнего магнитного поля. Запись выполняется при прохождении по соответствующим



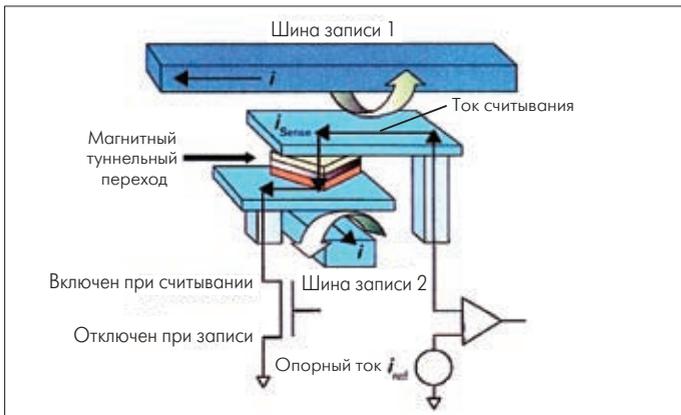


Рис.3. Структура ячейки памяти магниторезистивного ОЗУ

проводящим линиям тока, индуцирующего внешнее по отношению к МТД магнитное поле, которое и задает ориентацию магнитного поля свободного слоя. Если ориентации магнитных полей двух сегнетоэлектриков противоположны, сопротивление туннельного перехода и, соответственно, ячейки памяти велико (логическая 1). При совпадении ориентации обоих полей электроны туннелируют через диэлектрический барьер, и сопротивление ячейки мало (логический 0). Следует подчеркнуть, что состояние МТД-элемента меняется только когда ток проходит одновременно по двум пересекающимся управляющим линиям. При этом изменение ориентации магнитного поля занимает не более 1 нс. С учетом времени прохождения тока по управляющим линиям операция записи занимает несколько наносекунд. В структуру ячейки памяти также входит МОП-транзистор, который при считывании пропускает ток шины питания через ячейку на общий потенциал. Считывание заключается в измерении сопротивления ячейки, точнее, падения ее напряжения, которое сравнивается с опорным. Значения времени считывания и записи практически мало отличаются друг от друга.

Поскольку в ячейку MRAM помимо МТД-элемента памяти входит транзистор, площадь ее задается транзистором, размеры которого больше, чем у запоминающего элемента. В результате по размерам ячейки памяти MRAM сопоставима с ДОЗУ.

Основные достоинства MRAM:

- высокое быстродействие;
- почти бесконечное число циклов считывания/записи, поскольку запись осуществляется за счет изменения полярности магнитных слоев без разрушения материала запоминающего элемента;
- возможность независимого выполнения любых операций над отдельными ячейками и сегментами памяти, что позволяет использовать MRAM одновременно для хранения программ и данных;
- отсутствие необходимости предварительного стирания данных перед перезаписью и повторной записи после чтения.

Следует отметить, что благодаря своим свойствам MRAM

перспективны не только для замены традиционных микросхем энергонезависимой памяти и оперативных запоминающих устройств, но и для применения во встраиваемых устройствах. Совершенствование характеристик памяти этого типа приведет к тому, что вскоре мы сможем увидеть микроконтроллеры со встроенными MRAM, используемые в самой разнообразной аппаратуре.

Но магниторезистивная память тоже не свободна и от недостатков. Для получения ощутимой разницы сопротивлений МТД-элемента с различными состояниями – «1» или «0» – ток записи должен быть достаточно большим, и в результате энергопотребление растет. Причем с уменьшением размеров элементов памяти ток растет. Но поскольку длительность процесса записи/стирания составляет всего 25 нс и при записи бита не нужно изменять все биты, на практике энергопотребление микросхем MRAM не велико. В результате по потребляемой электроэнергии MRAM выигрывают по сравнению с другими типами постоянной памяти. Другая проблема, связанная с большим током записи, заключается в том, что размер включенного последовательно с запоминающим элементом МОП-транзистора зависит от протекающего тока. В результате степень интеграции микросхемы MRAM, а следовательно, и объем памяти, зависят от сопротивления МТД и величины магниторезистивного эффекта. Кроме того, по мере масштабирования микросхемы появляется вероятность перекрытия внешним магнитным полем соседних ячеек и ложной записи данных (проблема полувыбора, или нарушения записи). Вот почему до последнего времени топологические нормы микросхем памяти этого типа не превышали 180 нм.

И основной недостаток MRAM – высокая стоимость, которая на много выше, чем у традиционных схем энергонезависимой памяти. Так, микросхема компании Freescale MR2A16A с самым большим на сегодняшний день объемом памяти (4 Мбит) стоит ~15 долл. против 5 долл. за флэш-память объемом в 4 Гбит.

Тем не менее, по быстродействию MRAM не уступает СОЗУ и превосходит флэш-память при значительно большем сроке службы. По плотности размещения элементов и быстродействию она превосходит ДОЗУ, потребляя при этом значительно меньше электроэнергии.

Пока рынок MRAM невелик. Основная область их применения – системы на базе СОЗУ с резервным батарейным питанием. Возможно, поставщики не готовы осваивать производство таких микросхем памяти на современных заводах стоимостью в несколько миллиардов долларов, производящих ДОЗУ и флэш-память с гарантированным высоким спросом.

Разработка MRAM началась в 90-е годы прошлого столетия. В 1995 году Управление перспективного планирования Министерства обороны США (DARPA) начало финансирование трех консорциумов, которые возглавляли компании IBM, Motorola и Honeywell. Цель программы – определение возмож-

ности изготовления микросхемы MRAM, способной выступить в роли «универсальной памяти». Под этим понималось выполнение таких требований поставщиков комплексного оборудования, как работа при токе записи 100 мкА, неограниченный рабочий ресурс плюс малая потребляемая энергия и высокое быстродействие, возможность дальнейшего масштабирования микросхем. По утверждению компании Freescale, к настоящему времени DARPA вложило в развитие MRAM-технологии миллионы долларов. Разработки MRAM также финансировали фирмы Hewlett-Packard, Matsushita, NEC, Fujitsu, Toshiba, Hitachi и Siemens. Однако первая коммерческая микросхема MRAM – 4-Мбит память модели MR2A16A, выполненная по 0,18-мкм технологии, – была выпущена компанией Freescale Semiconductors (бывшее полупроводниковое отделение компании Motorola, получившее от нее всю документацию на эти устройства) лишь в июне 2003 года\*. Сегодня схемы памяти этого типа активно совершенствуются, и характеристики MRAM постоянно улучшаются. Многие компании объявляют о готовности к массовому производству MRAM. Правда, пока не ясно, насколько успешно они решают проблемы уменьшения требуемого тока программирования и размеров схем. Так что же достигнуто в настоящее время?

Добиться скорости считывания и записи 16-Мбит MRAM, равной 100 Мбайт/с при напряжении питания 1,8 В, смогли компании Toshiba и NEC. Площадь разработанной совместными усилиями специалистов этих фирм памяти составляет 78,7 мм<sup>2</sup>, т. е. она на 30% меньше, чем у микросхем памяти аналогичной емкости. Toshiba предложила использовать MTJ в форме пропеллера, что позволило увеличить окно записи и уменьшить ток на 40% по сравнению с током программирования обычных ОЗУ. Уменьшение тока записи привело к уменьшению площади, занимаемой периферийными устройствами, и тем самым позволило освободить 42,3% площади кристалла под запоминающие элементы. Кроме того, путем разветвления тока (формирования «вилки») записи удалось уменьшить сопротивление проводящих линий на 38%

\* 15 сентября 2008 года Freescale передала права на производство разработанных микросхем MRAM отделившейся от нее фирме EverSpin Technologies, которая будет поставлять микросхемы магниторезистивной памяти как заказчиком Freescale, так и самой материнской компании.

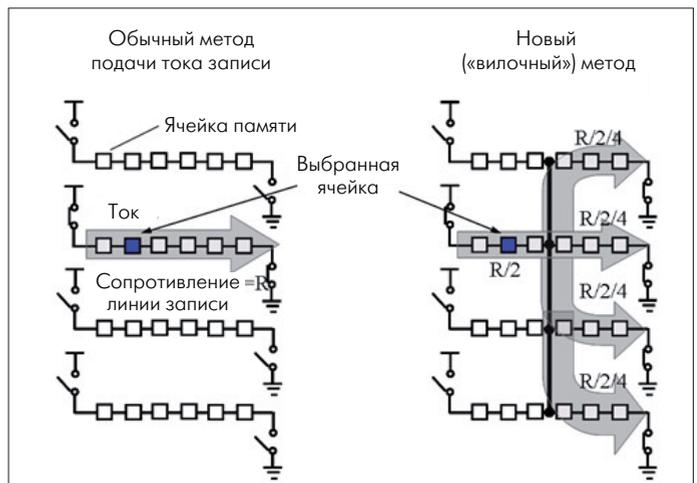


Рис.4. «Вилочная» структура линий записи

(рис.4). И еще, в MTJ-структуре использован материал, выдерживающий температуру до 350°C, и теперь полупроводниковые устройства памяти могут изготавливаться после формирования ячейки памяти. Кроме того, применение нового материала позволило уменьшить толщину диэлектрического слоя до 1 нм. КМОП-элементы микросхемы изготовлены по 0,13-мкм технологии, минимальные размеры элементов памяти составляют 240 нм. Размер ячейки – 1,87 мкм<sup>2</sup>, время цикла – 34 нс.

Работа компаний Toshiba и NEC проводилась в рамках проекта, финансируемого Организацией по разработке новых энергетических и промышленных технологий (New Energy and Industrial Technology Development Organization, NEDO).

В рамках проекта реализации быстродействующей энергонезависимой встраиваемой памяти NEDO компанией NEC создана сопоставимая по быстродействию с СОЗУ магниторезистивная память, работающая на частоте 250 МГц. Ячейка памяти MRAM емкостью 1 Мбит содержит два транзистора и один магнитный туннельный переход. Кроме того, усовершенствована электрическая схема MRAM. Испытания с помощью встроенного блока контроля сигнала показали, что время выборки MRAM на частоте 250 МГц составляет 3,7 нс.

Возможности реконfigurирования критичных программ и изменения данных, хранимых MRAM, привлекли внимание разработчиков космической аппаратуры. Компания Angstrom

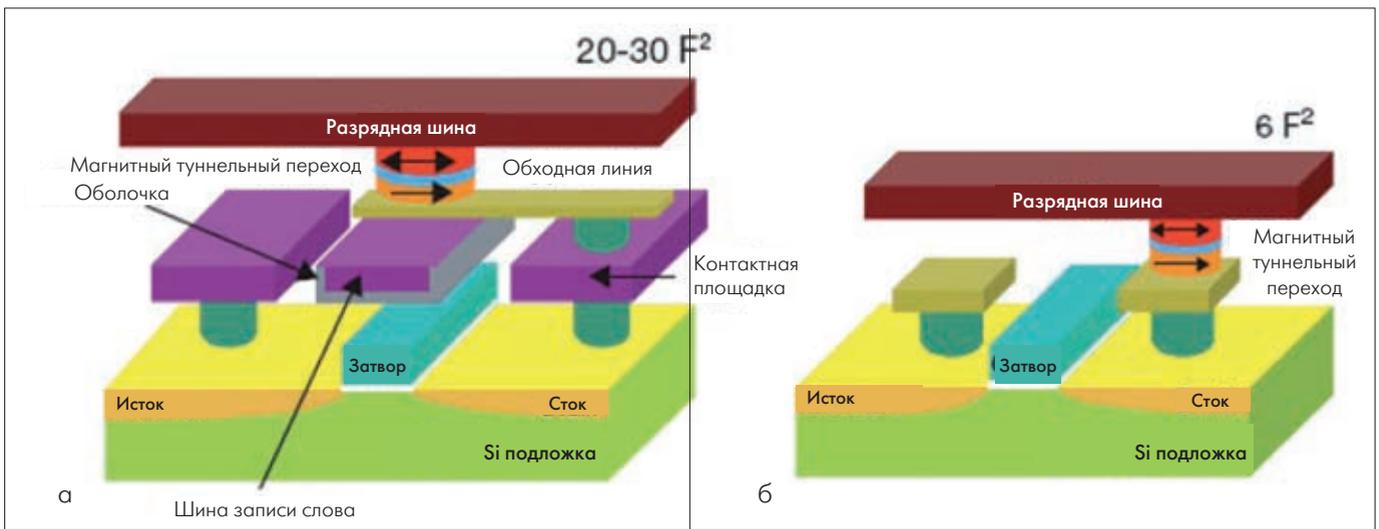


Рис.5. Структура ячейки памяти MRAM (а) и STT MRAM (б)

Aerospace (Швеция) намерена заменить магниторезистивной памятью MR2A16A компании Freescale CO3У и флэш-память, используемые в магнетометре, который будет установлен на борту японского исследовательского спутника SpriteSat. Спутник должен быть запущен в космос во второй половине 2008 года.

Компания e2v Technologies (Великобритания) – разработчик и производитель специализированных компонентов военного и аэрокосмического назначения – проводит испытания микросхемы MR2A16A с целью определения соответствия ее параметров заданным в диапазоне температур -55...125°C (температурный диапазон MRAM, выпускаемых Freescale, составляет -40...105°C).

С 2005 года активно ведется разработка MRAM, в которых используется новый метод записи данных – «спин-преобразование вращательного момента» (Spin Torque Transfer, STT). По утверждению разработчиков, этот метод позволяет уменьшить ток записи, повысить плотность размещения элементов и снизить стоимость микросхемы, т.е. решить основные проблемы, стоящие перед разработчиками MRAM. Новая технология потребовала осмысления такой квантовой характерис-

тики электрона, как его спин (собственный момент количества движения), определяющий поведение электрона в магнитном поле. Вызываемый спин-поляризованным током (с одинаково направленным спином электронов) крутящий момент приводит к изменению направления магнитного момента материала, в котором протекает ток, причем направление магнитного момента материала зависит от направления спина электронов. Это явление и использовано для записи данных в ячейку памяти с MTJ-структурой, сопротивление которой теперь зависит от поляризации, а не от силы тока, что позволяет записывать данные при достаточно небольших его значениях – 100–200 мкА при 90-нм размерах элементов. Причем ток проходит непосредственно через ячейку памяти и для изменения ориентации магнитного свободного слоя не нужна вторая проводящая линия, как в обычных MRAM (рис.5). Все это приводит к уменьшению размеров ячейки памяти и тока записи (рис.6). Возможность применения одной проводящей линии позволяет увеличить плотность размещения элементов и снизить стоимость микросхем. Напряжение питания ячейки не превышает 1,2 В, т.е. память может работать при батарейном питании.

Пионер в области разработки STT MRAM – компания Grandis. Пока ею создан опытный образец микросхемы этого типа емкостью 1 Мбит. В 2005 году Grandis заключила соглашение с компанией Renesas Technology с целью совместной разработки STT-микросхем с 65-нм топологическими нормами. Эти схемы памяти предназначены для применения в микроконтроллерах и системах на кристалле компании Renesas. К концу 2008 года или началу 2009-го Grandis рассчитывает создать автономные STT MRAM с 45-нм нормами.

Для реализации своих планов по продвижению STT-технологии Grandis в 2007 году объявила о запуске в строй предприятия по производству MTJ-структур. Благодаря этому заказчики, приобретающие у Grandis лицензию на STT RAM, но не имеющие опыта и оборудования для производства MTJ,

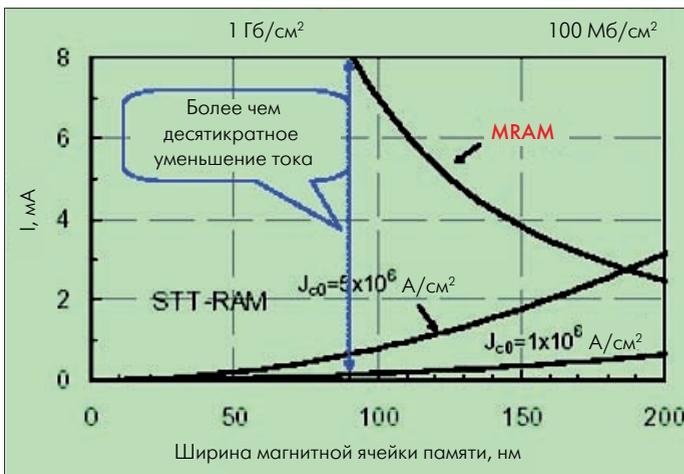


Рис.6. Зависимость тока обычной и STT MRAM от размеров ячейки

получат возможность интегрировать новую структуру в разрабатываемые КМОП-устройства. Помимо изготовления МТJ-структур по заказам клиентов, новый завод станет частью научно-исследовательского комплекса компании. Руководство Grandis полагает, что «обкатанные» здесь технологические процессы можно будет внедрять на заводах заказчиков.

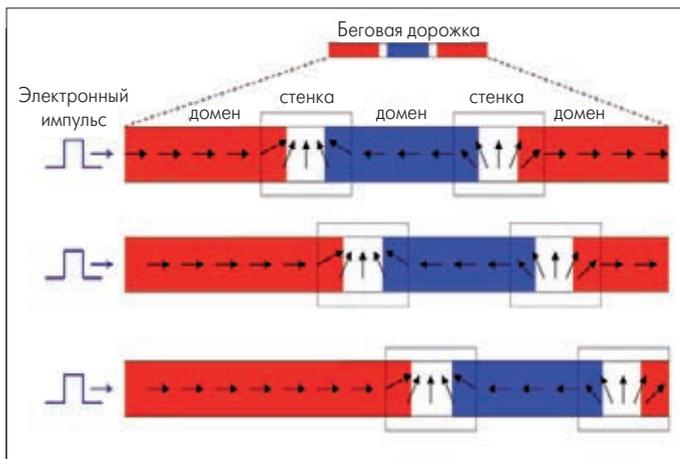
В начале 2008 года компания Grandis заключила лицензионный договор с Hynix Semiconductor на предоставление последней патентов и IP по STT RAM.

С 2007 года НИОКР в области STT MRAM активизировались. В начале года компания Hitachi объявила о создании совместно с учеными Университета Тохоку опытного образца микросхемы STT-памяти емкостью 2 Мбит, временем записи 100 нс и временем считывания 40 нс. Напряжение питания составляет 1,8 В. Микросхема изготовлена по 0,2-мкм КМОП-технологии. Это стало возможным благодаря применению в качестве изолирующего слоя МТJ-структуры оксида магния, а в качестве сегнетоэлектриков – феррокобальта бора (CoFeB), что позволило получить магниторезистивный коэффициент при комнатной температуре 450% (этот коэффициент в обычной МТJ-структуре с окисью алюминия равен 70%).

Соглашение о сотрудничестве сроком на четыре года с целью увеличения емкости MRAM с 16 Кбит до 16 Мбит заключили компании IBM (один из ведущих разработчиков STT MRAM) и TDK (лидер по выпуску головок считывания на основе МТJ-структуры). Увеличить емкость памяти с 16 Кбит до 144 Кбит компания намерена за счет выполнения микросхемы памяти по 65-нм технологии. Дальнейшего увеличения емкости памяти планируется достичь за счет уменьшения размеров ячейки памяти. STT-MRAM может найти применение в будущих разработках IBM и ее партнеров. В любом случае, пока технология создания STT-RAM находится на ранней стадии развития, говорить о сроках воплощения ее в жизнь рано.

Интерес представляет разработанная компанией Toshiba микросхема STT MRAM на базе МТJ-структуры с вертикальной анизотропией. Вертикальная анизотропия в настоящее время начинает все чаще использоваться для увеличения объема памяти накопителей на жестких дисках. Применение ее в MRAM позволило улучшить характеристики переключения МТJ-структуры из одного состояния в другое. В качестве диэлектрика Toshiba также использовала MgO, а в качестве сегнетоэлектрика – CoFeB. Диаметр МТJ-структуры составил 0,13 мкм, длительность импульса записи – 30–100 нс, плотность тока записи –  $3 \cdot 10^6$  А/см<sup>2</sup>.

Говоря о новых типах магнитной памяти, нельзя не упомянуть работы специалистов Исследовательского центра Almaden компании IBM по созданию так называемой магнитной памяти «на беговой дорожке», или трековой памяти. В памяти этого типа для перемещения магнитных доменов с различной ориентацией магнитного поля, сформированных в проводнике шириной ~200 нм и толщиной 100 нм, так же как и



**Рис.7. Движение доменных стенок под действием спин-поляризованного тока**

в STT MRAM, используется спин-поляризованный ток. Домены разделены доменными стенками – узкими областями, где их намагниченность перестраивается с одного направления на другое. В результате такой «перестройки» доменная стенка при прохождении тока как бы сдвигается. Если в проволоке имеется последовательность стенок, то все они под действием спин-поляризованного тока начнут «бежать» по ней с одинаковой скоростью и в одном направлении (рис.7). При перемещении домены проходят считывающий элемент на основе МТJ-структуры. По принципу работы трековая память сходна с памятью на цилиндрических магнитных доменах, кото-

рая разрабатывалась в 1970-е годы и в которой для «проталкивания» магнитного домена также использовался электрический ток.

Трековая магнитная память может состоять из сетки плоских проводников с расположенными рядом элементами считывания/записи (самая простая организация памяти) или из U-образных проводов, располагаемых вертикально над сеткой считывающих элементов. В памяти с организацией второго типа (более популярной) можно использовать достаточно длинные провода. Правда, из-за необходимости продвижения стенки на относительно большое расстояние может увеличиться время выборки. Но это увеличение незначительно и пропускная способность обоих типов трековой памяти примерно одинакова.

Согласно оценкам, время считывания и записи трековой памяти составляет 20–30 нс против 6–40 нс для ДОЗУ. Пропускная способность трековой памяти – 250–670 Мбит/с. При вертикальной организации памяти каждая ячейка хранит около 128 бит и ее размер составляет  $\sim 20F^2$ . Сегодня не существует полупроводниковой технологии, способной реализовать такую плотность записи. Но нужно помнить, что время считывания разрядов, расположенных в различных местах «беговой дорожки», различно (от  $\sim 10$  нс до нескольких микросекунд), поскольку «дорожка» перемещается относительно элемента считывания/записи с постоянной скоростью  $\sim 100$  м/с.

По мнению разработчиков, возглавляемых Стюартом Паркином, по многим параметрам трековая память опережает уже созданные устройства хранения информации, а также устройства, находящиеся на стадии разработки и внедрения. Разрабатываемая память – первый претендент на получение звания «универсальной памяти». Конечно, предстоит преодолеть еще немало трудностей. Во-первых, надо научиться синхронно двигать десятки доменных стенок (пока эксперименты проводились с не более чем тремя стенками). Во-вторых, необходимо уменьшить силу спин-поляризованного тока (сейчас она такова, что при постоянном пропускании тока провод плавится в доли секунды). И наконец, надо научиться вырабатывать «лес» вертикальных нанопроволок. Тем не менее, разработчики полагают, что пригодная для применения память «на беговой дорожке» появится примерно через семь лет: четыре года потребуются для создания опытного образца и еще три года – на доработку коммерческого прибора. Но если ожидаемая плотность записи трековой памяти будет реализована, портативный MP3 плеер сможет хранить до 500 тыс. песен.

### СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОЗУ, FRAM

Сегнетоэлектрическое ОЗУ (Ferroelectric RAM, FRAM) – один из самых отработанных на сегодняшний день типов энергонезависимой магнитной памяти. Память этого типа имеет достаточно серьезные основания, чтобы претендовать на

статус универсальной памяти. Первые образцы FRAM были созданы компанией Ramtron International еще в 1984 году и продемонстрированы на конференции ISSCC в 1988-м, а первые коммерческие образцы FRAM выпущены компанией Fujitsu (выполняющей роль «кремниевого завода» компании Ramtron) в 1999-м. Лицензии на сегнетоэлектрическую память приобрели у Ramtron крупнейшие производители запорминающих устройств – Hitachi, Toshiba, IBM, Rohm, Samsung, Siemens, Texas Instruments.

По организации и принципу действия FRAM отчасти повторяют магнитную память компьютеров первых поколений, в которой магнитные сердечники заменены магнитными диполями. Вместе с тем конструктивно этот тип памяти можно назвать и преемником динамической оперативной памяти (ДОЗУ). Как и в ДОЗУ, ячейка памяти FRAM выполняется на основе одного транзистора и одного конденсатора (1Т-1С). Но в конденсаторе FRAM вместо диэлектрика используется пленка сегнетоэлектрика (обычно это цирконат-титанат свинца, PZT) – материала, способного менять свои физические свойства под воздействием внешнего электрического поля. На этом свойстве и основана работа ячейки FRAM. Электрические диполи, присутствующие в материале сегнетоэлектрика, при подаче внешнего электрического поля изменяют свою полярность в соответствии с направлением его поля и остаются в этом состоянии и в отсутствие поля. Одно из двух возможных состояний поляризации диполей Zr/Ti и определяет записанный в память разряд – «0» или «1». Поскольку в ячейке FRAM данные хранятся в кристаллической структуре материала, а не как заряд конденсатора в ДОЗУ, в этом типе памяти отсутствует эффект утечки заряда, приводящий к потере информации. Отпадает и необходимость периодической регенерации данных, как в динамической памяти.

Запись информации осуществляется при подаче напряжения на обкладку «конденсатора» (положительное, записывается «1», отрицательное – «0»). При чтении транзистор принудительно устанавливает считываемой ячейке определенный разряд. Если этот разряд совпадает с разрядом ячейки, сигнал на выход не поступает, если же не совпадает, появляется импульс тока. Но при этом хранимые данные «стираются», и их необходимо восстанавливать.

К достоинствам FRAM относятся:

- высокое быстродействие (несколько наносекунд): запись и считывание данных выполняются со скоростью их поступления. Изменение логического состояния ячейки занимает менее 1 нс, и, следовательно, быстродействие зависит в основном от скорости срабатывания КМОП-устройств управления, хотя уже сейчас операция записи в микросхему FRAM выполняется в 100000 раз быстрее, чем в ЭСПЗУ;
- низкое энергопотребление: мощность потребляется лишь в режимах записи и считывания. Запись в каждую ячейку

производится сразу, без предварительного стирания. Ток в момент переключения фронтов на самых высоких тактовых частотах современных микросхем FRAM не превышает 25 мА. Требуемая энергия источника питания FRAM при записи полного массива данных на два порядка меньше, чем у микросхемы ЭСППЗУ или флэш-памяти;

- практически неограниченный ресурс работы:  $10^{16}$  циклов перезаписи для приборов на напряжение питания 3,3 В;
- стойкость к радиации и другим проникающим излучениям.

Однако и эта технология не лишена своих проблем и недостатков. Основная проблема заключается в плохой масштабируемости микросхем FRAM. Это связано с тем, что интенсивность выходного сигнала при считывании зависит от заряда конденсатора, который по мере уменьшения размеров конденсатора также уменьшается. В результате топологические нормы выпускаемых сейчас FRAM – не меньше 100 нм. И вторая проблема – достаточно сложный процесс изготовления микросхем из-за разнородности используемых материалов. И, конечно, разработчики микросхем активно работают над решением этих проблем

Ученые Токийского технологического института, компании Fujitsu Limited и ее дочерней фирмы Fujitsu Laboratories утверждают, что предложенный ими сегнетоэлектрик, который является модифицированным композитом феррита висмута (Bismuth Ferrite, BiFeO<sub>3</sub>, или BFO), позволит увеличить объем хранимой

FRAM информации в пять раз по сравнению с другими микросхемами памяти этого типа. В результате появляется перспектива создать микросхему FRAM нового поколения емкостью 256 Мбит, изготавливаемую по 65-нм технологии. Поставка опытных образцов FRAM на базе феррита висмута планируется на 2009 год. Память такой емкости будет востребована в устройствах персональных систем, особенно, тех, где требуется авторизация и контроль доступа, например в смарт-картах. Дальнейшее увеличение объема памяти (возможно и до гигабит) откроет новые области применения, например в электронной бумаге.

Однако и конкурирующие корпорации не стоят на месте. В частности, компания Seiko Epson сообщила о получении нового материала (сокращенно – PZTN) путем замещения в структуре широко применяемого для изготовления FRAM PZT-сегнетоэлектрика некоторых атомов титана ниобием. Утверждается, что энергопотребление FRAM на базе PZTN-сегнетоэлектрика будет на 90% меньше, чем у флэш-памяти. Пока компания изучает свойства нового материала и о сроках коммерческого внедрения технологии не сообщает.

Вместе с тем усилия основных разработчиков и производителей микросхем FRAM направлены на увеличение объема памяти и быстродействия, развитие и расширение номенклатуры стандартных семейств, разработку семейств многофункциональных интегральных схем с FRAM. Безусловно, большой интерес представляют работы компании Ramtron

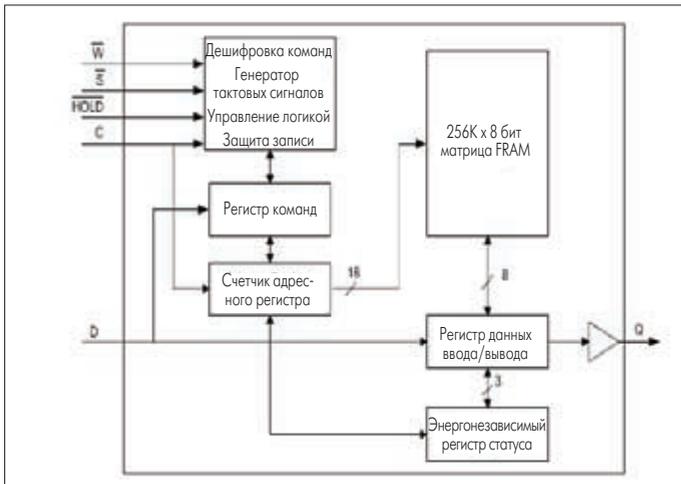


Рис.8. Блок-схема FRAM модели FM25H20

International – основного поставщика микросхем сегнетоэлектрической памяти. Поэтому остановимся на них подробнее.

В первую очередь нельзя не отметить совместные работы компаний Ramtron и Texas Instruments, приведшие к созданию стековой (многоуровневой) структуры ячейки памяти. Коммерческое соглашение этих двух фирм было подписано в 2001 году. Оно предусматривает производство микросхем FRAM разработки Ramtron по отлаженной 0,13-мкм технологии компании Texas Instruments. Созданная в рамках соглашения двух фирм микросхема имеет стековую структуру, в которой сегнетоэлектрический конденсатор с PZT-сегнетоэлектриком и иридиевыми электродами располагается непосредственно над выводом стока управляющего транзистора. Для реализации такой структуры памяти компании Texas Instruments пришлось всего-то добавить к отработанному процессу формирования медных межсоединений два этапа маскирования. Разработанная технология, благодаря возможности создания как автономных, так и встраиваемых устройств, открывает перед FRAM большие перспективы.

По технологии формирования стековой архитектуры ячейки памяти Ramtron в 2007 году выпустила 4-Мбит FRAM модели FM22L6 с параллельным 8/16-разрядным интерфейсом. Площадь ячейки памяти составляет 0,71 мкм<sup>2</sup>. Время выборки – 55 нс, время цикла – 110 нс. Запись и считывание производятся со скоростью передачи шины по принципу NoDelay (без задержек). Рабочий ресурс микросхемы – не менее 10<sup>20</sup> циклов записи, срок хранения данных без подачи питания – 10 лет. Напряжение питания – 2,7–3,6 В, диапазон рабочих температур – от -40 до 85°C. Монтируется в 44-выводной корпус TSOP-типа. Микросхема FM22L6 совместима с микросхемами асинхронных СОЗУ в 44-выводных корпусах TSOP и может стать их заменой.

И уже в 2008 году тайваньская компания Aewin Technologies – производитель промышленных компьютерных платформ – сообщила о замене в игровых мультимедиа компьютерных платформах GA-2000 (на базе процессоров Intel) и GA-3000 (на базе процессоров AMD) СОЗУ с резервным батарейным питанием

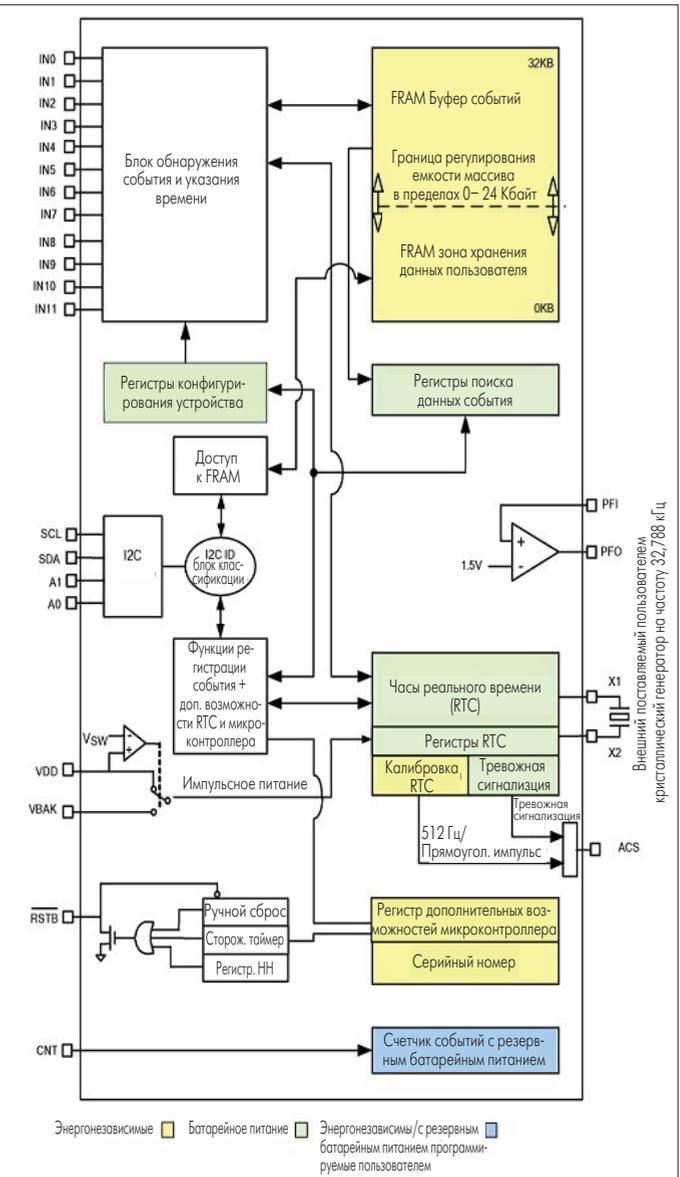


Рис.9. Блок-схема регистратора событий FM6124

4-Мбит микросхемами FRAM типа FM22L6. Такая замена, по мнению руководства компании, гарантирует целостность данных при сокращении числа используемых компонентов, большую надежность и лучшую защиту данных.

Микросхема FM22L6 заменила ЭСРПЗУ в датчике давления 2000S китайской фирмы Shanghai Welltech Automation. Выбор микросхемы сегнетоэлектрической памяти обусловлен в первую очередь ее малым энергопотреблением (рабочий ток датчика 2000S равен всего 3,6 мА, и вклад потребляемой энергии ЭСРПЗУ оказался недопустимо большим).

К 2008 году Ramtron выпустила следующую модель FRAM, выполненную по разработанной совместно с Texas Instruments 130-нм технологии (рис.8) – малагабаритную 2-Мбит (256Kx8 бит) память с последовательным интерфейсом в восьмивыводном корпусе TDFN размером 5×6 мм. Микросхема FM25H20 работает на тактовой частоте 40 МГц. Значение тока записи на максимальной частоте составляет 10 мА, в дежурном режиме



– 80 мкА, в спящем режиме – 3 мА. Напряжение питания прибора – 2,7–3,6 В, диапазон рабочих температур – от -40 до 85°C.

Новая 2-Мбит FRAM позволит расширить возможности измерительных систем и принтеров, в которых уже применяется память компании Ramtron, а также откроет новые рынки сбыта ее изделий, например для медицинских приборов малых габаритов и мощности. Кроме того, возможность обеспечения на аппаратном уровне защиты от перезаписи и уничтожения данных может привлечь корпоративных пользователей и государственные структуры.

Сегнетоэлектрические ячейки памяти компании Ramtron предназначены не только для замены традиционных запоминающих устройств. Одна из последних разработок – микросхема регистратора событий на базе FRAM модели FM6124 (рис.9). Регистратор постоянно контролирует и запоминает изменения в системе и оповещает ее об этих изменениях. Он предназначен для промышленных систем управления, медицинского и измерительного оборудования, для контроля окружающей среды и работы установок, для установления графика ухода и ремонта оборудования, управления электропитанием, контроля транспортного и пешеходного потока и т.п.

FRAM регистратора может хранить информацию о 4 тыс. событий. I<sup>2</sup>C интерфейс памяти с пропускной способностью 100 Кбит/с позволяет размещать микросхему памяти вдали от системы обработки данных и близко к контролируе-

мому оборудованию или датчикам. С одной I<sup>2</sup>C-шиной могут работать до четырех микросхем. Микросхема FM6124 содержит 16-бит вход счетчика событий с резервным батарейным питанием, блок раннего предупреждения о падении напряжения, блок пользовательского программирования серийного номера. Напряжение питания микросхемы составляет 3–3,6 В, диапазон рабочих температур – от -40 до 85°C. Поставляется в 44-выводном корпусе QFP-типа.

Несмотря на нынешний успех флэш-памяти, аналитики признают технологическую и историческую ограниченность этой технологии, впрочем, как и любой иной. Поэтому уже сейчас целый ряд компаний и исследовательских центров разрабатывают альтернативные решения, позволяющие достичь более высоких показателей по быстродействию, надежности и способности к долговременному хранению данных. Какая из рассмотренных технологий (или из вновь разрабатываемых, о которых пока мало что известно), нашедших лишь свои ниши на рынке, победит и станет «универсальной» базовой памятью, еще не ясно. Каждая из них имеет свои достоинства и недостатки. Но на смену флэш-памяти, несомненно, придет новая память, так же как совсем недавно «флэшки» стремительно и несколько неожиданно заменили гибкие диски. Все впереди. ○

