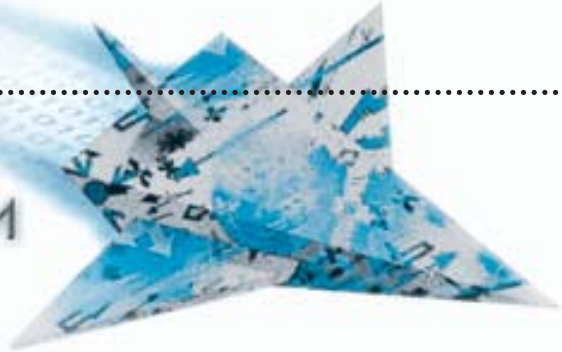


ЭКЗОТИЧЕСКИЕ ТИПЫ ПАМЯТИ Гонки за будущим?



М.Валентинова

С середины 90-х годов изготовители ДОЗУ утверждают, что не сегодня-завтра рынок наводнит память DDR- или DRDRAM-типов*. А воз и ныне там. Большая часть поставляемых на рынок ДОЗУ – синхронные устройства, выпущенные в конце 80-х. Да и старые добрые асинхронные ДОЗУ все еще находят применение в серверах, рабочих станциях и другом, не компьютерном, оборудовании. Куда-то исчезли некогда считавшиеся столь перспективными ДОЗУ фирмы SyncLink, ДОЗУ типа EDO, память на цилиндрических магнитных доменах. И тем не менее, время от времени появляются новые типы памяти, и изготовители каждого из них утверждают, что именно этот тип ЗУ займет ведущее положение на рынке, оттеснив все предыдущие, существующие и будущие устройства. Так, что это за новые и новейшие схемы, и чьи же ожидания сбываются?

КАКИМ ПУТЕМ ПОЙДЕМ, ТОВАРИЩИ?

Новые фундаментальные разработки запоминающих устройств, на базе которых формируются целые отрасли промышленности, появляются не чаще, чем раз в десятилетие. Так, в 70-е годы ДОЗУ вытеснили доминирующие на рынке магнитные накопители, а в 80-е флэш-память начала успешное наступление на электрически программируемые ПЗУ. Развитие схем памяти, как, впрочем, и любого направления электроники, может идти двумя путями: эволюционным – совершенствование существующих структур – или революционным – решение стоящих перед разработчиками задач с помощью совершенно нового подхода. Безусловно, эволюционный путь более безопасен и надежен, и по нему склонны идти производители уже достаточно хорошо зарекомендовавших себя типов ЗУ. Пример – сравнительно молодая, но уже утвердившаяся технология, – флэш-память. Эта память продолжает привлекать к себе внимание

в связи с расширением ее применения в беспроводных средствах связи, продажи которых до недавнего времени стремительно росли, и в бытовых устройствах, становящихся на "цифровой путь" и подключаемых к сети Интернет. Подобные новые применения требуют не только большего объема флэш-памяти, но и больших функциональных возможностей, лучшей защиты данных, уменьшения габаритов и, конечно, снижения стоимости, особенно встраиваемых устройств. Примеры новых типов флэш-памяти, появившихся в результате совершенствования существующих устройств, – схема NAND-типа с трехтранзисторной ячейкой памяти (3Т) фирмы Toshiba, выпуск которой планируется на середину 2002 года, и память NOR-типа серии StrataFlash фирмы Intel, в базовой ячейке которой хранятся два бита информации. Любопытно, что появление памяти NOR-типа – результат совершенствования тогда еще новой технологии флэш-памяти, тогда как схемы NAND-типа – результат нового подхода к решению задач снижения стоимости энергонезависимой памяти с возможностью перезаписи данных.

В сравнении с флэш-памятью NOR-типа и ЭСРПЗУ устройства NAND-типа аналогичной емкости и с теми же топологическими нормами благодаря многобитовой структуре транзисторной цепочки, мультиплексируемой адресной шине и небольшому числу усилителей считывания с соответствующими буферами ввода/вывода занимают меньшую площадь чипа. Эта технология хорошо зарекомендовала себя для хранения данных, но неприемлема для создания быстродействующих ОЗУ и схем одновременного считывания и записи (требуемых, например, для выполнения команды непосредственно после ее ввода). И хотя по мере снижения удельной стоимости в пересчете на бит флэш-память будет все больше применяться для хранения файлов*, Toshiba не оставляет попыток создать устройство, пригодное как для хранения данных и файлов, так и кода. Правда, из-за различных технологических операций, требуемых для изготовления NOR- и NAND-ячеек, стоимость чипа с ячейками обоих типов окажется достаточно высокой. Разработчики Toshiba попытались решить эту проблему за счет разбиения NAND-матрицы на две части. Однотранзисторные ячейки памяти первой части предназначены для хранения данных, а трехтранзисторные ячейки второй – для хранения кода. Но применение такой памяти будет экономически оправдано только тогда, когда доля хранимых оперативно исполняемых команд мала по сравнению с общим объемом хранимой информации. Таким применением может стать "продвинутой" сотовый телефон, во встроеной оперативной памяти кото-

*По данным Gartner Dataquest, в 2000 году продажи флэш-памяти, предназначенной для хранения файлов, составили примерно 1 млрд. долл., или 11,7% от общего объема продаж памяти этого типа, к 2004 году доля такой памяти уже будет равна 33%.

*ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2000, №4, с. 18.

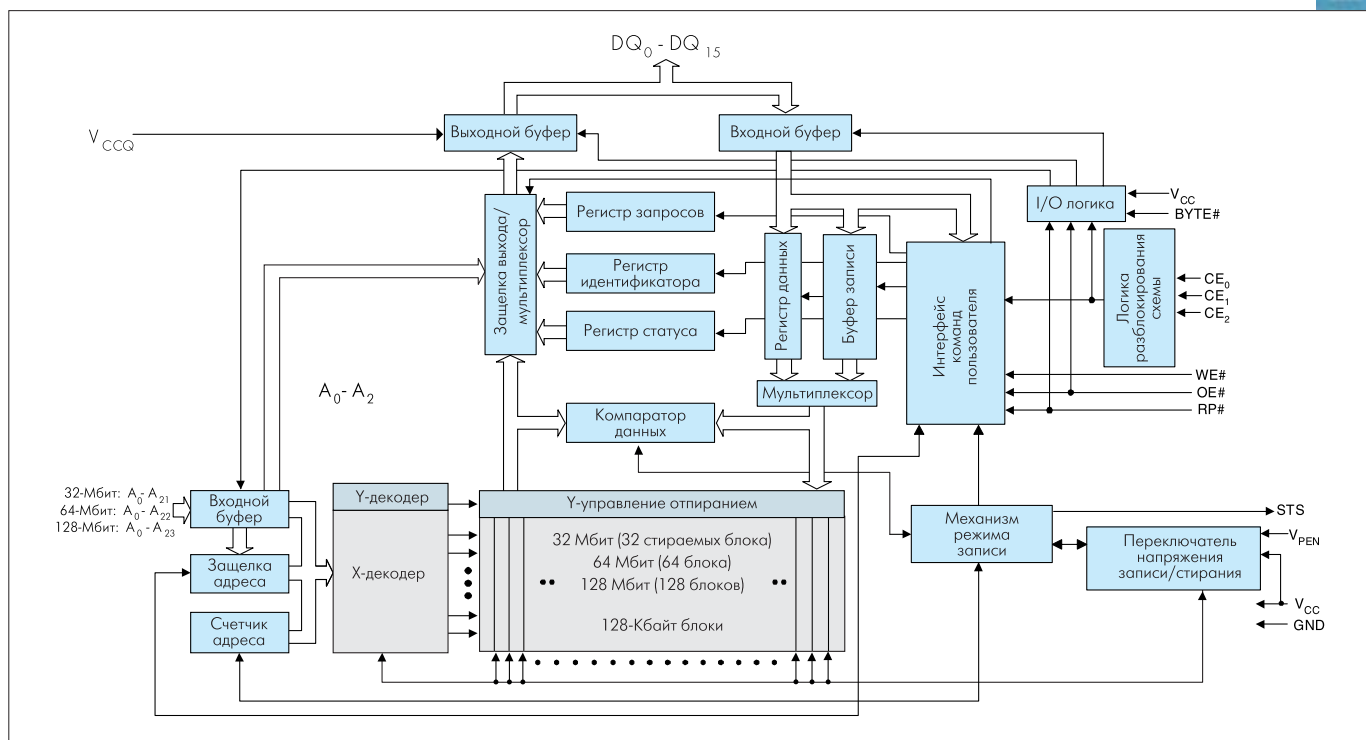


Рис. 1. Блок-схема флэш-памяти семейства StrataFlash на напряжение 3 В

рого, а не в отдельном съемном модуле, хранятся цифровые музыкальные записи, фотографии и видеоклипы.

ДВА В ОДНОЙ

В конце 2001 года Toshiba совместно с SanDisk планирует выпустить выполненный по 0,13-мкм технологии NAND-флэш с многоуровневыми ячейками памяти (Multi-Level cell – MCL), в каждой из которых хранятся 2 бита информации. Емкость памяти – 1 Гбит. В 2002 году должен появиться MCL NAND-флэш емкостью 2 Гбит.

Многобитовые ячейки привлекают внимание и других крупных производителей флэш-памяти, таких как STMicroelectronics и Silicon Storage Technology. Фирма Intel выпускает устройства с 2-бит NOR-ячейками памяти серии StrataFlash с 1997 года*. В четвертом квартале 2000 года на долю таких схем емкостью до 128 Мбит приходилось примерно 25% объема отгружаемой фирмой флэш-памяти. К 2005 году фирма надеется освоить выпуск четырехуровневых устройств. В серию StrataFlash входят устройства на напряжение 3 В с организацией 16 Мбайт (128 Мбит), 8 (64) и 4 Мбайт (32 Мбит) и возможностью выборки 8- или 16-разрядных слов (рис. 1). Схемы выполнены по 0,25-мкм технологии. Поставляются флэш в 64-выводном BGA-корпусе или в 56-выводном корпусе TSOP-типа.

Иное решение проблемы создания ячеек памяти, способных хранить 2 бита информации, нашла фирма Saifun Semiconductor (Израиль), предложившая так называемое нитридное ПЗУ (НПЗУ), или Saifun NROM-технологии. В NROM-ячейке используется обычный n-канальный МОП-транзистор, затворный диэлектрик которого заменен слоем ловашкой из оксида-нитрида-оксида (ОНО) (рис. 2). При программировании на шину слов подается напряжение 9 В, при считывании – 3 В. При напряжении 4,5 В на разрядной шине 2 и заземлении разрядной шины 1 в соответствующей области нитрида кремния накапливаются электроны, что соответствует записи логической "1". Для считывания "1" на разрядную шину 1 подается напряжение 1,5 В, а шина 2 заземляется. Меняя соотношение на-

пряжений на разрядных шинах 1 и 2, можно записывать и считывать второй разряд.

Ширина ОНО-ловушки – 10 нм, что достаточно для того, чтобы хранимые в двух областях заряды не влияли друг на друга. Толщина двуоксида кремния (не менее 5 нм) достаточна для предотвращения прямого туннелирования электронов при записи бита. В процессе записи участвуют несколько сотен электронов против многих тысяч в флэш-ячейке NOR-типа. При стирании нижний слой оксида инжектирует дырки, генерируемые в результате зонного туннелирования. NROM-ячейки изготавливаются по традиционной КМОП-технологии с двумя дополнительными операциями маскирования для получения ОНО-слоя после создания изоляции транзистора и до нанесения затворного оксида и двумя дополнительными этапами формирования высоковольтных транзисторов считывания и записи. Предложенная технология пригодна для изготовления ПЗУ, флэш-памяти, ЭСРПЗУ и встроенной энергонезависимой памяти.

Фирма-разработчик Saifun Semiconductor, образованная в 1998 году, уже заключила ряд лицензионных соглашений с ведущими поставщиками полупроводниковых приборов. Первой новую техноло-

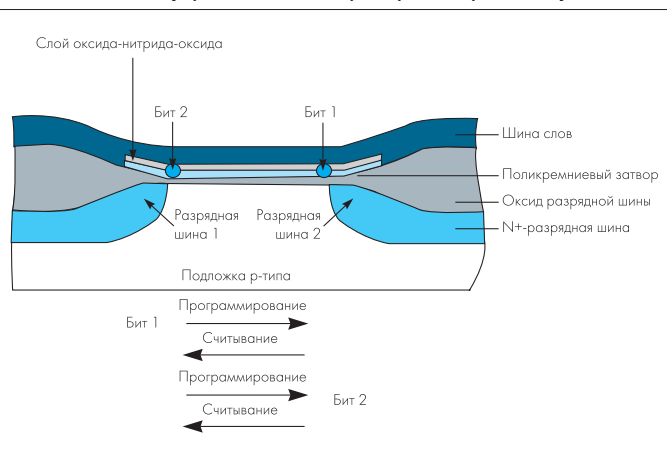


Рис. 2. Структура NROM-ячейки памяти, хранящей 2 бита информации

*ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2001, №3, с.61.

гию производства встроенных схем памяти, названную microFLASH, в начале 2000 года освоила израильская компания-производитель Tower Semiconductor*. Испытания 2-Мбит устройства показали возможность хранения данных в течение 10 лет после 100 тыс. циклов репрограммирования. Saifun и Tower планировали в середине 2001 года выпустить NROM-память, рассчитанную на 10 тыс. циклов репрограммирования, и позже – на 100 тыс. циклов.

В феврале 2001 года Saifun Semiconductor выпустила первое устройство семейства ЭСРПЗУ, выполненное по NROM-технологии – 4-Мбит ЗУ на напряжение 2,7 В. Память типа NROM4EE имеет организацию 512Кх8 бит и может работать в режиме постраничной выборки. Время выборки схемы – 90 нс, что позволит применять ее для хранения кода. Поставляется память в 32-выводном корпусе PLCC-типа. В середине года фирма предполагала выпустить 16-Мбит параллельное и 1-Мбит последовательное ЭСРПЗУ. Еще один производитель ЗУ NROM-типа – Macronix International. Это совместное предприятие компаний Macronix (Тайвань) и Saifun Semiconductor в июне 2001 года планировало выпустить флэш-память емкостью 64 Мбит, выполненную по новой технологии, получившей здесь название Jaffa. Отмечается, что число этапов маскирования уменьшено по сравнению с традиционной технологией с 25 до менее 20.

И, наконец, в мае 2001 года фирмы Saifun Semiconductor и Infineon Technologies (ФРГ) сообщили о создании совместного венчурного предприятия Ingentix, которое будет разрабатывать, производить и продвигать на рынок изделия на базе флэш-памяти, изготовленной по NROM-технологии. В третьем квартале 2002 года новая фирма планирует выпустить чрезвычайно дешевую плату MultiMedia Card, содержащую NROM-флэш емкостью 64 Мбайт и контроллер, оптимизированный для работы с новым типом ЗУ. Плата будет изготавливаться на заводе фирмы Infineon в Дрездене.

Все это позволяет разработчикам утверждать, что к 2003 году 20% рынка энергонезависимой памяти, оцениваемого в 30 млрд. долл., будет приходиться на долю изделий, изготовленных по Saifun NROM-технологии.

ОБЕЩАНИЯ, ОБЕЩАНИЯ, ОБЕЩАНИЯ...

Возможность создания сегнетоэлектрического ОЗУ (СэОЗУ) была высказана еще в середине 50-х годов. Но первое выполненное по 4-мкм технологии СэОЗУ емкостью 256 бит, базовая ячейка которого содержала шесть транзисторов и два конденсатора (6Т-2С), было выпущено в 1988 году фирмой Ramtron. Появившееся в 1992 году СэОЗУ с 2Т-2С-структурой емкостью 4 Кбит сразу же нашло применение в игровой приставке Sega для хранения параметров игры (правда, затем Sega переключилась на CD-ROM). К 1997 году Ramtron освоила производство СэОЗУ емкостью от 4 до 256 Кбит с различными типами параллельных и последовательных интерфейсов, рассчитанных на напряжения 5 и 3 В и работающих в диапазоне температур 0–70°С (коммерческие образцы) и -40...+85°С (устройства с расширенным температурным диапазоном). Такие ЗУ неприемлемы для систем старших моделей, но могут найти применение во многих конструкциях на базе четырех- и восьмиразрядных процессоров. И если еще в начале 90-х Ramtron была единственной фирмой, разрабатывающей и производящей сегнетоэлектрическую память, то к концу десятилетия она заключила лицензионные соглашения с такими крупными компаниями, как Hitachi, Rohm, Toshiba, Fujitsu, Samsung, STMicroelectronics. В конце 2000 года Infineon

объявила о приобретении 20% акций компании Ramtron. Но до сих пор СэОЗУ остаются многообещающим типом памяти, который вот-вот найдет широкое применение.

По своей структуре СэОЗУ подобен ДОЗУ, в котором диэлектрик конденсатора заменен сегнетоэлектриком. Сегодня предпочтение отдается титанату свинца-цирконата (PZT), хотя основной конкурент Ramtron – фирма Symetrix – отдает предпочтение титанату бария-стронция (SBT), объясняя это отсутствием в нем высокоподвижных и затрудняющих технологическую обработку ионов свинца. Внешнее электрическое поле вызывает поляризацию сегнетоэлектрика, которая сохраняется и после отключения поля. Так же, как и в ДОЗУ, операция считывания СэОЗУ разрушает хранимые данные, что требует автоматической перезаписи данных после считывания. Число циклов записи ограничено, т.е. для СэОЗУ характерна "усталость". Правда, число циклов перезаписи данных в СэОЗУ превышает 10⁶–10⁹, а время перезаписи составляет несколько наносекунд (для флэш-памяти – микро- или даже миллисекунды). И основное достоинство СэОЗУ – энергонезависимость.

Современные СэОЗУ имеют 2Т-2С архитектуру (рис.3). В таком ЗУ необходимо применять метод дифференциального считывания данных, т.е. регистрации разности токов двух конденсаторов при приложении поля. Поскольку такой метод позволяет исключить любые явления деградации конденсаторов, существенно повышается надежность памяти. Но изготовление 2Т-2С структуры достаточно дорогостоящее. К тому же, длительность операции дифференциального считывания больше, чем

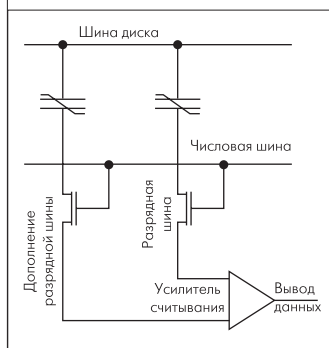


Рис.3. Схема 2Т-2С ячейки памяти СэОЗУ

прямого считывания. Поэтому сейчас усилия разработчиков СэОЗУ направлены на создание более дешевых схем памяти с высокой плотностью элементов на базе 1Т-1С-архитектуры. На Международной конференции по твердотельным схемам (ISSCC) этого года Ramtron и Fujitsu объявили о создании пригодных для освоения в производстве 1-Мбит СэОЗУ с 1Т-1С-ячейками памяти и резервными блоками*. О создании промышленных образцов 1-Мбит СэОЗУ объявили также фирмы NEC, Sharp и Toshiba. На конференции ISSCC компания Samsung сообщила о намерении создать 4-Мбит чип с 0,6-мкм технологическими нормами. А Infineon совместно с Toshiba обещали разработать 32-Мбит СэОЗУ.

Другие факторы, сдерживающие широкое распространение сегнетоэлектрических ОЗУ, – высокая чувствительность сегнетоэлектрика к водороду атмосферы и несовместимость с температурами обработки полупроводниковых пластин. Но изготовители ДОЗУ непрерывно ищут пути уменьшения геометрии (до 100 нм и менее) конденсатора ячейки памяти, и их взоры все чаще обращаются к материалам с высокой диэлектрической постоянной, в том числе и к сегнетоэлектрикам. Стоимость разработки 1-Гбит ДОЗУ достигает 10 млрд. долл., тогда как в 1999 году вся промышленность СэОЗУ затратила на НИОКР менее 500 млн. долл. Если разработчикам СэОЗУ достанется хотя бы малая толика средств, предназначенных для совершенствования ДОЗУ, они смогут добиться многого. А пока СэОЗУ, очевидно, наиболее перспективны для применения в системах, где нужны энергонезависимые ОЗУ, но не требуют

*Tower Semiconductor заключила соглашение с еще одним разработчиком энергонезависимой памяти с многобитовыми ячейками – Azalea Microelectronics.

*ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2001, №2, с.8.

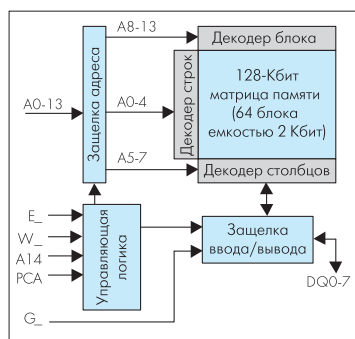


Рис.4. Функциональная схема СЭОЗУ типа CS2075 фирмы Celis Semiconductor

Если эти работы будут успешными, СЭОЗУ, возможно, заменят флэш-память для хранения кода. А уж если в схемах ДОЗУ емкостью более 1 Гбит потребуются новый диэлектрик конденсатора, будущее СЭОЗУ окажется блестящим. И, наконец, весьма перспективной областью применения СЭОЗУ могут стать смарт-карты, в которых пока используется энергонезависимая память значительно меньшего объема, чем в РСМ-СІА-картах. А СэОЗУ – идеальная память для смарт-карт, особенно ВЧ-идентификационных карт беспроводных систем. Как бы то ни было, фирма Ramtron уже несколько лет продает СэОЗУ на сумму около 1 млн. долларов.

Еще одна перспективная область применения СэОЗУ – оборудование космических систем. Здесь СэОЗУ отвечают требованиям НАСА к энергонезависимой, радиационно стойкой памяти с произвольной выборкой. Как показал ряд исследований, поляризация сегнетоэлектрика конденсатора не меняется при воздействии ионизирующего облучения дозой более 1 Мрад. Нишу разработки радиационно стойких СэОЗУ надеется занять фирма Celis Semiconductor, выпустившая 128-Кбит память с организацией 16Кх8 бит, выдерживающая дозу более 10^6 рад (Si) (рис.4). В СэОЗУ типа CS2075 используется SBT-диэлектрик. Срок сохранения данных – 10 лет при температуре 70°C, долговечность – 10^{10} циклов записи/считывания. Циклы записи и считывания занимают 400 нс. Напряжение питания – 3,3 В.

ЖЕЛЕЗНЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ

Сегнетоэлектрические и другие типы памяти копируют "биполярные свойства" магнитов. Но зачем возиться с суррогатом? Почему бы не создать миниатюрное энергонезависимое ОЗУ на базе магнитного материала? Особенно если учесть, что такие работы найдут финансовую поддержку военных ведомств, поскольку магнитная память характеризуется еще и высокой радиационной стойкостью.

Принцип работы такой памяти основан на фундаментальном законе физики – наведении электромагнитного поля переменным током. Концепция современных магнитных (или магниторезистивных) ОЗУ (MRAM) была предложена в середине 80-х годов специалистами фирмы Honeywell. Для записи информации, так же как и в первых образцах магнитной памяти, использовалось явление магнитного гистерезиса, для считывания – магниторезистивный эффект. Ячейки памяти выполнялись на кремниевом чипе. Ячейка представляла собой многослойную полоску, состоящую из двух слоев ферромагнетика, разделенных высокоомным слоем. Каждый магнитный слой ведет себя, как небольшой магнитный стержень, характеризующийся своим магнитным моментом. Магнитные моменты слоев могут быть ориентированы параллельно или антипараллельно, что и определяет хранимые в ячейке данные – логическую "1" или "0". Для записи информации суммарное значение тока в двух перпен-

дикулярных проводах, расположенных над (шина слов) и под (разрядная шина) ячейкой, должно быть достаточным для изменения ориентации ее магнитного момента. Ток одной шины не приводит к изменению ориентации магнитного момента. Ток считывания наводит магнитное поле, в одном случае противоположное, а в другом совпадающее с магнитным полем ячейки. Наводимое в схеме считывания напряжение, величина которого зависит от дифференциального сопротивления ячейки, и определяет хранимые в ячейке данные ("1" или "0") (рис.5). Первые образцы MRAM-ячеек были выполнены на основе сплава кобальта-пермаллоя с анизотропным магниторезистивным эффектом (AMR). Максимальное отношение величин магнитного сопротивления при записи "1" и "0", называемое иногда магниторезистивным отношением, для таких ячеек не превышало 0,5%, что в реальных схемах соответствовало напряжению 0,5–1,0 мВ. На базе таких ячеек было разработано 16-Кбит MRAM с временем считывания около 250 нс (время записи – 100 нс).

Чтобы начать крупномасштабное производство быстродействующих мегабитовых MRAM, необходимо обеспечить как можно меньший разброс значений магнитного сопротивления ячеек матрицы памяти и как можно большее их различие при параллельной и антипараллельной ориентации магнитного момента. Кроме того, величина магнитного сопротивления должна быть стабильна в широком диапазоне рабочих температур и напряжений. Решить эти проблемы удалось за счет перехода от AMR-материалов к материалам с гигантским магниторезистивным эффектом (GMR)*. В многослойной структуре, содержащей GMR-магнитные пленки и промежуточный слой меди, разность считываемых сигналов при изменении полярности магнитного поля уже была равна 6%, а время считывания не превышало 50 нс. Тем не менее, по быстродействию MRAM все еще уступали полупроводниковой памяти. И, что еще важнее, в таких ячейках из-за завихрения магнитного поля на концах токопроводящей полосы ширина шины считывания не могла быть меньше 1 мкм.

Время выборки MRAM-ячейки и плотность упаковки удалось существенно улучшить благодаря созданию ячейки типа псевдоспинового вентиля (Pseudo-Spin Valve – PSV). PSV-ячейка также представляет собой сэндвич, но магнитные свойства двух внешних пленок, разделенных проводящим слоем (как правило, медь), отли-

*Этот эффект был открыт в 1989 году независимо друг от друга двумя европейскими учеными – П. Грюнбергом (ФРГ) и А. Фертом (Франция), которые обнаружили существенное (на 6 и 50%, соответственно) изменение магнитного сопротивления материалов, состоящих из чередующихся тонких слоев различных металлов.

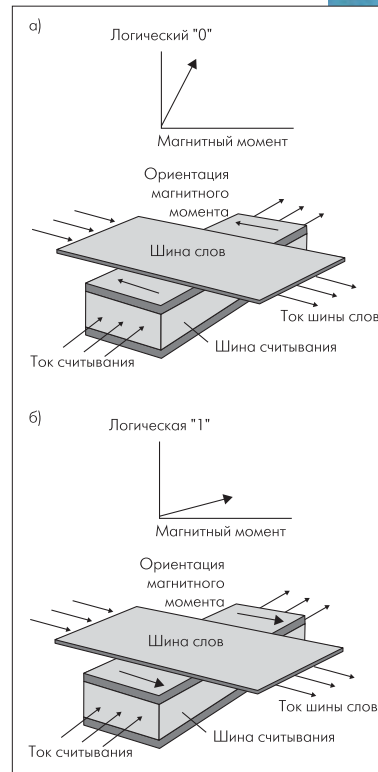


Рис.5. Принцип считывания логического "0" (а) и "1" (б) в первых образцах MRAM

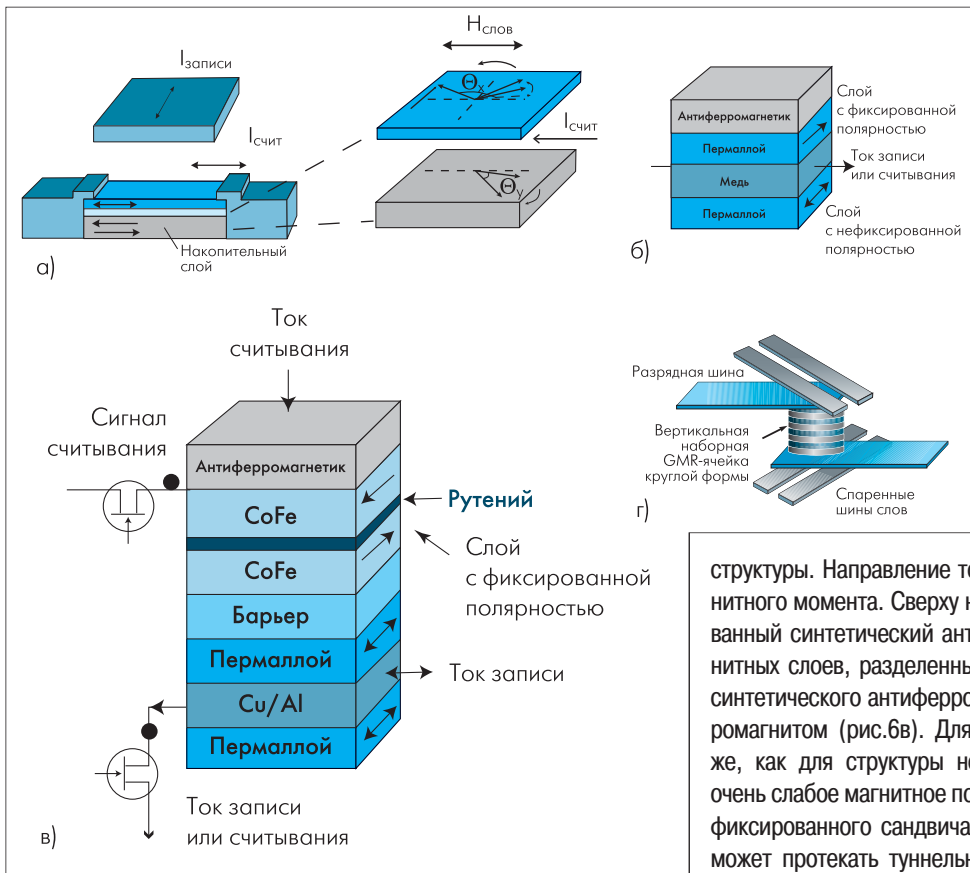


Рис. 6. Современные MRAM-ячейки с а) PSV-структурой; б) PSV-структурой и припиленным слоем; в) MTJ-структурой; г) вертикальной GMR-структурой

чаются, и для изменения ориентации магнитного момента одной ("мягкой") пленки требуется магнитное поле меньшей напряженности, чем для другой ("жесткой"). Такие ячейки могут быть выполнены на пленках одного и того же материала, но различной толщины – более тонкой, "мягкой", и более толстой, "жесткой" (рис. 6а). При записи данных в PSV-ячейку ток шины слов (около 10 мА) изменяет магнитный момент жесткого слоя ячейки, через разрядную шину которой проходит ток "адресации". Чтобы снизить ток записи, необходимо либо уменьшать толщину магнитных слоев (минимально возможная толщина ограничена термически наводимым спонтанным изменением ориентации магнитного момента), либо применять материалы с малым магнитным моментом.

Считывание данных – многоступенный процесс: по разрядной шине последовательно пропускают два импульса тока противоположной направленности (в шине слов – ток "адресации"). Суммарное значение тока обеих шин достаточно для изменения ориентации магнитного момента мягкого магнитного слоя, но не достаточно для изменения ориентации магнитного момента жесткого слоя. Таким образом, магнитный момент мягкого слоя дважды меняет свою ориентацию. В обоих случаях измеряется напряжение разрядной шины ячейки. Знак разности этих напряжений определяет ориентацию магнитного момента жесткого слоя и, следовательно, разрядность хранимых данных. Компьютерное моделирование показало, что длительность цикла записи или считывания составляет примерно 1 нс. Чтобы исключить операцию предварительной записи и одну из операций считывания, была предложена структура спинового вентиля, в котором полярность одного из двух слоев "припилена" или фиксирована с помощью слоя антиферромагнита (рис. 6б).

Размер MRAM-ячейки с такой структурой может быть менее 0,2 мкм. Пока это магнитные ОЗУ с самой высокой плотностью упаковки. По-видимому, первоначально такие MRAM заменят ЭСРПЗУ и флэш-память в системах, где требуется высокая плотность или малое время записи.

Вместо разделительного проводящего слоя можно применить тонкий барьерный слой, наносимый поверх сэндвича, ни один слой которого не фиксирован. В отсутствие магнитного поля магнитные моменты двух слоев ориентированы антипараллельно и перпендикулярно вертикальной оси

структуры. Направление тока записи определяет ориентацию магнитного момента. Сверху на барьерный слой осаждается фиксированный синтетический антиферромагнит, состоящий из двух магнитных слоев, разделенных тонким слоем рутения. Верхний слой синтетического антиферромагнита фиксирован обычным антиферромагнитом (рис. 6в). Для синтетического антиферромагнита так же, как для структуры нефиксированного сэндвича, характерно очень слабое магнитное поле рассеяния. Между верхним слоем нефиксированного сэндвича и фиксированным антиферромагнитом может протекать туннельный ток, величину которого определяет ориентация магнитного поля этого верхнего слоя. Такая память получила название MRAM с магнитным туннельным переходом (Magnetic Tunneling Junction – MTJ). Отношение магнитных сопротивлений при подаче на барьер напряжения 100 мВ может достигать 40%, что соответствует напряжению считывания 30–40 мВ. Благодаря достаточно большому сопротивлению барьера ток считывания составляет примерно 20 мкА, ток записи в ячейке размером 1 мкм равен примерно 2,5 мА. MRAM этого типа считаются перспективными для применения в энергонезависимых системах памяти с высоким быстродействием, в том числе во встроенных защелках вычислительных систем с возможностью реконфигурации.

Но на этом проблемы создания быстродействующих, компактных магнитных ОЗУ не закончились. Магнитный момент современных MRAM ориентирован по длине многослойной структуры. Основная проблема такой памяти – возбуждение магнитными полюсами, формируемыми на концах прямоугольного магнитного элемента ячейки, бокового (за ее пределами) и размагничивающего (в ее пределах) полей. Сильное размагничивающее поле может привести к образованию краевых доменов и неконтролируемому разбросу порогового поля изменения магнитного момента. Для ослабления действия краевых доменов можно заострить концы ячейки, но это приведет к разбросу величины переключающего поля (из-за обусловленного технологическим процессом разброса формы заостренных концов) и, тем самым, к деградации характеристик адресации памяти. К тому же, при заострении концов увеличивается размер ячейки, а боковое поле, возбуждаемое даже при заостренных концах, существенно влияет на магнитную ориентацию соседних ячеек. Эти факторы ограничивают плотность упаковки ячеек памяти.

Возможное решение этих проблем – вертикальная MRAM-структура (VMRAM) с многослойными ячейками круглой формы (рис. 6г). Круговая конфигурация магнитного поля – самая стабильная, а благодаря замкнутому магнитному потоку ни боковое поле, ни поле размагничивания не возникают. Плотность размещения ячеек памя-



ти зависит лишь от ограничений технологического процесса: площадь ячейки памяти может составлять 4 мкм². Плотность записи информации в VМRAM-памяти, в предположении, что вся КМОП-схема управления, изготовленная по 0,18-мкм технологии, располагается под накопительным элементом, оценивается в 5 Гбит/дюйм² (около 0,8 Гбит/см²), а максимально возможная – в 400 Гбит/дюйм² (62 Гбит/см²). В отличие от плоских MRAM значения напряжения записи "1" и "0" в памяти VМRAM-типа отличаются всего на несколько милливольт. Что еще важнее, отношение сигнал/шум, зависящее от магниторезистивного отношения, для VМRAM может достигать больших величин. Для ячеек с туннельным промежуточным слоем состава CoFe/Al₂O₃/CoFe магниторезистивное отношение составляет 20–40%. Но существуют множество магнитных материалов, у которых коэффициент поляризации магнитного момента, определяющий величину магниторезистивного отношения, достигает 100%. Если удастся создать VМRAM на основе таких материалов, появится возможность получить элементы памяти с магниторезистивным отношением, на порядок большим, чем у современных элементов. В результате по своим характеристикам каждая ячейка VМRAM будет аналогична идеальному ключу, т.е. транзистору, сохраняя при этом свойство энергонезависимости. Чип, содержащий такие магнетоэлектронные "ключи" (элементы, не только сохраняющие информацию, но и способные одновременно выполнять логические функции), – идеальная платформа для синтеза аппаратных и программных средств.

Многие крупные компании – Honeywell, IBM, Microm Technologies, Motorola, Nonvolatile Electronics, Union Semiconductor, Hewlett-Packard, NEC, Toshiba, Samsung – достигли определенных успехов в разработке MRAM. Учеными IBM значительно улучшены магнитные

и изолирующие материалы, необходимые для создания МТJ-устройств. Это позволило IBM в конце 2000 года заключить соглашение с компанией Infineon Technologies на разработку и освоение к 2004 году производства магнитных ОЗУ емкостью 256 Мбит на 200-мм пластинах. Серьезную конкуренцию им может составить фирма Motorola, сообщившая на международной конференции по магнетизму IEEE 2001 года о создании опытной 256-Кбит MRAM с значениями времени выборки и цикла записи/считывания 14 и 24 нс, соответственно (для сравнения: время выборки СОЗУ составляет 10–30 нс, ДОЗУ – более 30 нс). Ячейки памяти имеют МТJ-структуру, которая выполнена поверх предназначенного для повышения уровня считываемого сигнала транзистора с минимальными размерами элементов 0,6 мкм. Ячейка занимает площадь в 7,1 мкм². К 2004 году Motorola намерена выпустить MRAM емкостью 32 Мбит с размерами элементов 0,18 мкм.

Рынок MRAM может стать большим. Согласно прогнозам Ассоциации полупроводниковой промышленности (Semiconductor Industry Association – SIA) США, мировые продажи ДОЗУ к 2003 году достигнут 52,2 млрд. долл., флэш-памяти – 22,6 млрд. долл. Конечно, нет никакой гарантии, что MRAM начнут активно вторгаться на эти секторы рынка полупроводниковых ЗУ. Но даже если на их долю придется 1–2% этих продаж, овчинка стоит выделки.

ЛИТЕРАТУРА

EDN, Apr.26, 2001.

www.celis-semi.com

www.motorola.com

www.saifun.com

Data Storage Magazine, July 2001.