

## НОВЫЕ ВИДЫ ПАМЯТИ – РАЗРАБОТКИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ

В современных компьютерах, автомобилях, сотовых телефонах, мультимедийных смарт-картах используются миллиарды микросхем памяти. Причем в основном это – микросхемы флеш-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 данных на протяжении многих лет (флеш-память начинает терять данные через  $10^6$  циклов). Правда, пока они не могут конкурировать с современными достаточно дешевыми и постоянно совершенствуемыми энергонезависимыми типами памяти. Поиски новых типов памяти ведутся достаточно давно.

В 2009 году во время Международной встречи по электронным устройствам (International Electron Devices Meeting, IEDM), проходящей в Сан-Франциско, было представлено множество разработок в качестве кандидатов на "универсальную память" – т.е. устройств, позволяющих выполнять функции как оперативного, так и долговременного, энергонезависимого хранения. Все технологии, на которых они базируются, не являются новинками, но их массовое практическое внедрение в ближайшем будущем по-прежнему под вопросом, а депрессивное состояние рынка, скорее всего, еще более отодвинет сроки их выхода на коммерческий уровень.

Среди основных претендентов на звание "универсальной" – сегнетоэлектрическая память (Ferroelectric Random Access Memory, FRAM), магниторезистивная память (magnetoresistive random-access memory, MRAM), память с изменением фазового состояния (phase change memory, PCM), память на базе программируемой металлизации ячейки (programmable metallization cell, PMC) и резистивная память (resistive random-access memory, RRAM).

И.Романова

Экономическая ситуация сегодня вынуждает компании, работающие на этом рынке, тщательнее выбирать, в какую из множества технологий вкладывать средства, потому что развивать несколько направлений параллельно может оказаться очень дорого. Оценивая представленные разновидности перспективных решений, специалисты не могут выделить явных фаворитов среди новых видов памяти и пока рассматривают их скорее как нишевые продукты, чем действительно "универсальную память", являющуюся оптимальным выбором во всех возможных случаях.

### МАГНИТОРЕЗИСТИВНАЯ ПАМЯТЬ MRAM (MAGNETORESISTIVE RANDOM ACCESS MEMORY)

Сегодня объем мирового рынка микросхем памяти, по некоторым оценкам, превышает 48 млрд. долл. США и продолжает расти. Чтобы выйти на этот рынок устройств памяти, необходимо предложить новый, уникальный продукт, сочетающий в себе преимущества всех распространенных технологий: энергонезависимое хранение данных практически неограниченное время без необходимости регенерации, скорость чтения/записи, сравнимую с лидирующей на сегодняшний день технологией SRAM, неограниченное число циклов стирания/записи данных, высокую масштабируемость и плотность ячеек для создания микросхем памяти различного объема. Наиболее близко к решению этой задачи подошла технология MRAM. Конечно, скорость чтения/записи еще не достигла долей наносекунд, пока не отработаны технологические процессы создания микросхем MRAM объемом сотни мегабит и в компактных корпусах, стоимость не всегда та, что хотелось бы. Но уже сейчас можно с достаточной уверенностью утверждать, что технология MRAM преодолет эти недостатки и через несколько лет постепенно начнет отвоевывать значительную часть рынка у существующих технологий памяти.

Технология MRAM обладает всеми необходимыми свойствами для того, чтобы стать "универсальной памятью", успешно совмещая в себе основные преимущества различных типов энергонезависимой и оперативной памяти.



ти. Кроме того, существует ряд уникальных особенностей, открывающих широкие рыночные перспективы для данного устройства.

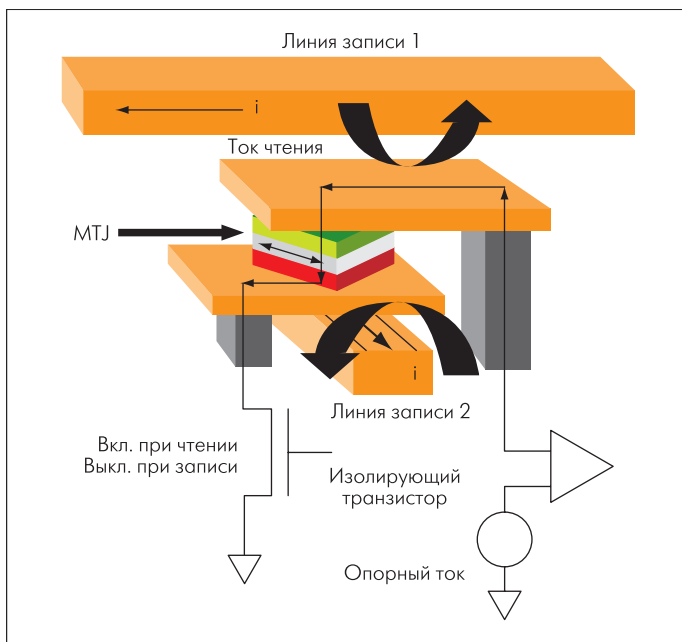
Такие крупные фирмы, как IBM, Cypress, Toshiba, Renesas, Hitachi, Mitsubishi, Motorola и др., работали над созданием памяти MRAM более 10 лет. Компания Motorola приступила к исследованиям в области магниторезистивных структур в 1995 году совместно с агентством перспективных исследований МО США (DARPA US). С 2004 года после отделения всего сектора полупроводниковых компонентов от Motorola уже независимая компания Freescale Semiconductor продолжила работы по доведению продукта до серийного производства. В результате в июле 2006 года был анонсирован законченный коммерческий продукт, использующий технологию MRAM, – автономный модуль MR2A16A с объемом памяти 4 Мбит.

Микросхема MR2A16A состоит из массива ячеек памяти, каждая из которых содержит один транзистор и один магнитный туннельный переход (1T1MTJ) (рис.1). Магнитный туннельный переход (MTJ) является основой битовой ячейки MRAM. Он состоит из очень тонкого диэлектрического слоя оксида алюминия (AlOx), помещенного между двумя магнитными слоями. Каждый из магнитных слоев имеет свой вектор магнитного поля. Верхний магнитный слой называют свободным слоем, он может изменять вектор своего поля. Магнитный слой основания называют фиксированным слоем, вектор его магнитного поля заблокирован и не изменяется.

Направление вектора магнитного поля свободного слоя определяет состояние бита как логического нуля или единицы. Если векторы намагниченности свободного слоя и фиксированного слоя сориентированы в одном направлении, сопротивление структуры MTJ низкое. Если векторы намагниченности свободного и фиксированного слоев развернуты на 180° относительно друг друга (противоположны), сопротивление структуры MTJ высокое. Величина сопротивления перехода MTJ определяет, будет ли прочитано содержимое ячейки как "0" или "1" при прохождении через ячейку тока чтения.

Модуль памяти MR2A16A изготовлен по технологии 0,18 мкм. Емкость микросхемы составляет 4 Мбит с организацией 256K×16 бит. В зависимости от состояния управляющих входов данные могут быть записаны/считаны как в 8-битном, так и в 16-битном формате. Устройство также поддерживает полностью статические операции.

Времена циклов чтения/записи/стирания малы, симметричны по длительности и составляют 35 нс. Диапазон рабочих напряжений микросхемы – 3–3,6 В, встроенная схема мониторинга питания предотвращает запись ячеек памяти при снижении уровня питающего напряжения более чем на 0,5 В относительно рабочего.



**Рис.1. Структура ячейки MRAM-памяти**

Микросхемы MR2A16A выпускаются в корпусе 44-TSOP (type-II) в соответствии с техническими условиями RoHS. В корпус микросхемы встроено защитное экранирование от внешних электромагнитных помех. Конфигурация выводов MR2A16A полностью соответствует микросхемам памяти типа SRAM, но принцип работы с памятью MRAM такой же, как и с SRAM. Поэтому чипы памяти MR2A16A могут применяться в существующих устройствах и системах, использующих память SRAM, без каких-либо изменений в схеме.

Данные сохраняются в ячейках за счет намагниченности, а не за счет заряда, что позволяет сохранять информацию без регенерации и без питающего напряжения 10 лет и более. Переключение состояния битов осуществляется без перемещения атомов и электронов внутри материалов, поэтому отсутствует эффект постепенной деградации внутренней структуры битовой ячейки и обеспечивается стабильность характеристик памяти во время всего срока службы микросхемы. Благодаря этому число циклов перезаписи памяти MRAM практически бесконечно (более  $10^{16}$ ), а структура ячеек памяти и рабочие характеристики не деградируют в процессе эксплуатации во всем диапазоне рабочих температур и напряжений. Эксперименты показали, что ячейки памяти MR2A16A выдерживают более 58 трлн. циклов записи и стирания, работая в наихудших эксплуатационных условиях.

До настоящего времени не было зарегистрировано ни одного сбоя в работе ячеек памяти, и эксперимент по тестированию количества циклов записи/стирания ячеек памяти MRAM продолжается. В ходе испытаний микросхемы MR2A16A работали на частоте 4 МГц при температуре окружающей среды 90°C и на частоте 28,5 МГц при температуре окружающей среды 70°C. В табл.1 приведены основные параметры микросхем MRAM-памяти компании Freescale.

Таблица 1. Основные параметры микросхем MRAM компании Freescale

Параметр	MR2A16A	MR1A16A	MR0A16A
	Неразрушающие чтение/запись		
	Побитовое стирание/запись со скоростью до 28 Мбит/с		
Энергонезависимая память с практически неограниченным числом циклов чтения/записи	Более $10^{16}$		
Симметричные времена циклов чтения/записи/стирания, нс	35		
Объем памяти, Мбит	4	2	1
Организация памяти	256×16	128×16	64×16
Шина данных, бит	8/16, настраиваемая		
Время хранения информации, лет	Более 20		
Напряжение питания, В	3,0–3,6		
Слежение за пониженным напряжением	Да		
Совместимость по выводам	SRAM		
Рабочий температурный диапазон, °C Коммерческий 0...70 Промышленный -40...85 Расширенный -40...105	MR2A16AYS35 MR2A16ACYS35 MR2A16AVYS35	MR1A16AYS35 MR1A16ACYS35 MR1A16AVYS35	MR0A16AYS35 MR0A16ACYS35 MR0A16AVYS35
Корпус	TSOP44, R <sub>g</sub> HS, внутреннее экранирование		
Выводы микросхемы	TTL совместимые		
Поддержка статических операций	Да		
Доступность, образцы	Серийное производство, бесплатные образцы с сайта производителя	Серийное производство	Серийное производство, бесплатные образцы с сайта производителя

На сегодняшний день основными факторами, сдерживающими начало массового применения памяти MRAM, являются стоимость микросхем, скудость линейки продуктов с различным объемом памяти, а также новизна технологии. По мере удешевления технологии производства и появления новых продуктов MRAM от различных производителей стоимость элементов памяти будет стремительно снижаться. Однако уже сейчас можно говорить о многочисленных областях электронной промышленности, в которых использование магниторезистивной памяти будет экономически оправдано.

Наиболее высока потребность в памяти MRAM в коммерческих системах, где требуется сохранение данных при различных нештатных ситуациях, например аварийном отключении питающего напряжения. Эта память является также идеальным решением для различных регистраторов и устройств типа "черного ящика". Данные могут

сохраняться на скоростях, сравнимых с памятью типа SRAM, при этом они не будут утеряны вследствие отключения электроэнергии.

Если в процессе развития технологии MRAM не возникнет ограничений на создание памяти объемом десятки и сотни гигабит в компактном форм-факторе, следует ожидать появления быстродействующих накопителей для хранения прикладного программного обеспечения и данных. Это даст возможность создавать персональные компьютеры и другие системы и устройства, которые будут загружаться практически мгновенно по сравнению, например, с нынешними ПК, в которых процесс загрузки занимает от десятков секунд до нескольких минут. Кроме того, появится возможность возобновлять выполнение программ после включения устройства с того момента, на котором оно было прервано при выключении напряжения питания.

В перспективе компания Freescale планирует развивать продукты MRAM в двух направлениях: выпуск отдельных чипов памяти и интеграция в собственные 8-, 16- и 32-разрядные микроконтроллеры и микропроцессоры.

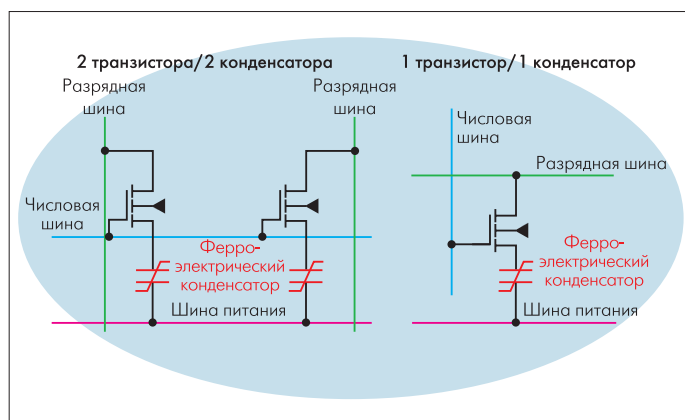
Ближайшая цель компании – ввести MRAM в систему управления автомобиля. Компания разрабатывает 16-Мбит MRAM по 130-нм технологии, ориентированную на взаимодействие с различными автомобильными датчиками, в частности, в устройстве автомобильного акселерометра.

В разработки и производство MRAM включилась также компания Honeywell (США), заключив с Freescale лицензионное соглашение на использование ее базовой технологии. Honeywell работает над расширением рабочего температурного диапазона MRAM до военного стандарта от -55 до 125°C, чтобы удовлетворить требованиям аэрокосмической промышленности.

В области MRAM-памяти больших успехов достигла компания NEC. Она разработала MRAM, которая может работать на частоте 250 МГц. По заявлениям NEC, это рекордный показатель для подобного типа чипов памяти. Емкость микросхемы составляет 1 Мбит. Предполагается, что новые чипы MRAM в перспективе смогут заменить в компьютерных устройствах статическую оперативную память (SRAM). Кроме того, магниторезистивная память вполне может стать альтернативой традиционной флеш-памяти в цифровых фотоаппаратах, плеерах, смартфонах и прочих гаджетах.

### FRAM-ПАМЯТЬ (FERROELECTRIC RANDOM ACCESS MEMORY)

Энергонезависимая ферроэлектрическая память FRAM до недавнего времени наиболее полно соответствовала определению "универсальной памяти" из всех доступных на рынке серийно выпускаемых микросхем. Однако и у нее есть ряд недостатков, самый серьезный из которых заключается в большом размере ее ячеек. Благодаря усилиям разработчиков он постепенно приближается к физическому



**Рис.2. Пример ячейки FRAM-памяти**

пределу, за которым дальнейшее уменьшение габаритов сопряжено с серьезными техническими и технологическими проблемами. Однако при этом ячейки остаются достаточно крупными, что не позволяет создавать микросхемы памяти большого объема с малыми габаритами. На сегодняшний день объем памяти микросхем FRAM составляет от

единиц килобит до единиц мегабит. Производители принимают попытки создать память объемом десятки мегабит, однако серийное производство микросхем объемом 16, 32 либо 64 Мбит если и будет возможно, то не раньше чем через 3–5 лет.

Физический принцип хранения информации ячейки FRAM заключается в длительном энергонезависимом сохранении электрической поляризации ферроэлектрическим материалом. Направление вектора поляризации, соответствующее логическому "0" или "1", задается электрическим полем, приложенным к обкладкам конденсатора с ферроэлектрическим диэлектриком (рис.2). После отключения напряжения ферроэлектрик способен сохранять поляризацию очень долго: применяемые сейчас в производстве материалы способны хранить поляризацию более 45 лет в крайних пределах диапазона условий эксплуатации. При нормальных условиях расчетный срок сохранности данных составляет тысячи лет.

Модули памяти FRAM требуют повторной перезаписи данных в ячейки после считывания. Этот эффект связан

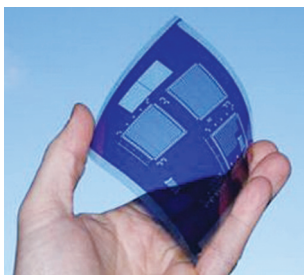
**Таблица 2. Низковольтные FRAM компании Ramtron**

Наименование	Интерфейс	Объем FRAM	Быстродействие	Ресурс	Напряжение питания, В	Тип корпусов	Состояние производства
FM28V020	8 бит	32 Кбайт	33 МГц (60 нс)	100 трлн. циклов	2,0–3,6	SOIC28	Разработка
FM28V050		64 Кбайт				TSOP32	Разработка
FM28V100		128 Кбайт				Нет данных	Разработка
						SOIC32	Разработка
	TSOP32		В производстве				
FM24V(R,N)05	I <sup>2</sup> C	512 Кбит	3,4 МГц			SOIC8 TDFN 4,5×4 мм	Образцы
FM24V(R,N)10		1 Мбит					Образцы
FM24V(R,N)02		256 Кбит					Образцы
FM25V(R,N)05	SPI	512 Кбит	40 МГц				В производстве
FM25V(R,N)10		1 Мбит					В производстве
FM25V(R,N)02		256 Кбит					Образцы

**Таблица 3. Микросхемы FRAM емкостью 2 и 4 Мбит компании Ramtron**

Наименование	Интерфейс	Объем FRAM	Быстродействие	Ресурс	Напряжение питания, В	Тип корпусов	Состояние производства
FM21L16	8/16	128×16	60 нс	100 трлн.	2,7–3,6	TSOPII-44	В производстве
FM22L16		256×16	55 нс	100 трлн.	2,7–3,6	TSOPII-44	В производстве
FM22LD16		256×16	55 нс	100 трлн.	2,7–3,6	FBGA-48	Образцы
FM25H20	SPI	2 Мбит	40 МГц	100 трлн.	2,7–3,6	TDFN-8	В производстве
FM25L512		512 Кбит	20 МГц	Неогр.	3,0–3,6	TDFN-8	В производстве
FM25V(R,N)0,5		512 Кбит	40 МГц	100 трлн.	2,0–3,6	SOIC-8	В производстве
FM25V(R,N)10		1 Мбит	40 МГц	100 трлн.	2,0–3,6	SOIC-8	В производстве
FM24V(R,N)05	I <sup>2</sup> C	512 Кбит	3,4 МГц	100 трлн.	2,0–3,6	SOIC-8	Образцы
FM24V(R,N)10		1 Мбит	3,4 МГц	100 трлн.	2,0–3,6	SOIC-8	Образцы
FM24C512		512 Кбит	1 МГц	10 млрд.	4,5–5,5	SOIC-8	В производстве





**Рис.3. Пример FRAM-памяти на полимерной пленке**

с деградацией битовых ячеек памяти FRAM при операции чтения. Как следствие, это может привести к потере данных, если произойдет случайное отключение питания во время операции чтения, что для энергонезависимой памяти является очень существенным недостатком. Лидером в производстве FRAM-памяти является компания Ramtron (табл.2, 3).

Говоря о сегнетоэлектрической памяти, следует иметь в виду, что запоминающие устройства, основанные на этом эффекте, существуют в двух исполнениях: давно известном "классическом" варианте, с реализацией в виде традиционных полупроводниковых ИС, и в варианте на тонких полимерных пленках (PFRAM – полимерные сегнетоэлектрические ОЗУ), который может быть исполнен в изделиях произвольного вида – плоских, цилиндрических, кубических, жестких или гибких (рис.3). О первом из двух видов технологий сказано уже достаточно. Второй вариант пока малоизвестен, но обладает хорошим потенциалом.

PFRAM имеют наибольшую плотность записи данных. По оценкам аналитиков фирмы Web-Foot Research, удельный объем такой памяти, отнесенный к одному квадрат-

ному сантиметру площади, почти в 20 раз больше, чем у обычной флеш-памяти. Разработки этого типа памяти ведет фирма Intel в содружестве с Thin Film Electronics – дочерней компанией шведской фирмы Opticom, 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

**Таблица 4. Сравнительные характеристики различных технологий памяти**

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



**Таблица 5. Параметры серийных микросхем энергонезависимой памяти**

Параметр	Flash		FRAM		MRAM		PCM
	Intel	Samsung	Ramtron	Futjitsu	Cypress	Freescape	BAE Sys.
Наименование	JS29F16G08	K9NBG08U5M	FM20L08	MB85R1001	CY9C6225	MR2A16A	251A184
Объем памяти	16 Гбит	32 Гбит	1 Мбит	1 Мбит	256Кбит	4 Мбит	4 Мбит
Организация	2 Гбит×8	4 Гбит×8	128 Кбит×8	128 Кбит×8	32 Кбит×8	256 Кбит×8	512 Кбит×8
Интерфейс	Параллел.	Параллел.	Параллел.	Параллел.	Параллел.	Параллел.	Нет данных
Длительность цикла записи в страничном режиме	220мкс/с.**	200мкс/с.**	30 нс*	Нет	Нет	Нет	Нет данных
Длительность цикла записи при произвольном доступе, нс	Произвольный доступ возможен, но работа в таком режиме не рациональна		350	250	70	35	500
Длительность цикла чтения при произвольном доступе	25 мкс	25 мкс	350 нс	250 нс	70 нс	35 нс	70 нс
Напряжение питания, В	2,7–3,6	2,7–3,6	3,3	3,3–3,6	2,7–3,6	3,0–3,6	3,3
Число циклов обращения	10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup>	Неогранич.	10 <sup>10</sup>	10 <sup>15</sup>	Неогранич.	Нет данных
Длительность хранения данных, лет	10	10	10	10	10	10	Нет данных
Ток потребления standby, мкА	40	20	25	100	90	9000	Нет данных
Ток потребления в активном режиме, мА	25	25	22	10	60	105	Нет данных
Произвольная адресация данных	Произвольный доступ возможен, но работа в таком режиме не рациональна		Да	Да	Да	Да	Нет данных
Радиационная стойкость	Низкая		Нет данных	Нет данных	Нет данных	Нет данных	Высокая
Удельная стоимость, бит/долл.	Низкая		Средняя	Средняя	Высокая	Высокая	Нет данных

\* В пределах страницы.

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

400 тыс. CD, 60 тыс. DVD. 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 воздействию сопоставима 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.

Сравнительные характеристики различных технологий памяти приведены в табл.4, а параметры серийных микросхем энергонезависимой памяти, выпускаемых ведущими производителями, – в табл.5.

## РЕЗИСТИВНАЯ ПАМЯТЬ RRAM

RRAM – мемристор – устройство, способное изменять сопротивление в зависимости от величины проходящего тока. Само название элемента является производным от английских слов memory (память) и resistor (электрическое сопротивление), т.е. по сути прибор обладает способностью "помнить" объем заряда, успевшего пройти по цепи до момента отключения питания.

Мемристор был предложен в 1971 году профессором Леоном Чуа из университета Калифорнии в Беркли. Долгое время мемристор считался лишь теоретической концепцией, неосуществимой на практике, хотя некоторые ученые и прочили этому гипотетическому элементу большое и славное будущее. Сам Леон Чуа утверждал, что рано или поздно мемристор, наряду с конденсатором, сопротивлением и катушкой индуктивности, станет четвертым базовым элементом электронных схем. Но главная роль мемристора, по мнению профессора Чуа, заключается в радикальном изменении принципов создания электронных схем. Вплоть до настоящего времени краеугольным камнем схемотехники было соотношение между напряжением и зарядом на тех или иных элементах схемы, однако более перс-

пективным подходом, утверждает профессор, является рассмотрение соотношения между зарядом и скоростью изменения напряжения.

Лабораторный образец мемристора был создан в 2008 году коллективом ученых во главе с Р.С. Уильямсом в исследовательской лаборатории фирмы Hewlett-Packard (рис.4). В отличие от теоретической модели, устройство не накапливает заряд, подобно конденсатору, и не поддерживает магнитный поток, как катушка индуктивности. Работа устройства обеспечивается за счет химических превращений в тонкой (5 нм) двухслойной пленке двуокиси титана. Один из слоев пленки слегка обеднен кислородом, и кислородные дырки мигрируют между слоями под действием приложенного к устройству электрического напряжения.

Наблюдающееся в мемристоре явление гистерезиса позволяет использовать его в качестве ячейки памяти.

По сравнению с современными типами памяти мемристоры обладают важными достоинствами. Поскольку они энергонезависимы и имеют высокое быстродействие, записывающие устройства на их основе позволяют заменить флэш-память и память DRAM. Загрузка будет происходить мгновенно, минуя считывание информации с "медленных" жестких дисков.

По мнению Грегга Снайдера (специалист компании HP), мемристор станет одним из основных элементов наноразмерных устройств, эмулирующих работу человеческого мозга (миниатюрные наноразмерные устройства будут объединены в единую сеть, а мемристор станет элементом, ответственным за "память" искусственного интеллекта).

Как утверждается, создание нового элемента может стать наиболее значительным событием десятилетия в микроэлектронике и привести к кардинальным изменениям в технологии хранения информации, поскольку мемристор способен хранить данные без затрат энергии на протяжении длительного времени. Микросхемы памяти, построенные на базе мемристоров, обеспечат возможность моментального включения компьютеров за счет отказа от необходимости начальной загрузки, понижение энергопотребления мобильных устройств и другие перспективы.

По мнению HP, новая технология вполне может претендовать на роль универсальной памяти будущего, которая од-

новременно заменит используемую сейчас динамическую память с произвольным доступом и флэш-память.

В февраля 2009 года появилось сообщение, что в американском Национальном институте стандартов и технологий NIST разработан первый гибкий и готовый к промышленному использованию мемристор. Ранее здесь также работали над технологией мемристоров, но до сих пор они были выполнены только в твердом исполнении. В основе созданного в NIST мемристора находятся соединения на базе оксида титана и прозрачных многослойных полимерных пленок. По утверждению специалистов, гибкий модуль памяти для работы требует менее 10 В, причем свою работоспособность он сохраняет даже после 4000 сгибаний. Они считают, что это гибкий компонент памяти найдет применение в метрологии и гибкой электронике.

Мемристоры позволяют создавать чипы памяти будущего, которые способны сохранять данные без электричества на протяжении длительного периода времени, что позволит избежать долгого процесса загрузки компьютеров, повысить их производительность, а также многократно снизить энергопотребление электронной техники.

В NIST рассказывают, что создали мемристоры при помощи недорогой техники, предусматривающей помещение оксида титана в гелевый наполнитель, который позже образует полимерные пленки. Созданный мемристор сохнет при комнатной температуре и давлении.

### PRAM-ПАМЯТЬ (PHASE CHANGE RANDOM ACCESS MEMORY)

Речь идет о так называемой "памяти с изменением фазового состояния" (phase change memory, PCM или PRAM), основанной на способности халькогенида (chalcogenide) под воздействием нагрева и электрических полей изменять свое состояние с непроводящего аморфного в проводящее кристаллическое. Данный вид памяти прекрасно справляется как с хранением больших объемов данных, так и с выполнением выполняемого кода, представляя, таким образом, удивительный сплав флэш-памяти и динамической памяти с произвольным доступом.

При нагреве и последующем охлаждении халькогенид быстро переходит из стабильного аморфного в стабильное кристаллическое состояние (рис.5). 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. Так же, как и в MRAM, при считывании данных измеряется сопротивление ячейки памяти, но в отличие

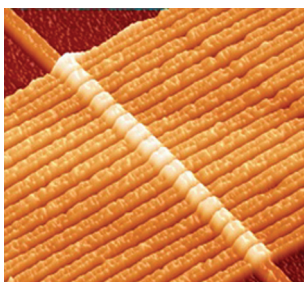
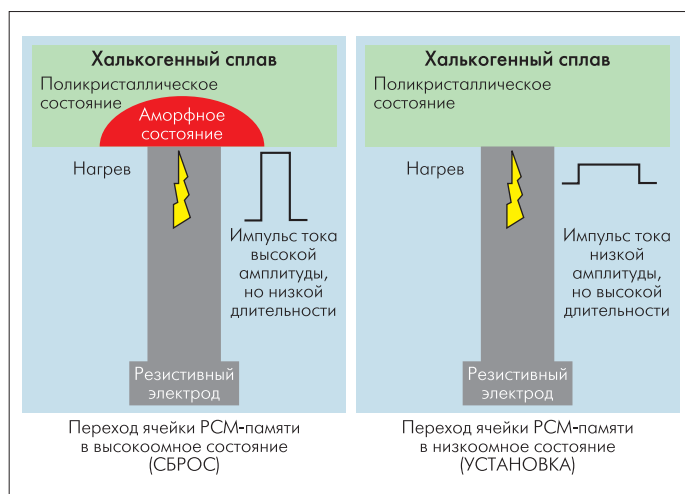


Рис.4. Вид структуры мемристоров (изображение в АСМ)



**Рис.5. Ячейка PCM-памяти**

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.

К достоинствам PCM-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  $10^{13}$ . PCM-матрицы, не требующие при изготовлении высокотемпературных процессов, легко объединять с кремниевыми логическими устройствами.

Лидерами опытного производства PCM в настоящее время являются Samsung и совместное предприятие Intel и STMicroelectronics – компания Numonyx.

Ожидается, что PRAM постепенно заменит память типа NOR в мобильных телефонах. Как известно, на рынке флеш-памяти Samsung является лидером в сегменте NAND, но в секторе NOR-памяти в технологическом плане ее опережают другие компании (включая Intel), которые выпускают чипы по 65-нм нормам. Осваивая PRAM-память, Samsung надеется в будущем занять лидирующие позиции на этом рынке. Амбициозные планы корейского производителя, похоже, имеют все основания реализоваться.

Samsung Electronics Co. Ltd начала поставки первого полностью функционального прототипа PRAM-чипа памяти (Phase-change Random Access Memory, или память с произвольным доступом на основе фазовых превращений) емкостью 512 Мбит.

Новая технология позволяет перезаписывать данные без предварительного затирания уже существующих, что выливается в 30-кратное превосходство в скорости над традиционной флеш-памятью. Ожидается десятикратное увеличе-

ние срока службы PRAM-чипов. Новые чипы компактнее и, что немаловажно, на 10% дешевле.

Intel и STMicroelectronics начали поставлять первые образцы PRAM в 2008 году. По утверждению специалистов, эти первые функционирующие образцы PRAM предназначены для ознакомления потенциальных клиентов разработчиков с технологией.

Кремниевое изделие получило кодовое имя Alverstone. Как утверждают разработчики, новая память отличается очень высокими скоростями чтения/записи, а ее потребляемая мощность гораздо ниже по сравнению с традиционными микросхемами типа флеш.

Руководитель по разработке новых технологий предприятия Numonyx, основанного Intel и STMicroelectronics, Эд Доллер (Ed Doller) отметил, что представление чипов PRAM является наиболее важным событием в отрасли энергонезависимой памяти за последние 40 лет. Южнокорейский производитель микросхем памяти Hynix Semiconductor Inc. объявила о получении лицензии на производство чипов памяти PRAM, интеллектуальная собственность на которые принадлежит компании Ovonyx Inc. Лицензионное соглашение предусматривает активное сотрудничество двух компаний с целью совершенствования технологии PCM.

Последние несколько лет компания Ovonyx и ее главный акционер Energy Conversion Devices активно продвигают свое детище путем налаживания тесных связей с ведущими производителями оперативной памяти, среди них: BAE Systems, Intel, ST Microelectronics, Samsung, Nanochip, Elpida Memory и Qimonda.

## ЛИТЕРАТУРА

**Валентинова М.** Полупроводниковая энергонезависимая память. На перепутье. – ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес, 2003, № 5.

**Зайцев И.** Сравнение новых технологий энергонезависимой памяти. – Компоненты и технологии, 2006, № 4.

**Вихарев Л.** Микросхемы энергонезависимой памяти: накануне революции. – Компоненты и технологии, 2003, № 9.

Материалы сайта компании Thin film electronics <http://www.thinfilm.se/tech/default.aspx>

**Зайцев И.** Ramtron: новые продукты с F-RAM-памятью. – Компоненты и технологии, 2009, № 2. [www.eltech.spb.ru](http://www.eltech.spb.ru)

**Соколов М.** Магниторезистивная память MRAM – быстродействующие ОЗУ и ПЗУ в одной микросхеме. – Электронные компоненты, 2007, № 1.

**Вихарев Л.** Перспективные технологии производства памяти. Современное состояние. – Компоненты и технологии, 2006, № 12.