

Содержание

1	SRAM (Static RAM).....	2
2	DRAM (Dynamic RAM)	2
3	DDRAM	3
4	DDR2- модули	3
4.1	Совместимость.....	3
5	DDR3.....	4
5.1	Совместимость.....	4
5.2	Возможности.....	4
5.3	Преимущества и недостатки	5
6	FRAM.....	5
6.1	Описание	6
6.2	Плотность	8
6.3	Энергопотребление	9
6.4	Производительность.....	9
6.5	Общая оценка.....	10
6.6	Дальнейшее развитие	11
7	MRAM	11
7.1	Описание MRAM.....	11
7.2	Сравнение с другими типами памяти.....	13
7.3	История.....	16
8	PCM.....	17
9	nvSRAM.....	20
10	DPRAM.....	20
11	Мемристор	21
11.1	Математическая модель.....	21
12	Интерфейсы для подключения ОЗУ	22

1 SRAM (Static RAM)

ОЗУ, собранное на [триггерах](#), называется статической памятью с произвольным доступом или просто статической памятью. Достоинство этого вида памяти — скорость. Поскольку триггеры собраны на [вентиллях](#), а время задержки вентиля очень мало, то и переключение состояния триггера происходит очень быстро. Данный вид памяти не лишён недостатков. Во-первых, группа [транзисторов](#), входящих в состав триггера, обходится дороже, даже если они [вытравляются](#) миллионами на одной кремниевой подложке. Кроме того, группа транзисторов занимает гораздо больше места, поскольку между транзисторами, которые образуют триггер, должны быть вытравлены линии связи.

2 DRAM (Dynamic RAM)

Более экономичный вид памяти. Для хранения разряда ([бита](#) или [трита](#)) используется схема, состоящая из одного [конденсатора](#) и одного транзистора (в некоторых вариациях конденсаторов два). Такой вид памяти решает, во-первых, проблему дороговизны (один конденсатор и один транзистор дешевле нескольких транзисторов) и во-вторых, компактности (там, где в SRAM размещается один триггер, то есть один бит, можно уместить восемь конденсаторов и транзисторов). Есть и свои минусы. Во-первых, память на основе конденсаторов работает медленнее, поскольку если в SRAM изменение напряжения на входе триггера сразу же приводит к изменению его состояния, то для того чтобы установить в единицу один разряд (один бит) памяти на основе конденсатора, этот конденсатор нужно зарядить, а для того чтобы разряд установить в ноль, соответственно, разрядить. А это гораздо более длительные операции (в 10 и более раз), чем переключение триггера, даже если конденсатор имеет весьма небольшие размеры. Второй существенный минус — конденсаторы склонны к «стеканию» заряда; проще говоря, со временем конденсаторы разряжаются. Причём разряжаются они тем быстрее, чем меньше их ёмкость. В связи с этим обстоятельством, дабы не потерять содержимое памяти, заряд конденсаторов необходимо регенерировать через определённый интервал времени — для восстановления. Регенерация выполняется путём считывания заряда (через транзистор). Контроллер памяти периодически приостанавливает все операции с памятью для регенерации её содержимого, что значительно снижает производительность данного вида ОЗУ. Память на конденсаторах получила своё название Dynamic RAM (динамическая память) как раз за то, что разряды в ней хранятся не статически, а «стекают» динамически во времени.

Таким образом, DRAM дешевле SRAM и её плотность выше, что позволяет на том же пространстве кремниевой подложки размещать больше битов, но при этом её быстродействие ниже. SRAM, наоборот, более быстрая память, но зато и дороже. В связи с этим обычную память строят на модулях DRAM, а SRAM используется для построения, например, кэш-памяти в микропроцессорах.

3 DDRAM

4 DDR2- модули

Как и [DDR SDRAM](#), DDR2 SDRAM использует передачу данных по обоим срезам [тактового сигнала](#), за счёт чего при такой же частоте шины памяти, как и в обычной SDRAM, можно фактически удвоить скорость передачи данных (например, при работе DDR2 на частоте 100 МГц эквивалентная эффективная частота для SDRAM получается 200 МГц). Основное отличие DDR2 от DDR — вдвое большая частота работы шины, по которой данные передаются в буфер микросхемы памяти. При этом, чтобы обеспечить необходимый поток данных, передача на шину осуществляется из четырёх мест одновременно. Итоговые задержки оказываются выше, чем для DDR.

Микросхемы памяти DDR2 производятся в новом корпусе типа [BGA](#) (FBGA).

Напряжение питания микросхем 1,8 В

Потребляемая мощность: 247 мВт

Интерфейс ввода-вывода: SSTL_18

Burst Length: 4/8

Prefetch Size: 4-bit

Новые функции: ODT, OCD Calibration, Posted CAS, AL (Additive Latency)

Быстрейшей серийно выпускаемой памятью DDRII является Team Xtrem PC2-10400, которая, однако, имеет большие [задержки](#) - 6-6-6-х и повышенное напряжение питания - 2.35-2.45 В. Для [таймингов](#) 5-5-5-х, по-видимому, быстрейшими серийными модулями являются PC2-9600, а для 4-4-4-х - PC2-8888 производства Corsair и Geil Ultra Plus PC2-9280. Существуют также модули с наименьшими задержками, CL3, со значительно меньшей скоростью работы. Самыми быстрыми из них являются PC-6400.

Преимущества по сравнению с DDR

- Более высокая полоса пропускания
- Как правило, меньшее энергопотребление
- Улучшенная конструкция, способствующая охлаждению

Недостатки по сравнению с DDR

- Обычно более высокая [CAS-латентность](#) (от 3 до 6)
- Итоговые задержки оказываются выше
- Первоначально более высокая стоимость

4.1 Совместимость

DDR2 не является обратно совместимой с DDR, поэтому ключ на модулях DDR2 расположен в другом месте по сравнению с DDR и вставить модуль DDR2 в разъем DDR, не повредив последний (или первый), невозможно.

Более скоростные модули DDR2 совместимы с более медленными, при этом работа возможна на частоте самого медленного модуля системы.

5 DDR3

DDR3 SDRAM ([англ.](#) double-data-rate three synchronous dynamic random access memory — синхронная динамическая память с произвольным доступом и удвоенной скоростью передачи данных, третье поколение) — это тип [оперативной памяти](#) используемой в [вычислительной технике](#) в качестве оперативной и видеопамяти. Пришла на смену памяти типа [DDR2 SDRAM](#).

DDR3 имеет уменьшенное на 40 % потребление энергии по сравнению с модулями DDR2, что обусловлено пониженным (1,5 В, по сравнению с 1,8 В для DDR2 и 2,5 В для DDR) [напряжением питания](#) ячеек памяти. Снижение напряжения питания достигается за счет использования 90-нм (вначале, в дальнейшем 65-, 50-, 40-нм) [техпроцесса](#) при производстве микросхем и применения транзисторов с двойным затвором Dual-gate (что способствует снижению токов утечки).

Микросхемы памяти DDR3 производятся исключительно в корпусах типа [BGA](#).

5.1 Совместимость

Модули [DIMM](#) с памятью DDR3 механически [не совместимы](#) с такими же модулями памяти DDR2 (ключ расположен в другом месте), поэтому DDR2 не могут быть установлены в слоты под DDR3 (это сделано с целью предотвращения ложной установки одних модулей вместо других — эти типы памяти не совпадают по электрическим параметрам). В переходный период производители будут выпускать также материнские платы, которые поддерживают оба типа памяти, имея соответствующие разъёмы (слоты) под каждый из двух типов (обычно они различаются цветами).

5.2 Возможности

5.2.1 Возможности микросхем DDR3 SDRAM:

- Предвыборка 4 бита
- Функция асинхронного сброса с отдельным контактом
- Поддержка компенсации времени готовности на системном уровне
- Зеркальное расположение контактов, удобное для сборки модулей
- Выполнение CAS Write Latency за такт
- Встроенная терминация данных
- Встроенная калибровка ввода/вывода (мониторинг времени готовности и корректировка уровней)
- Автоматическая калибровка шины данных

5.2.2 Возможности модулей DIMM DDR3:

- Последовательная топология управляющей шины (управление, команды, адреса) с внутримодульной терминацией
- Высокоточные резисторы в цепях калибровки

5.3 Преимущества и недостатки

5.3.1 Преимущества по сравнению с DDR2

- Более высокая полоса пропускания (до 2400 МГц)
- Меньшее энергопотребление и улучшенное энергосбережение
- Меньше тепловыделение (уменьшенное напряжение питания)

5.3.2 Недостатки по сравнению с DDR2

- Более высокая [CAS-латентность](#) (компенсируется большей пропускной способностью)

6 FRAM

Сегнетоэлектрическая оперативная память (Ferroelectric RAM, FeRAM или FRAM^[1]) — [оперативная память](#), по своему устройству схожая с [DRAM](#), но использующая слой [сегнетоэлектрика](#) вместо [диэлектрического](#) слоя для обеспечения энергонезависимости. FeRAM — одна из растущего числа альтернативных технологий [энергонезависимой памяти](#), предлагающая ту же самую функциональность, что и [флеш-память](#). Среди преимуществ FeRAM перед флэш-памятью называют низкое энергопотребление, более быструю запись информации и существенно увеличенное максимальное число (превышающее 10^{16} для устройств, рассчитанных на 3.3 В) циклов перезаписи. К недостаткам FeRAM относят: гораздо более низкую [плотность размещения информации](#), чем у флеш-устройств, ограниченную емкость накопителей и более высокую стоимость.

Разработка FeRAM началась в конце 1980-х. В 1991 году проводилась работа в [Лаборатории Реактивного Движения](#) NASA по улучшению методов чтения, включая новый метод неразрушающего чтения при помощи импульсов ультрафиолетового излучения.^[2] Значительная часть нынешней технологии FeRAM была разработана [fabless-компанией Ramtron International](#), специализирующейся в области полупроводниковой промышленности. Одним из главных лицензиатов стала [Fujitsu](#), обладающая по некоторым оценкам крупнейшей [базой](#) по производству полупроводников, в том числе производственной линии, подходящей для выпуска FeRAM. С 1999 года они использовали эту линию для выпуска отдельных чипов FeRAM наряду со специализированными чипами (например, чипы для смарт-карт) со встроенной памятью FeRAM. Это прекрасно вписывалось в планы Fujitsu по производству устройств, разработанных компанией Ramtron. Начиная с 2001 года компания [Texas Instruments](#) начинает сотрудничество с Ramtron в области разработки тестовых чипов FeRAM по обновленному процессу в 130 нм. Осенью 2005 года Ramtron объявила, что им удалось значительно улучшить прототипы 8 мегабитных FeRAM-чипов, произведенных с использованием мощностей Texas Instruments. Fujitsu и Seiko-Epson в 2005 году начали сотрудничество в области разработки 180 нм FeRAM-процесса. Об исследовательских проектах в области

FeRAM заявили [Samsung](#), [Matsushita](#), [Oki](#), [Toshiba](#), [Infineon](#), [Hynix](#), [Symetrix](#), [Кембриджский университет](#), [Торонтский университет](#) и [Interuniversity Microelectronics Centre](#) (ИМЕК, [Бельгия](#)).

6.1 Описание

Обычная [DRAM](#)-память состоит из сетки с маленькими [конденсаторами](#) и связанными с ними контактными и сигнальными [транзисторами](#). Каждый элемент хранения информации, называемый *ячейкой*, состоит из одного конденсатора и одного транзистора, подобная схема также называется устройством «1Т-1С». Размеры ячейки DRAM определяются напрямую размерностью процесса [производства полупроводников](#), используемого при их производстве. Например, согласно 90 нм процессу, используемого большинством производителей памяти при производстве DDR2 DRAM, размер ячейки составляет $0.22 \mu\text{m}^2$, что включает в себя конденсатор, транзистор, их соединение, а также некоторое количество пустого пространства между различными частями — как правило элементы занимают 35 % пространства, оставляя 65 % в качестве пустого пространства.

Данные в DRAM хранятся в виде наличия или отсутствия электрического заряда на конденсаторе, причем отсутствие заряда обозначается как «0». Запись производится путем активации соответствующего управляющего транзистора, позволяющего заряду «стечь» для запоминания «0», или наоборот, пропустить заряд в ячейку, что будет обозначать «1». Считывание происходит весьма схожим образом: транзистор вновь активируется, стекание заряда анализируется *усилителем считывания*. Если импульс заряда отмечается усилителем, то ячейка содержит заряд и таким образом считывается «1», отсутствие подобного импульса означает «0». Необходимо отметить, что этот процесс *деструктивен*, то есть ячейка считывается один раз, если она содержала «1», то должна быть перезаряжена для продолжения хранения этого значения. Так как ячейка теряет свой заряд через некоторое время из-за утечек, то через определенные промежутки времени требуется регенерация ее содержимого.

Ячейка типа 1Т-1С, разработанная для FeRAM, схожа по своему устройству с обоими типами ячеек, широко используемыми в [DRAM](#)-памяти, включая структуру, состоящую из одного конденсатора и одного транзистора. В конденсаторе DRAM-ячейки используется линейный диэлектрик, тогда как в конденсаторе FeRAM-ячейки применяется диэлектрическая структура, включающая в себя [сегнетоэлектрик](#), обычно его роль играет [пьезокерамика цирконат-титанат свинца](#) (PZT).

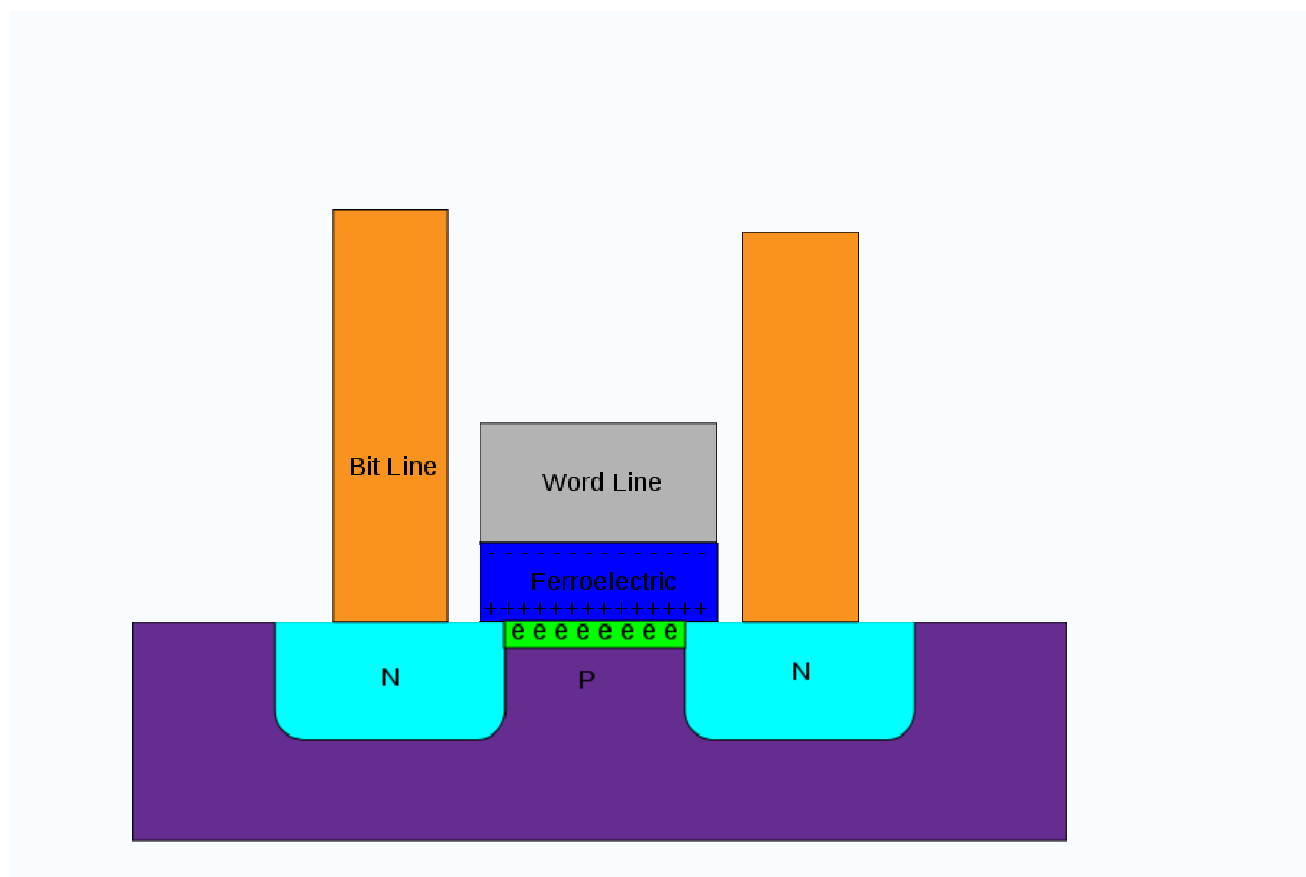
Сегнетоэлектрик обладает нелинейной связью между применяемым электрическим полем и хранимым зарядом. В частности, сегнетоэлектрическая характеристика имеет вид петли [гистерезиса](#), который очень схож с в общих чертах с петлей гистерезиса [ферромагнитных](#) материалов. [Диэлектрическая константа](#) сегнетоэлектрика как правило значительно выше, чем у линейного диэлектрика, вследствие эффекта полупостоянных [электрических диполей](#), формируемых в [кристаллической структуре](#) сегнетоэлектрического материала. Когда внешнее электрическое поле проникает через диэлектрик, диполи выравниваются по направлению прикладываемого поля, приводя к небольшим

смещениям позиций атомов и смещениям прохождения электрического заряда в кристаллической структуре. После удаления заряда, диполи сохраняют свое состояние поляризации. Обычно двоичные «0» и «1» хранятся в виде одной из двух возможных электрических поляризаций в каждой ячейке хранения данных. Например, под «1» понимается отрицательный остаток поляризации «-Pr», а под «0» — позитивный остаток поляризации «+Pr».

Функционально FeRAM похожа на DRAM. Запись происходит путем проникновения поля через сегнетоэлектрический слой при зарядании электродов, принуждая атомы внутри принимать ориентацию *вверх* или *вниз* (в зависимости от полярности заряда), за счет чего запоминается «1» или «0». Однако, принцип чтения отличается от реализации в DRAM. Транзистор переводит ячейку в особое состояние, сообщая «0». Если ячейка уже содержит «0», то на линиях вывода ничего не произойдет. Если ячейка содержит «1», то переориентация атомов в прослойке приведет к короткому импульсу на выходе, так как они вытолкнут электроны из металла на «нижней» стороне. Наличие этого импульса будет означать, что ячейка хранит «1». Так как процесс перезаписывает содержимое ячейки, то чтение из FeRAM — деструктивный процесс, и требует регенерации данных в ячейке в случае их изменения в ходе считывания.

Вообще говоря, функционирование FeRAM весьма напоминает память на магнитных сердечниках — одном из первых видов компьютерной памяти в 1960-х гг. Кроме того, сегнетоэлектрический эффект, используемый в FeRAM, был открыт в 1920 году. Но теперь FeRAM требует намного меньше энергии для изменения состояния полярности (направления), причем выполняет это гораздо быстрее.

6.2 Плотность



Главным определяющим фактором стоимости подсистемы памяти является плотность размещения компонентов. Уменьшение компонентов (или их количества) означает, что большее количество ячеек может уместиться в один чип, что в свою очередь означает, что за один раз из одной кремниевой пластины может быть произведено больше. Это повышает доход, что напрямую отражается на стоимости.

Ограничение снизу в этом процессе масштабирования - один из ключевых пунктов сравнения, что характерно для всех технологий вообще, масштабируемых до наименьших размеров ячейки и упирающихся в этот предел, что не позволяет им дальше дешеветь. FeRAM и DRAM схожи по своей конструкции, причем даже могут быть произведены на схожих линиях при схожих размерах. В обоих случаях нижний предел определяется величиной заряда, необходимой триггеру усилителя считывания. Для DRAM это превращается в проблему при 55 нм, так как при таком размере величина заряда, хранимого конденсатором, становится слишком маленькой для обнаружения. Пока неизвестно, может ли FeRAM быть уменьшена до аналогичного размера, так как плотность заряда на PZT-слое может не быть той же самой, что и у металлических электродов в обычном конденсаторе.

Дополнительным ограничением по размеру является то, что материал теряет сегнетоэлектрические свойства при сильном уменьшении.^{[3][4]} (Этот эффект связан с «деполяризационным полем» сегнетоэлектрика.) На данный момент ведутся исследования, посвященные проблеме стабилизации

сегнетоэлектрических материалов; одним из решений, например, является использование молекулярных адсорбатов.^[3]

На данный момент, коммерческие решения FeRAM производятся по 350 нм и 130 нм процессам. Ранние модели требовали сдвоенных FeRAM-ячеек для хранения одного бита, что являлось причиной очень низкой плотности, но это ограничение впоследствии было преодолено.

6.3 Энергопотребление

Ключевым преимуществом FeRAM перед DRAM является то, что происходит *между* циклами чтения и записи. В DRAM заряд, расположенный на металлических электродах, утекает через изоляционный слой и управляющий транзистор, в результате чего исчезает совсем. Также в DRAM для хранения данных дольше нескольких мгновений каждая ячейка должна периодически считываться и перезаписываться, что получило название «регенерации». Каждая ячейка должна обновляться множество раз в секунду ($\sim 65 \text{ мс}^{[5]}$), что требует постоянного источника питания.

В отличие от этого, FeRAM требует питание только при реальном считывании или записи в ячейку. Значительная часть энергии, используемой DRAM, тратится на регенерацию, поэтому результаты измерений, на которые ссылаются разработчики TTR-MRAM, здесь также вполне уместны, свидетельствуя об энергопотреблении на 99 % ниже по сравнению с DRAM.

Еще одним типом энергонезависимой памяти является [флеш-память](#), которая как и FeRAM не требует процесса регенерации. Флеш-память работает путем выталкивания электронов через высококачественный изолирующий барьер, где они улавливаются одним из концов [транзистора](#). Этот процесс требует высокого напряжения, которое обеспечивается [генератором подкачки заряда](#). Это означает, что FeRAM по своему устройству потребляет меньше питания, чем флеш-память, по крайней мере при записи, так как энергопотребление для записи в FeRAM лишь немного выше, чем при чтении. Для устройств, для которых характерно в основном чтение, различия будут и вовсе несущественными, но для устройств с более сбалансированным уровнем чтения/записи разница может быть гораздо значительнее.

6.4 Производительность

Производительность DRAM ограничена уровнем, при котором текущий заряд, хранимый в ячейках, может быть «слит» (при чтении) или сохранен (при записи). В общем случае, это ограничивается возможностями управляющих транзисторов, емкостью линий, подающих питание на ячейки, а также создаваемой температурой.

FeRAM основывается на физическом перемещении атомов при воздействии внешнего поля, что происходит чрезвычайно быстро, занимая примерно 1 нс. В теории это означает, что FeRAM может быть быстрее DRAM. Однако, из-за того, что питание должно подаваться в ячейку при чтении и записи, различные задержки, связанные с подачей питания и переключениями, снизят производительность до сравнимого с DRAM уровня. По этой причине можно говорить о том, что FeRAM требует меньший уровень заряда, чем

DRAM, так как чипы DRAM нуждаются в *удержании* заряда, тогда как FeRAM будет перезаписан прежде чем заряд будет слит. То есть, существует задержка при записи из-за того, что заряд должен пройти через управляющий транзистор, что накладывает свои ограничения.

В сравнении с флеш-памятью преимущества более очевидны. В то время как операции чтения схожи по производительности, для записи используется подкачка заряда, требуя значительное время для «настройки», а аналогичный процесс в FeRAM этого не требует. Флеш-памяти в общем случае требуется примерно 1 мс для записи бита, тогда как даже нынешние чипы FeRAM требуют в 100 раз меньше времени.

С теоретической производительностью FeRAM не все ясно. Существующие 350 нм образцы обладают временем чтения порядка 50-60 нс. Хотя по скорости они сопоставимы с современными чипами DRAM, среди которых можно найти экземпляры с показателями порядка 2 нс, распространенные 350 нм чипы DRAM работают с временем чтения порядка 35 нс,^[6] поэтому производительность FeRAM выглядит сравнимой при аналогичном процессе производства.

6.5 Общая оценка

FeRAM продолжает занимать чрезвычайно малую долю общего рынка полупроводников. В 2005 году продажи полупроводников по всему миру составили US \$235 миллиардов (согласно оценке [Gartner](#)), причем рынок флеш-памяти оценивается в US \$18.6 миллиарда (согласно оценке IC Insights).^[источник?] В 2005 году годовые продажи Ramtron, вероятно, крупнейшего поставщика FeRAM-памяти, составили US \$32.7 миллиона. Флеш-память на данный момент основывается преимущественно на доминирующей технологии [NVRAM](#), и по всей видимости такая ситуация будет сохраняться по крайней мере до конца декады. Существенно более значительные продажи флеш-памяти, сравнимой с альтернативными чипами NVRAM, обеспечивают значительно большие исследования и разработки. Флеш-память производится с использованием полупроводников Samsung, произведенных с соблюдением норм 30 нм (2007), в то время как чипы FeRAM производятся по стандартам 350 нм на фабриках Fujitsu и 130 нм на фабриках Texas Instruments (2007). Ячейки флеш-памяти могут хранить несколько битов на ячейку (на данный момент 2 при высшей плотности для флеш-чипов типа NAND), причем количество бит на флеш-ячейку планируется увеличить до 4 или даже 8, благодаря новым технологиям в области создания флеш-ячеек. Диапазон плотности бит флеш-памяти как следствие значительно больше, чем у FeRAM, и таким образом стоимость бита флеш-памяти ниже, чем у FeRAM.

Плотность FeRAM может быть поднята за счет улучшения технологии процесса производства FeRAM и структуры ячеек, как например, благодаря разработке структур вертикальных конденсаторов (по аналогии с DRAM) для уменьшения области воздействия на ячейку. Однако, уменьшение размеров ячейки может привести к тому, что заряд, хранящий данные, станет слишком слабым для обнаружения. В 2005 году Ramtron объявила о значительных продажах продуктов FeRAM в различных секторах рынка, включая (но не

ограничиваясь ими) область электронных измерений, транспортного оборудования (например [черные ящики](#), «умные» [подушки безопасности](#)), оборудования для бизнеса и офиса (например, принтеры, [RAID-контроллеры](#)), измерительных приборов, медицинского оборудования, промышленных [микроконтроллеров](#), а также [RFID](#)-чипов. Другие существующие чипы NVRAM, как например, MRAM, могут занять свое место в схожих нишах рынка, конкурируя с FeRAM.

Теоретически, существует возможность внедрять ячейки FeRAM, используя два дополнительных масочных шага при производстве обычных КМОП-полупроводников ^[источник?]. Флеш-память обычно требует девять масок. Это делает возможным, например, интеграцию FeRAM в микроконтроллеры, где более простой процесс снизит стоимость. Однако, материалы, используемые при производстве чипов FeRAM не являются широко используемыми в производстве КМОП-цепей. Как и PZT-сегнетоэлектрический слой, так и благородные материалы, используемые при производстве электродов, вызывают в КМОП процесс окисления и взаимной порчи.

6.6 Дальнейшее развитие

Осенью 2008 года [Ramtron International](#) выпустила первую микросхему FM28V100, положившую начало семейству V-Family. Микросхема отличалась плотностью 1 Мбит. В конце июля 2009 года компания объявила о выходе новой микросхемы памяти FM28V020 семейства V-Family с параллельным интерфейсом и шириной шины данных, равной одному байту. Плотность микросхемы равна 256 Кбит и имеет логическую организацию 32К x 8. Для внешнего оформления выбран стандартный корпус типа SOIC с 28 выводами. Диапазон рабочих температур ограничен значениями $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$. ^[7]

7 MRAM

Магниторезистивная оперативная память (MRAM — [англ. magnetoresistive random-access memory](#)) — это запоминающее устройство с произвольным доступом, которое хранит информацию при помощи [магнитных моментов](#), а не электрических [зарядов](#).

Важнейшее преимущество этого типа памяти - [энергонезависимость](#), то есть способность сохранять записанную информацию при отсутствии внешнего питания.

Технология магниторезистивной памяти разрабатывается с 1990х годов. В сравнении с растущим объемом производства других типов компьютерной памяти, особенно [флэш-памятью](#) и памятью типа [DRAM](#), она пока широко не представлена на рынке. Однако её сторонники верят, что благодаря ряду преимуществ, она в конечном счёте заменит все типы компьютерной памяти, и станет по настоящему "универсальной" компьютерной памятью.

7.1 Описание MRAM

В отличие от других типов запоминающих устройств, информация в магниторезистивной памяти хранится не в виде [электрических зарядов](#) или токов, а в [магнитных](#) элементах памяти. Магнитные элементы сформированы из

двух ферромагнитных слоёв, разделенных тонким слоем диэлектрика. Один из слоёв представляет собой постоянный магнит, намагниченный в определённом направлении, а намагниченность другого слоя изменяется под действием внешнего поля. Устройство памяти организовано по принципу сетки, состоящей из отдельных «ячеек», содержащих элемент памяти и транзистор.

Считывание информации осуществляется измерением электрического сопротивления ячейки. Отдельная ячейка (обычно) выбирается подачей питания на соответствующий ей транзистор, который подаёт ток от источника питания через ячейку памяти на общую землю микросхемы. Вследствие эффекта туннельного магнитосопротивления, электрическое сопротивление ячейки изменяется в зависимости от взаимной ориентации намагниченностей в слоях. По величине протекающего тока, можно определить сопротивление данной ячейки, и как следствие, полярность перезаписываемого слоя. Обычно одинаковая ориентация намагниченности в слоях элемента интерпретируется как «0», в то время как противоположное направление намагниченности слоёв, характеризующееся более высоким сопротивлением - как «1».

Информацию можно записывать в ячейки, используя множество способов. В простейшем случае, каждая ячейка лежит между двумя линиями записи, размещёнными под прямым углом друг к другу, одна над, а другая под ячейкой. Когда ток проходит через них, в точке пересечения линий записи наводится магнитное поле, которое воздействует на перезаписываемый слой. Такой же способ записи использовался в памяти на магнитных сердечниках, которая использовалась в 1960х годах. Этот способ требует достаточно большого тока, необходимого для создания поля, и это делает их не очень подходящими для применения в портативных устройствах для которых важна малое потребление энергии, это один из основных недостатков MRAM. Кроме того, с уменьшением размера микросхем, придёт время, когда индуцированное поле перекроет соседние ячейки на маленькой площади, что приведёт к возможным ошибкам записи. Из-за этого в памяти MRAM данного типа необходимо использовать ячейки достаточно большого размера. Одним из экспериментальных решений этой проблемы было использование круглых доменов, читаемых и записываемых с помощью эффекта гигантского магнитного сопротивления, но исследования в этом направлении более не проводятся.

Другой подход, переключения режимов, использует многошаговую запись с модифицированной многослойной ячейкой. Ячейка модифицирована содержит в себе искусственный антиферромагнетик, где магнитная ориентация чередуется назад и вперёд через поверхность, с обоими прикреплённым и свободным слоями, составленными из многослойных стеков изолированных тонким «соединяющим слоем». Результирующие слои имеют только два стабильных состояния, которые могут быть переключены из одного в другое выбором времени тока записи в двух линиях так одна немного задерживается, таким образом «поворачивая» поле. Любое напряжение меньше, чем полный уровень записи фактически увеличивает его сопротивление для переключения. Это значит, что ячейки расположенные вдоль одной из линий записи не

претерпят проблемы полувыбора, позволяя использовать меньшие размеры ячеек.

Новая технология, переноса спинового момента (spin-torque-transfer-STT) или переключение с помощью переноса спина, использует [электроны](#) с заданным состоянием спина («поляризованные»), прямо вращая области. Особенно, если электроны текут внутрь слоя, должно измениться их вращение, это будет способствовать вращению, будет перенесено на ближайший слой. Эта уменьшает величину тока, необходимую для записи информации в ячейку памяти, и потребление тока при чтении и записи становится примерно одинаковым. Проблемы, которые «классический» тип ячейки MRAM будет иметь препятствия на высоких плотностях соответствующих величине тока необходимой в течение записи, проблему избегает STT. По этой причине сторонники STT ждут техники использующей для устройств 65 нм и менее. Нижняя сторона такая, в настоящее время, STT необходимо переключать больше тока через управляющий транзистор, чем обычной MRAM, требующей большой транзистор, и необходимо поддерживать [когерентность](#) вращения. В целом, несмотря на это, STT требует намного меньшего тока записи, чем обычная или переключательная MRAM.

7.2 Сравнение с другими типами памяти

7.2.1 Плотность размещения элементов в микросхеме

Главным фактором который определяет цену [микросхемы](#) памяти, это плотность размещения составляющих её элементов. Чем меньше размер одного элемента, тем большее их количество может быть упаковано в одну микросхему, и соответственно, большее число микросхем может быть произведено за один раз из одной кремниевой пластины. Это улучшает выход годных изделий, который прямо связан с ценой.

В памяти типа [DRAM](#) в качестве элементов памяти используются [конденсаторы](#), провода переносят ток к ним и от них, и транзистор, чтобы управлять ими — так называемая ячейка «1Т/1С». Конденсатор представляет из себя две маленькие металлические пластинки, разделённые тонким слоем диэлектрика, этот элемент может быть изготовлен, таким маленьким, каким это позволяет сделать текущее состояние технологии производства микросхем. Память DRAM имеет наивысшую плотность размещения элементов из всех доступных на сегодняшний день типов памяти. Это делает её наиболее дешёвой, и она используется в качестве основной оперативной памяти компьютеров.

MRAM по своему устройству похожа на DRAM, несмотря на то, что часто не требует транзистора для операции записи. Несмотря на это, как и упомянутая выше, самая основная ячейка MRAM испытывает проблему полувыбора, которая ограничивает размер ячейки приблизительно от 180 нм и более. Метод переключателя MRAM предлагает гораздо меньший размер ячейки до того как это станет проблемой, очевидно около 90 нм, такой же размер как в большинстве современных DRAM изделиях. Будучи достойной, введения в широкое производство, тем не менее, они, как правило, верят, что MRAM должна подвинуться к 65 нм размеру самых передовых устройств памяти, которые потребуют использование STT.

7.2.2 Энергопотребление

Так как конденсаторы, используемые в микросхемах DRAM, со временем теряют свой заряд, сборки памяти, использовавшие их, должны периодически обновлять содержимое всех ячеек в микросхеме, считывая каждую ячейку и перезаписывая её содержимое. Это требует наличия постоянного источника питания, поэтому как только питание компьютера отключается, память типа DRAM теряет всю хранящуюся информацию. Чем больше ячейки DRAM уменьшаются в размерах, тем короче становятся циклы обновления, и потребление энергии увеличивается.

В отличие от DRAM, память MRAM не требует обновления каждый раз. Это значит не только то, что память сохраняет записанную в нее информацию при отключенном питании, но и то что при отсутствии операций чтения или записи, нет постоянного потребления энергии. Хотя теоретически при чтении информации память MRAM должна потреблять больше энергии, чем DRAM, на практике энергоёмкость чтения у них почти одинаковая. Несмотря на то, что процесс чтения требует большей энергии в порядке перезаписи существующего поля сохраняющегося в соединении, изменяющегося от трёх до восьми раз энергия требуется в течение чтения. Хотя точное количество энергии сберегаемой зависит от характера работы — более частая запись потребует больше энергии — в целом сторонники MRAM ждут более низкого энергопотребления (до 99 % меньше) сравнивая с [DRAM](#). У микросхем STT MRAM, нет различия в потреблении энергии при чтении и при записи, потребление энергии еще меньше.

Также стоит сравнить магниторезистивную память с еще одним типом памяти, с [флэш-памятью](#). Как и MRAM, флэш-память не теряет информацию, при отключении питания, что делает её очень удобной для замены [жестких дисков](#) в портативных устройствах, таких как MP3-плееры или цифровые камеры. При чтении информации, флэш-память и MRAM имеют схожее энергопотребление. Однако для записи [флэш-память](#), использует большой импульс напряжения (около 10 В) который накапливается определенное время в накачке заряда, которая требует много энергии и времени. Кроме этого импульс тока физически разрушает ячейки памяти, и информация в [флэш-память](#) может быть записана некоторое конечное число раз, прежде чем ячейка памяти выйдет из строя.

В отличие от Flash памяти, MRAM требует немного больше энергии на запись чем на чтение, и не изменяя напряжение, устраняя необходимость в накачке заряда. Это ведёт к более быстрым операциям, меньшему энергопотреблению, и к отсутствию ограниченного срока службы. Предполагается что, Flash будет первым типом памяти, который будет со временем заменён MRAM.

7.2.3 Быстродействие

Быстродействие памяти типа [DRAM](#) ограничено скоростью, с которой ток, хранящийся в ячейках, может быть слит (для чтения) или храниться (для записи). Работа MRAM основана на мерных напряжениях предпочтительнее, чем токи, так меньше «стабилизационного времени» требуется. Исследователи

[IBM](#) продемонстрировали устройства MRAM с временем доступа порядка 2 нс, весьма лучше чем даже самые продвинутые DRAM построенные на самых новых технологических процессах. Преимущества по сравнению с Flash памятью более значительные, время чтения у них похожее, но время записи в тысячи раз меньше.

Только одна современная технология памяти может конкурировать в быстродействии с магниторезистивной памятью. Это статическая память или [SRAM](#). Элементы памяти типа SRAM представляют из себя [триггеры](#), которые хранят одно из двух состояний так долго, как долго поступает энергия. Каждый триггер состоит из нескольких транзисторов. Так как транзисторы имеют очень низкое потребление энергии, их время переключения очень мало. Но поскольку ячейка памяти SRAM состоит из нескольких транзисторов, обычно четырёх или шести, её площадь больше, чем у ячейки памяти типа DRAM. Это делает память SRAM более дорогой, поэтому она используется только в малых объемах, в качестве особо быстродействующей памяти, например как [кэш-память](#) в большинстве современных моделей [центральных процессоров](#).

Хотя магниторезистивная память не такая быстрая, как память типа SRAM, она достаточно интересна и в этом качестве. Она обладает более высокой плотностью, и разработчики [центральных процессоров](#) могли бы в будущем выбирать для использования в качестве [кэш-памяти](#) между большим объемом менее быстрой памяти MRAM и меньшим объемом более быстрой памяти типа SRAM. Остаётся увидеть, как она продаётся, как сыграет в будущем.

7.2.4 Общее сравнение

Магниторезистивная память имеет быстродействие сравнимое с памятью типа [SRAM](#), сравнимую плотность размещения элементов, но меньшее энергопотребление, чем у памяти типа [DRAM](#), она более быстрая и не страдает деградацией по происшествию времени в сравнении с [флэш-памятью](#). Эта та комбинация свойств, которая может сделать её «универсальной памятью», способной заменить SRAM, DRAM и [EEPROM](#) и Flash. Это объясняет большое количество исследований направленных на её разработку.

Конечно, на данный момент MRAM ещё не готова для широкого применения. Огромный спрос на рынке [флэш-памяти](#) вынуждает производителей к агрессивному внедрению новых технологических процессов. Самые последние фабрики, на которых например изготавливает микросхемы [флэш-памяти](#) емкостью 16 Гбайт фирма Samsung, используют 50 нм [технологический процесс](#). На более старых технологических линиях изготавливаются микросхемы памяти DDR2 DRAM, для которых используется 90 нм технологический процесс предыдущего поколения.

Магниторезистивная память всё ещё в значительной степени находится «в разработке», и производится с помощью устаревших технологических процессов. В настоящее время доступен только один коммерческий продукт, это микросхема памяти емкостью 4 Мбайт производства Freescale Semiconductor, изготавливаемая на устаревшем на несколько поколений 180 нм процессе. Так как спрос на [флэш-память](#) в настоящее время превышает предложение, то еще

не скоро появится компания, которая решится перевести одну из своих фабрик, с новейшим технологическим процессом на изготовление микросхем магниторезистивной памяти. Но и в этом случае, конструкция магниторезистивной памяти на сегодняшний момент проигрывает флэш-памяти по размерам ячейки, даже при использовании одинаковых технологических процессов.

7.3 История

1955 — изобретение памяти на магнитных сердечниках, использующей сходный с MRAM, способ чтения и записи информации.

1989 — учёные IBM сделали ряд ключевых открытий о «гигантском магниторезистивном эффекте» в тонкоплёночных структурах.

1995 — Motorola (в дальнейшем Freescale) начинает разработку MRAM.

2000 — IBM и Infineon установили общую программу развития MRAM.

2002 — NVE объявляет о технологическом обмене с Cypress Semiconductor.

2003 — 128 кбит чип MRAM был представлен, изготовленный по 0,18 микронной технологии.

2004

Июнь — Infineon анонсирует 16-Мбит опытный образец, основанный на 0,18 микронной технологии

Сентябрь — MRAM становится стандартным продуктом в Freescale, которая начала испытывать MRAM.

Октябрь — Тайваньские разработчики MRAM печатают 1 Мбит элементы на [TSMC](#).

Октябрь — [Micron](#) бросает MRAM, обдумывает другие памяти.

Декабрь — [TSMC](#), [NEC](#), [Toshiba](#) описывают новые ячейки MRAM.

Декабрь — Renesas Technology разрабатывают Высокоскоростную, Высоконадёжную Технологию MRAM.

2005

Январь — Cypress испытывает MRAM, использует NVE IP.

Март — Cypress продаёт дочернюю компанию MRAM.

Июнь — Honeywell сообщает таблицу данных для 1-Мбит радиационно-устойчивой MRAM, используя 0,15 микронную технологию.

Август — рекорд MRAM: Ячейка памяти работает на 2ГГц.

Ноябрь — Renesas Technology и Grandis сотрудничают в Разработке 65 нм MRAM, применяя Вращательно Крутящее Перемещение.

Декабрь — Sony представляет первую лабораторию производящую вращательно-крутящее-перемещение MRAM, которая использует вращательно-поляризованный ток через туннельный магниторезистивный слой, чтобы записать данные. Этот метод более энергоэффективен и более расширяем, чем обыкновенная MRAM. С дальнейшими преимуществами в материалах, этот процесс должен позволить плотности, большие, чем те, что возможны в DRAM.

Декабрь — Freescale Semiconductor Inc. анонсирует MRAM, в которой вместо оксида алюминия используется оксид магния, позволяющий делать более тонкий изолирующий туннельный барьер и улучшенное битовое

сопротивление в течение цикла записи, таким образом, уменьшая требуемый ток записи.

Текущий Статус

2006

Февраль — Toshiba и NEC анонсировали 16 Мбит чип MRAM с новой «энерго-разветвляющейся» конструкцией. Они добились частоты перемещения в 200 МБ/с, с временем цикла 34 нс — лучшая производительность любого чипа MRAM. Они также гордятся наименьшим физическим размером в своём классе — 78,5 квадратных миллиметров — и низким требованием энергии 1,8 вольт.

Июль — 10 Июля, Austin Texas — Freescale Semiconductor выводит на рынок 4-Mbit чипы MRAM, по цене приблизительно \$25.00 за микросхему.

2007

Ноябрь — фирма NEC разработала самую быструю в мире магниторезистивную SRAM-совместимую память, с рабочей частотой МГц.

2008

В японском искусственном спутнике SpriteSat, была применена магниторезистивная память производства Freescale Semiconductor для замены компонентов SRAM и FLASH.

Июнь — Samsung и Hynix становятся партнерами по разработке STT-MRAM.

Июнь — Freescale Semiconductor выделяет весь свой бизнес, связанный с магниторезистивной памятью, в отдельную компанию Everspin.

2009

Февраль — Компании [NEC](#) и [NEC Electronics](#) заявили об успешной демонстрации работающей памяти магниторезисторного типа емкостью 32 Мбит.

8 PCM, PRAM, PCRAM

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 Charge 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.

8.1 Достоинства

К достоинствам фазоинверсной памяти относятся малые размеры ячейки, которые могут составлять менее $10F$, и большее, чем у флэш-памяти, быстродействие. (F - проектная норма, представляющая собой ширину межсоединения, выполненного в нижнем слое металлизации.) 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.

8.2 Недостатки

К недостаткам PCM 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 PCM 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 PCM или PRAM направлены на увеличение плотности тока записи до более 10^7 А/см² (против 10^5 - 10^6 А/см², обеспечиваемого обычным транзистором или диодом, также применяемым для управления операцией записи).

8.3 Технология и структура

Сегодня для получения требуемой плотности тока разрабатываются две «базовые» структуры. Одна, предложенная компанией Samsung, предусматривает формирование планарного PCM-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.

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.

8.4 Достижения и образцы

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 компанией С-РАМ (Chalcogenide Random Access Memory), типа 251A184.

Микросхема имеет следующие параметры:

- Объем памяти.....4 Мбит
- Организация..... $512K \times 8$ бит
- Длительность цикла при чтении.....70 нс
- Длительность цикла при записи.....500 нс
- Напряжение питания.....3,3 В
- Диапазон рабочих температур-55.... 1 25°C

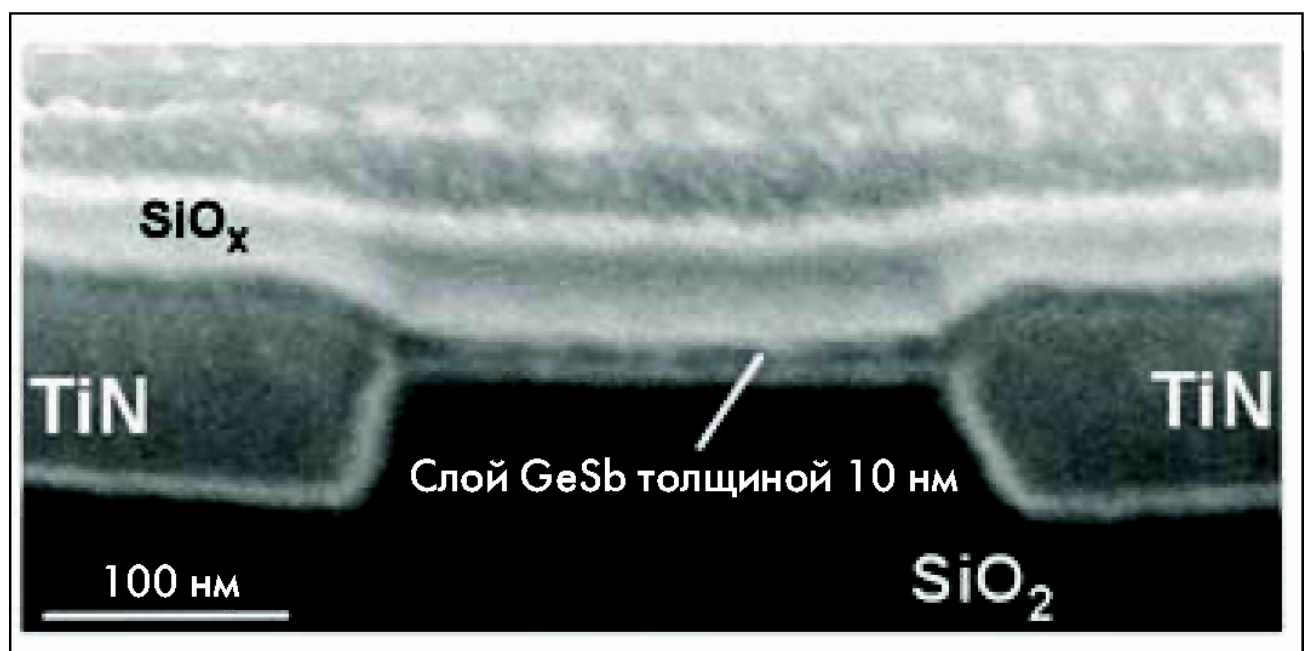
Память без каких-либо сбоев выдерживает облучение в 1 Мрад, т. е. способна работать в условиях космоса и при высоком уровне излучения. Поставляется в 40-выводном плоском корпусе.

Один из упомянутых недостатков фазоинверсной памяти - деградация материала в ходе эксплуатации. Поэтому интерес представляет разработанный учеными Университета штата Пенсильвания опытный образец РСМ 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 стабильность ученые связывают с малой плотностью дефектов в самособирающихся нанопроводах.

. Компания Samsung планировала начать поставки микросхем 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, ток записи - 400 мкА, ресурс - 10^8 циклов считывания/записи, срок хранения данных - более 10 лет. Диапазон рабочих температур составляет -40...85°C. Микросхема памяти предназначена для замены флэш-памяти NOR-типа.

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



9 nvSRAM

10 DPRAM

DPRAM (Dual-ported RAM) — двухпортовая память с параллельным интерфейсом доступа. DPRAM предназначена для хранения данных, она также может быть использована для хранения данных предназначенных для выполнения сигнальным процессором. Может использоваться для организации глобальных регистровых банков и организации системного стека. Поддерживается одновременно чтение и запись данных.

11 Мемристор

Мемристор (англ. *memristor*, от *memory* — «память», и *resistor* — «электрическое сопротивление») — пассивный элемент в микроэлектронике, способный изменять свое сопротивление. Может быть описан как двухполюсник с нелинейной вольт-амперной характеристикой, обладающий гистерезисом.



Символ мемристора

11.1 Математическая модель

Теория мемристора была создана в [1971 году](#) профессором [Леоном Чуа](#).

Устанавливает отношения между интегралами по времени [силы тока](#), протекающего через элемент, и [напряжения](#) на нем. Долгое время мемристор считался теоретическим объектом, который нельзя построить.

Однако, лабораторный образец мемристора был создан^[1] в [2008 году](#) коллективом ученых во главе с Р. С. Уильямсом в исследовательской лаборатории фирмы Hewlett-Packard. 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](#). Данную реализацию мемристора следует отнести к классу [наноионных устройств](#).

Наблюдающееся в мемристоре явление [гистерезиса](#) позволяет использовать его в качестве [ячейки памяти](#). В принципе, мемристоры могут заменить [транзисторы](#) во многих случаях, но такая возможность пока рассматривается только гипотетически.

Теоретически они могут быть более емкими и быстрыми чем современная [флеш-память](#). Также их блоки могут заменить [RAM](#). Их умение «запоминать» заряд позволит отказаться от загрузки системы. В памяти компьютера отключенного от питания будет храниться его последнее состояние. Его можно будет включить и начать работу с того места, на котором остановился. Это же свойство позволит отказаться от некоторых компонентов современного ПК, что позволит сделать компьютеры меньше и дешевле. HP предполагает, что к 2012 году мемристоры начнут заменять собою флеш-память, в 2014—2016 — оперативную память и [жесткие диски](#). Таким образом, по

самым оптимистичным оценкам «мемристорные» компьютеры появятся на рынке не раньше, чем через 20 лет^[2].

По мнению [Грега Снейдера](#) (специалист компании HP, статья «Cortical Computing with MEMRISTIVE NANODEVICES»), мемристор станет одним из основных элементов [наноустройств, эмулирующих работу человеческого мозга](#) (миниатюрные наноустройства будут объединены в единую [сеть](#), а мемристор станет элементом, ответственным за «память» [искусственного интеллекта](#))^[3].

12 Интерфейсы для подключения [ОЗУ](#)

Интерфейсы для подключения ОЗУ		
FPM DRAM	1,408 Гбит/с	0,176 ГБ/с
EDO DRAM	2,112 Гбит/с	0,264 ГБ/с
SPARC MBus	2,55 Гбит/с	0,32 ГБ/с
Оригинальный		

EDO RAM (Extended Data Out Random Access Memory) - память произвольного доступа к данным с расширенным выводом - усовершенствованный тип памяти [FPM RAM](#) (другое название Hyper Page Mode).

Применялась на компьютерах на основе процессоров [Pentium](#) начиная с [1995 года](#).

Память типа EDO была разработана и запатентована фирмой [Micron Tehnology](#).