

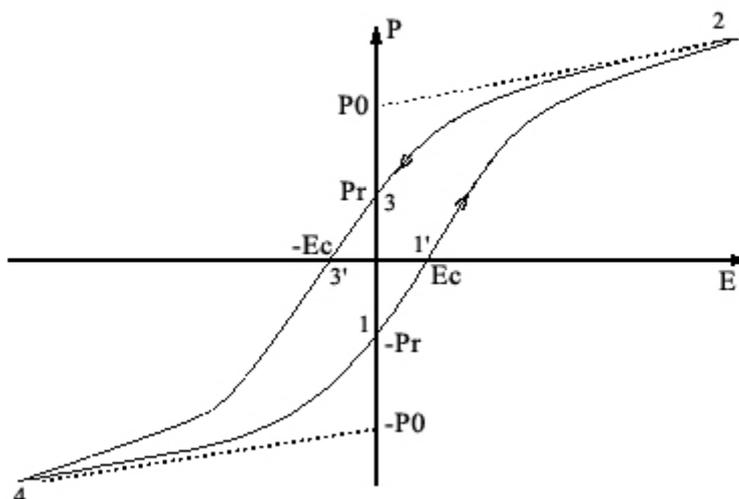
Общая информация, терминология

Сегнетоэлектрики - группа соединений, обладающих способностью при изменении своих физических параметров вырабатывать электрический ток (например, пьезокерамика при сжатии) и, наоборот, при приложении к ним электрического тока способные изменять свои физические свойства (деформация, изменение проводимости, изменение ферромагнитных свойств и т.д.). В ряде случаев после прекращения воздействия изменения в материале сохраняются, что и делает этот класс соединений столь ценным для использования в носителях информации.

PZT (Perovskite lead zirconate titanate) - семейство сегнетоэлектрических керамик общей формулой $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$. Иногда при добавлении легирующих добавок к аббревиатуре PZT могут добавляться другие латинские буквы.

SBT - семейство сегнетоэлектрических керамик аналогичных PZT с общей формулой $Sr(BixTax)O_9$. Отличаются улучшенными показателями по сравнению с PZT, но химически менее стабильны и имеют более сложный процесс получения.

Петля гистерезиса - в том случае, когда переход из начального состояния в конечное происходит по одному пути, а из конечного в начальное - по другому и в любой своей точке (кроме начала и конца) первый и второй пути имеют разное значение, возникает эффект называемый петлей гистерезиса. Графически для сегнетоэлектрика это выглядит так:



где P - это поляризация материала, а E - напряженность электрического поля. При следовании по пути из точки 1 в точку 2 достигается такое критическое значения поляризации (поляризация насыщения), что возврат в исходное состояние по тому же пути для сегнетоэлектрика становится невозможным. Чем больше зазор между первым и вторым путем, тем лучше - тем однозначнее определение значения бинарного кода записанного в ячейке.

Поляризация насыщения - поляризация, при которой все дипольные моменты сегнетоэлектрика ориентируются вдоль вектора поля, при этом сегнетоэлектрик изменяет свои физические свойства. При увеличении приложенного электрического поля поляризация начинает изменяться по линейному закону (правее точки 2 на Рис. 2). Экстраполируя этот линейный закон до пересечения с осью поляризации на петле гистерезиса, получим значение поля насыщенности P0.

Остаточная поляризация - значение амплитуды поляризации при значении электрического поля $E=0$. На петле гистерезиса (Рис. 2) обозначена Pr. Если после снятия электрического поля диполи не

Измерительное, вакуумное и технологическое оборудование, расходные материалы

изменили своего направления, то значение остаточной поляризации P_r и значение поляризации насыщенности P_0 будут равны.

Коэрцитивное напряжение - это значение электрического поля, при котором поляризация материала становится равным 0.

Коэрцитивное поле (E_c) - это значение электрического поля, когда значение поляризации материала становится равным 0. В однодоменном кристалле это поле может быть интерпретировано значением, когда поляризация кристалла переключается из одного состояния в другое. В мультидоменном кристалле это значение электрического поля, когда половина диполей ориентирована вдоль поля, а другая - против. Это значит, что одна половина компенсирует другую, и суммарная поляризация мультидоменного кристалла равна нулю.

Усталость материала (fatigue) - изменение значения поляризации сегнетоэлектрика в сторону уменьшения в процессе эксплуатации материала, то есть в цикле запись/перезапись. Так, в материале PZT значение поляризации становится меньше допустимого минимума после 10^{12} циклов зарядки.

Отпечаток заряда (Предпочтение диэлектриком значения сигнала, imprint) - постепенный переход диэлектрика в одно из своих устойчивых состояний при длительном нахождении в этом состоянии.

Старение материала - деградация поляризационных параметров (остаточная поляризация P_r и поляризация насыщенности P_0) с течением времени.

Релаксация - это уменьшение остаточной поляризации P_r , если конденсатор недоступен в течение некоторого количества циклов зарядки.

PUND-измерения – positive, up, negative and down

Абсорбционный ток - часть тока через диэлектрик, которая экспоненциально затухает с течением времени.

Добротность изоляции - $Q = 1/\text{tg}\delta$ (характеризующее количество периодов, в течение которых в диэлектрике поглощается накопленная энергия $W = CU^2/2$)

Дипольный момент - физическая величина, определяемая формулой $p=Ql$, где Q - величина смещенного заряда в результате действия электрического поля, а l - это расстояние, на которое данный заряд был смещен. Дипольный момент - это векторная величина, которая имеет направление от негативного заряда к позитивному. Электрически нейтральный атом становится диполем (Рис. 1) после воздействия электрического поля на облако электронов. Электронные оболочки вытягиваются и получается, что отрицательный заряд электронного облака смещен относительно положительного заряда ядра и не компенсирует его. Вытягивание электронных оболочек вследствие воздействия электрического поля свойственно не всем атомам, а только определенному классу, называемому ферроэлектриками.

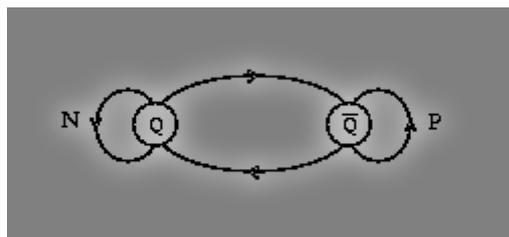


Рис.1 Диполь ферроэлектрика

Измерительное, вакуумное и технологическое оборудование, расходные материалы

Домен - это элементарная ячейка ферромагнетика, которая состоит из диполей. В отсутствие внешнего электрического поля диполи домена ориентированы таким образом, что компенсируют воздействие друг друга. Поэтому в отсутствие внешнего электрического поля домены являются электронейтральными.

Диэлектрическое смещение - это значение электрического поля в материале. Определяется формулой:

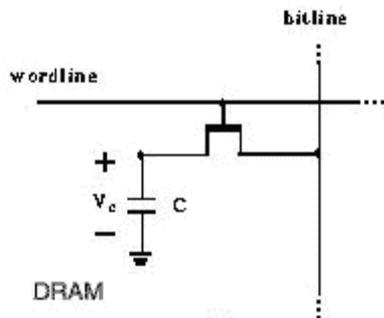
$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$$

Где ε_0 - это значение диэлектрической проницаемости свободного пространства, \mathbf{P} - значение поляризации материала. \mathbf{E} - напряженность электрического поля.

КМОП (К-МОП; комплементарная логика на [транзисторах металл-оксид-полупроводник](#); [англ. CMOS, Complementary-symmetry/metal-oxide semiconductor](#)) — технология построения электронных схем. В технологии КМОП используются [полевые транзисторы](#) с изолированным затвором с каналами разной проводимости. Отличительной особенностью схем КМОП по сравнению с биполярными технологиями ([ТТЛ, ЭСЛ и др.](#)) является очень малое энергопотребление в статическом режиме (в большинстве случаев можно считать, что энергия потребляется только во время переключения состояний). Отличительной особенностью структуры КМОП по сравнению с другими МОП-структурами ([N-МОП, P-МОП](#)) является наличие как n-, так и p-канальных полевых транзисторов; как следствие, КМОП-схемы обладают более высоким быстродействием и меньшим энергопотреблением, однако при этом характеризуются более сложным технологическим процессом изготовления и меньшей плотностью упаковки. Подавляющее большинство современных логических [микросхем](#), в том числе, [процессоров](#), используют схемотехнику КМОП.

Сегнетоэлектрическая (ферроэлектрическая) энергонезависимая память с произвольным доступом FeRAM

Оперативная память - один из базовых компонентов компьютера. Вначале, когда компьютеры были большими, а программы маленькими, оперативная память представляла собой ферромагнитные кольца, нанизанные на перекрещивающиеся прутья. Эта память при всей своей малой емкости в несколько сотен байт (при размере в шкаф) обладала ценным свойством - она была энергонезависимой и сохраняла данные и после выключения компьютера. В погоне за объемами и быстродействием для производства оперативной памяти стали использовать лампы, а в дальнейшем и транзисторы с конденсаторами. На транзисторах развитие памяти остановилось надолго, двигаясь лишь по пути уменьшения транзисторных ячеек. На данный момент основным типом памяти является память типа DRAM, ячейка которой состоит из транзистора с конденсатором (технология 1Т-1С).



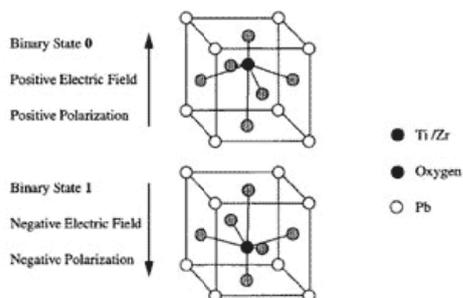
Память приобрела высокую скорость, стала компактной и относительно дешевой, но утратила энергонезависимость. До недавнего времени это казалось не столь большой потерей - компьютер при работе был всегда включен в сеть, есть масса накопителей на магнитных и оптических носителях - не страшно, если после выключения данные пропадут из ОЗУ, при следующей загрузке их считают с носителей в память, которая требует постоянной перезарядки. Так было до появления устройств, требующих энергонезависимой долговременной памяти, которая к тому же могла бы выполнять функции ОЗУ - цифровые фотоаппараты и видеокамеры, наладонные компьютеры, цифровые диктофоны и аудиоплееры, сотовые телефоны и смартфоны - всем

им требуется память, способная работать тогда, когда они выключены (а это большая часть времени), способная хранить данные при отключенном питании как можно дольше и при этом настолько быстрая, чтобы исполнять обязанности ОЗУ. Помимо этой Hi-Tech области подобная память пригодилась бы и для обычных персональных компьютеров, где в последнее время все больше требуются носители информации повышенной надежности без движущихся частей.

Спрос на энергонезависимую память растет. В результате развитие технологий энергонезависимой памяти пошло несколькими путями. Одной из первых была Flash память, которая получила широкое распространение. Но у Flash памяти помимо достоинств есть и недостатки - медленная работа с данными и высокая стоимость, что заставило продолжать разработки в этой области. Одной из таких разработок стала магниторезистивная память MRAM (переход <http://ru.wikipedia.org/wiki/MRAM>). MRAM получилась удачнее Flash по всем параметрам, кроме цены, что заставило продолжать поиски. В результате разработок появилась память, называемая FeRAM - Ferroelectric Random Access non-volatile Memory (сегнетоэлектрическая энергонезависимая память с произвольным доступом к ячейкам).

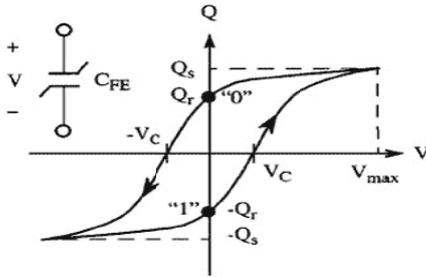
Основой для FeRAM (а это по существу различные комбинации сегнетоэлектрических транзисторов (ferroelectric transistor) и конденсаторов (ferroelectric capacitor)) являются смешанные полиметаллические оксиды, спекаемые в сегнетоактивные керамики. Наиболее распространенным является семейство PZT (Perovskite lead zirconate titanate) с общей формулой $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$. К основе PZT могут добавляться "легирующие" добавки из разных металлов и их оксидов, например: IrO_2 , Pt, Au, Ag и так далее. Небольшие примеси этих добавок могут существенно влиять на свойства PZT как в положительную, так и в отрицательную область.

Процесс записи/чтения для PZT выглядит следующим образом:



При действии положительного электрического заряда происходит положительная поляризация сегнетоэлектрика, результатом которой является переход в состояние, соответствующее значению "0". При действии отрицательного электрического заряда происходит обратный переход, соответствующий значению "1". При этих переходах материал сегнетоэлектрика меняет свои физические свойства, меняет свои свойства и элемент, который состоит из этого соединения. Возникает петля гистерезиса, в результате состояния "0" и "1" по энергетическому значению далеко разнесены, что позволяет произвести их однозначную идентификацию.

Вот как выглядит петля гистерезиса для ферромагнитного сегнетоэлектрического конденсатора:



Q_r - остаточный заряд, Q_s - заряд насыщения, V_c - коэрзивное напряжение.

Помимо PZT, ярко выраженным ферроактивным сегнетоэлектриком является SBT с формулой $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$.

Оба материала отличаются как по своим физико-химическим свойствам, так и по параметрам Q_r , Q_s и V_c , но сама логика перехода "1" - "0" у обоих материалов одинакова, что позволяет при конструировании ячеек памяти применять одинаковый подход.

По сравнению с PZT, SBT лучше по таким параметрам, как усталость материала (fatigue), и "отпечаток" заряда (imprint), то есть склонность сегнетоэлектрика к окончательному переходу в только одно состояние при длительном пребывании в нем. Зато технологии производства PZT известны давно, хорошо отработаны и на данный момент являются наиболее дешевыми с самым минимальным размером ячейки.

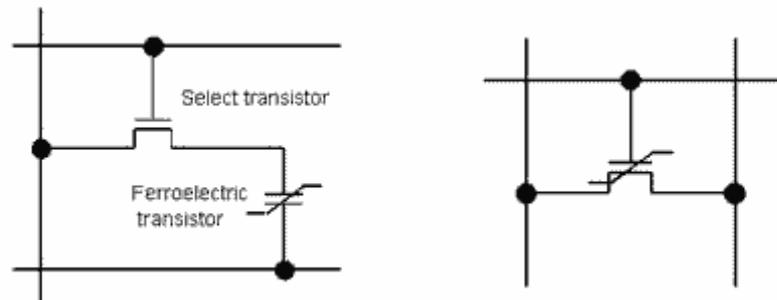
Структура FeRAM

На данный момент имеется огромное количество всевозможнейших комбинаций основных элементов, из которых строится ячейка памяти - ферромагнитного сегнетоэлектрического транзистора и такого же конденсатора. Но при рассмотрении этих комбинаций можно выявить 4 основных типа, которые являются базовыми, все остальные типы ячеек FeRAM являются лишь их комбинациями. Это однотранзисторная ячейка 1T FeRAM, одноконденсаторная ячейка 1C FeRAM, называемая еще SFRAM (statically read, non-volatile, ferroelectric random access memory - полный аналог SRAM), наиболее распространенная транзисторно-конденсаторная ячейка 1T-1C FeRAM и наиболее стабильная из всех вышеперечисленных двойная ячейка 2T-2C FeRAM.

1T FeRAM

Эта структура ячейки использовалась в одной из первых работающих моделей FeRAM, но показатели ее были не на высоте - ячейка слишком быстро теряла заряд и переходила в непредсказуемое состояние, то есть не являлась энергонезависимой, поэтому работы в области 1T были свернуты. Но сама идея оказалась живуча - ведь имея в качестве ячейки всего один транзистор можно добиться минимального ее размера и, соответственно, гигантской информационной емкости, приходящейся на единицу поверхности чипа. Именно поэтому в 2002 году работы над созданием 1T FeRAM были продолжены. Используя ферромагнитные сегнетоэлектрики новейшего поколения - композиционный оксид SBT ($\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$) с добавлением гафния Hf и несколько модифицировав структуру полевого сегнетоэлектрического транзистора (ferroelectric gate field-effect transistor) удалось получить 1T структуру со значительно более долгим временем хранения заряда.

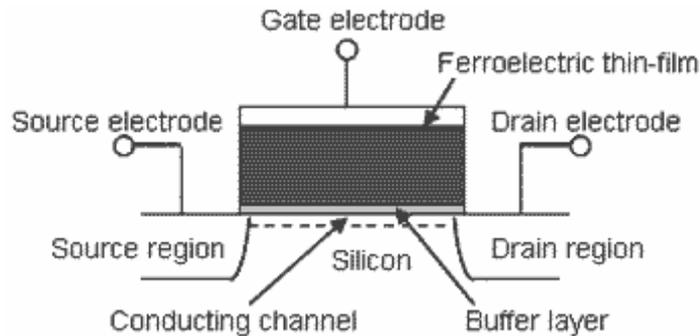
Схема 1T FeRAM выглядит следующим образом:



Измерительное, вакуумное и технологическое оборудование, расходные материалы

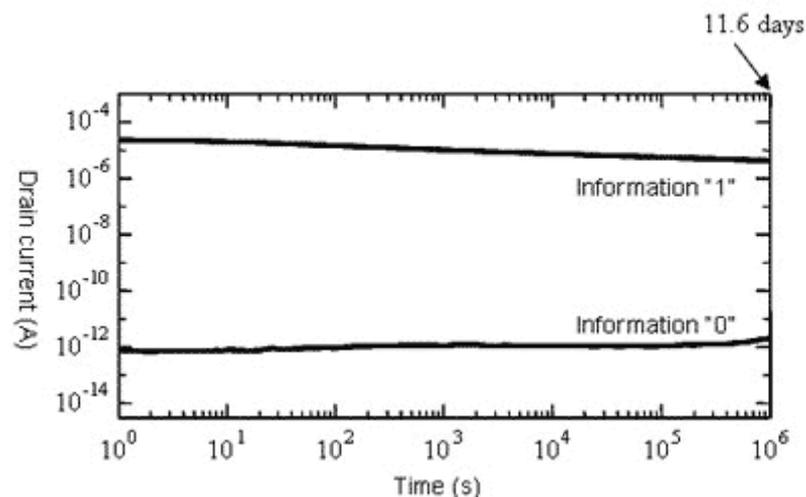
Слева приведена схема традиционной 1Т-1С ячейки, справа - только 1Т. Даже из принципиальной схемы явствует, что ячейка 1Т меньше и проще в исполнении по сравнению с 1Т-1С, что должно положительно сказаться на себестоимости и на информационной емкости памяти на ее основе.

Сам транзистор выглядит так:



Запись в ячейку 1Т FeRAM осуществляется при подаче положительного или отрицательного заряда на электроды схемы. Когда на электрод стока (drain electrode) подается напряжение +6V в канале проводника возникает пульсирующий адекватный ток соответствующий значению "1". И наоборот - после подачи отрицательного напряжения - пульсирующий ток крайне незначителен - ячейка переходит в положение "0".

На графике это выглядит следующим образом:



Как видно из графика, разница между состоянием "0" и состоянием "1" достаточна для однозначного определения значения ячейки, а падение тока утечки незначительно - за 10⁶ секунд (что соответствует 11,6 суткам) падение не превысило 2%.

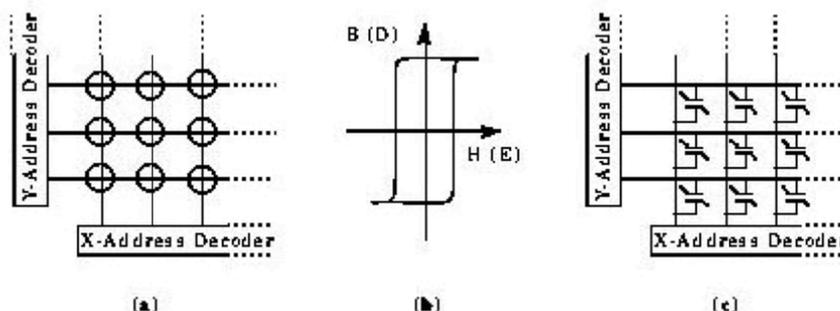
Таким образом, данная технология вполне жизнеспособна - чрезвычайно малый размер ячеек, стабильность заряда и высокая скорость доступа к ячейкам - вот ключевые преимущества 1Т FeRAM. Основной проблемой является надежность хранения заряда - память на основе технологии 1Т FeRAM теряет данные по прошествии 50-60 дней. Впрочем, для рынка мобильных компьютеров это не актуально. Следовательно, создателям 1Т осталось повысить надежность и, главное, реализовать все это на практике, так как крупные производители FeRAM пока не заинтересовались этой технологией, предпочитая заниматься более традиционными технологиями 1Т-1С и 2Т-2С.

1С FeRAM (SFRAM)

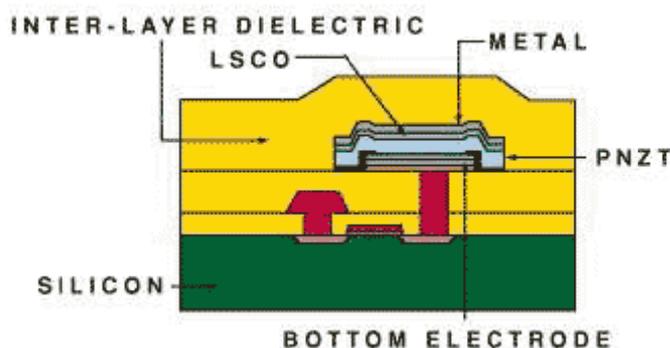
Измерительное, вакуумное и технологическое оборудование, расходные материалы

Этот тип памяти состоит из 1С ячеек, то есть ячеек, содержащих один ферромагнитный сегнетоэлектрический конденсатор. Другое коммерческое название 1С FeRAM звучит как SFRAM - statically read, non-volatile, ferroelectric random access memory (статически читаемая энергонезависимая сегнетоэлектрическая память с произвольным доступом к ячейкам, полный аналог SRAM).

Этот тип FeRAM наиболее близок по структуре к древней памяти на ферромагнитных сердечниках:



Как видно из этой схемы, принцип действия памяти на ферромагнитных сердечниках (а) и FeRAM схож - для того чтобы записать "0" или "1" надо подать соответственно положительное или отрицательное напряжение одновременно и по линии X и по линии Y, после чего заряд в ячейке хранится продолжительное время и после отключения питания. Строение современной 1С ячейки можно представить в таком виде:



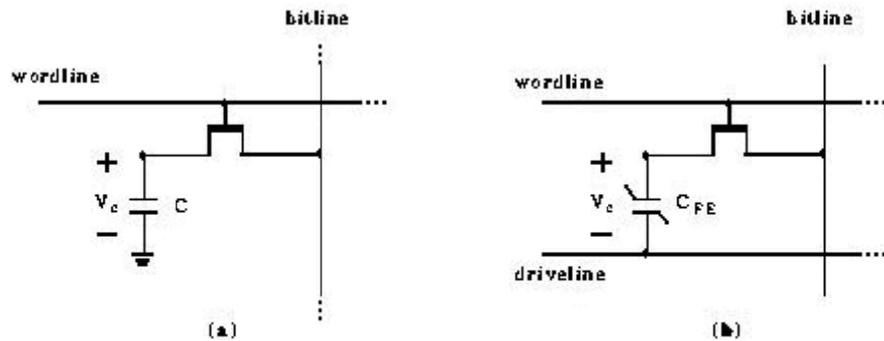
Где PNZT - модифицированный легирующими добавками PZT.

SFRAM прочат в преемницы нынешней SRAM. Предполагается, что в ближайшие несколько лет SRAM будет вытеснена с рынка полностью.

Ключевыми преимуществами технологии 1С FeRAM являются: очень малый размер ячеек, соответственно, более высокая информационная емкость на единицу поверхности микросхемы по сравнению с SRAM, великолепные показатели в области устойчивости к усталости материала (fatigue) и наложению "отпечатка" заряда (imprint), лучшая энергонезависимость по сравнению с SRAM, крайне низкое энергопотребление в режиме чтения, высокая скорость, низкая цена.

1T-1C FeRAM

Данный тип FeRAM является наиболее распространенным на текущий момент. Этот тип FeRAM очень близок по структуре к обычной DRAM, в чем легко убедиться, взглянув на принципиальные схемы обоих типов памяти.



1T - 1C Memory Cell. (a) DRAM cell (b) FRAM cell

Широкое распространение данного типа памяти объясняется как раз этой схожестью с DRAM, то есть инженерам-разработчикам не приходится менять логику своих разработок, им всего лишь приходится учитывать такие новые факторы в схеме, как полевой сегнетоэлектрический транзистор (ferroelectric gate field-effect transistor), вместо обычного полевого транзистора и конденсатор из этого же материала. По сравнению с 1Т структурой 1Т-1С структура является гораздо более стабильной и дольше может хранить записанную информацию, но, правда, ячейка выходит заметно крупнее.

Основное отличие от DRAM помимо сегнетоэлектрического транзистора и конденсатора состоит в способе подключения ячейки к общей структуре. В DRAM отрицательная обкладка конденсатора подключена к корпусу чипа, а в случае FeRAM подключение происходит к дополнительному проводнику - передающей линии (driveline). Казалось бы, отличие незначительное, но оно полностью меняет сам принцип записи данных в ячейку.

Для того чтобы записать бинарный "1" в ячейку DRAM на линию данных (bitline) подается положительное напряжение, а на линию управления (wordline) подается сигнал, открывающий полевой транзистор, после чего конденсатор заряжается и ячейка принимает состояние "1". Запись бинарного нуля происходит еще проще - линия данных (bitline) заземляется, по линии управления подается сигнал, открывающий транзистор - конденсатор разряжается, ячейка в состоянии "0".

В случае FeRAM, для записи бинарной единицы на передающую линию driveline подается положительное напряжение, линия данных (bitline) заземляется, по линии управления подается сигнал, открывающий транзистор - происходит отрицательная поляризация конденсатора - ячейка принимает значение "1". Запись нуля - наоборот - на линию данных подается положительное напряжение, передающая линия заземляется, по линии управления подается сигнал, открывающий транзистор - происходит положительная поляризация конденсатора - ячейка принимает значение "1". В обоих случаях используется положительное напряжение, только подаваемое с разных направлений. Основным элементом в цепи, отвечающим за запись данных является конденсатор. Запись происходит после открытия транзистора. Следовательно, имеется некая временная константа, включающая время срабатывания транзистора плюс время поляризации конденсатора. Именно эта константа будет ответственна за скорость работы памяти FeRAM. Естественно, что для каждого сегнетоэлектрика эта константа будет разной, следовательно, главной задачей исследователей на ближайшее время будет поиск материалов и легирующих добавок, для которых эта временная константа будет наименьшей.

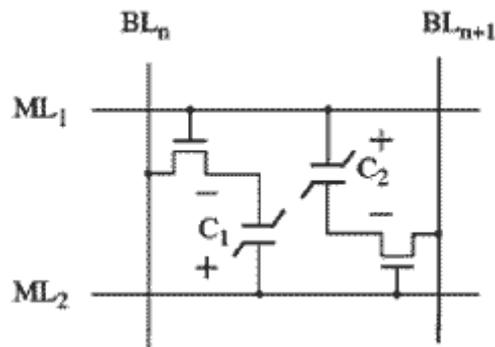
По сравнению с вышерассмотренными 1Т и 1С структурами, размер ячейки 1Т-1С очень велик. Казалось бы - у DRAM точно такой же, почему же там никто не жалуется на размер? Все дело в процессе производства - помимо обычной фотолитографии в случае FeRAM при нанесении сегнетоэлектрического слоя приходится применять спекание - получение керамики из смеси металлооксидов, а это существенно затрудняет производство ячеек такого размера, так как применяются довольно высокие температуры порядка 350-5000С. Именно эти факторы послужили причиной столь долгого старта этого формата памяти. Все остальные показатели у него вполне удовлетворяют рыночным требованиям - это и сравнительно низкое время доступа, мгновенная перезапись, низкое энергопотребление при записи/чтении, огромное количество циклов записи/перезаписи, длительное время хранения данных при отсутствии источника питания.

Измерительное, вакуумное и технологическое оборудование, расходные материалы

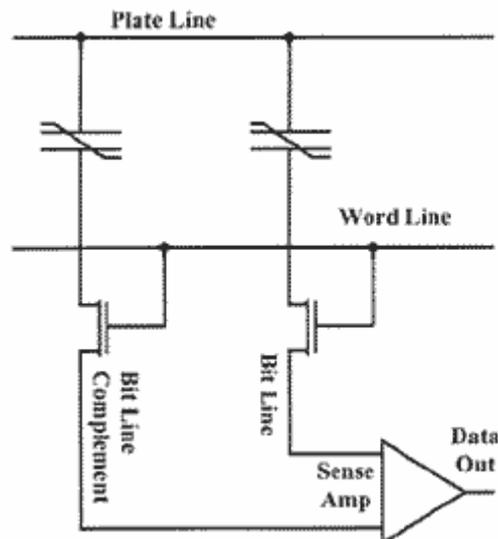
Компании Toshiba и Infineon Technologies AG - главные производители 1Т-1С FeRAM на данный момент - прилагают все усилия, чтобы выявить незадействованные пока возможности этой памяти и получить, в конце концов, действительно память будущего, способную вытеснить устаревающих конкурентов с рынка. Эти компании объявили о создании чипа 1Т-1С FeRAM с самой большой на сегодняшний день плотностью записи информации емкостью 32 Мбит. Этот чип произведен по 0,2-мкм технологии, имеет общую площадь равную 96 кв. мм, из которых примерно 34% занято под логику контроллера.

2Т-2С FeRAM

У данного типа памяти элементарная ячейка представляет собой сдвоенные ячейки 1Т-1С типа. Эти ячейки можно комбинировать по-разному, поэтому общей формуле 2Т-2С могут соответствовать несколько вариантов. Принципиальные схемы некоторых распространенных вариантов 2Т-2С FeRAM выглядят так:



Этот вариант 2Т-2С ячейки подключен к двум управляющим линиям, объединенных с передающими линиями (ML - merged Wordline/plateline) и к двум линиям данных BL (bitline) и называется по способу подключения WL/PL архитектурой. Эта схема представляет собой просто две 1С-1Т ячейки, скомпонованные в одну большую. Ничем особым от 1С-1Т WL/PL не отличается - просто это один из способов повысить интеграцию компонентов в чипе. Другая схема, реализованная на практике, выглядит несколько иначе:



Здесь ячейка 2Т-2С подключена к управляющей линии (wordline) и передающей линии (plateline), но линии данных разделена на две отдельные линии (bitline и complement bitline), соответственно запись/чтение на сегнетоэлектрические конденсаторы производится отдельно. Данные, записываемые в эти два конденсатора, дублируются, что приводит к увеличению надежности хранения данных.. Помимо конденсаторов присутствует усилитель, необходимый для считывания данных из ячейки 2Т-2С. Усилитель и две структуры 1Т-1С сильно удорожают эту память, но главный недостаток - это колоссальный размер ячейки. Но есть у 2Т-2С структуры достоинство, которое напроочь перечеркивает

115404, Россия, г. Москва, 11-я Радиальная, д.2, оф.20. Тел./Факс: (499) 218-2360
E-mail: info@eltrm.ru info@electrade.ru [Http://www.eltrm.ru](http://www.eltrm.ru) [Http://www.electrade.ru](http://www.electrade.ru)

Измерительное, вакуумное и технологическое оборудование, расходные материалы

все недостатки - повышенная, даже можно сказать избыточная стабильность хранения данных и полная невосприимчивость к внешнему воздействию. В самом деле, память 2Т-2С FeRAM устойчива к воздействию магнитных и электромагнитных полей, не теряет информацию под действием ионизирующих излучений, ударопрочна и способна хранить данные очень большой период времени. Все вышеперечисленные свойства в принципе обычному компьютерному пользователю совершенно не нужны, но они жизненно необходимы для функционирования устройств в местах, где все эти вредоносные факторы есть - в первую очередь, в космосе.

Помимо этих основных структур существует огромное количество их комбинаций.