

Сегнетоэлектрические конденсаторы — изобретение фирмы Ramtron¹

Самьюэл Уэбер

По словам специалистов недавно созданной фирмы Ramtron Corp. (Колорадо-Спрингс, шт. Калифорния), они провели обширный комплекс НИОКР в области схмотехники, полупроводниковой технологии и материаловедения, прежде чем сумели создать пригодное для практического применения сегнетоэлектрическое устройство. Впервые разработано статическое ЗУПВ, энерго-независимость которого обеспечивается благодаря использованию сегнетоэлектрических конденсаторов, запоминающих логическое состояние прибора при прерывании питания.

Новое изделие получило название FRAM (ferroelectric RAM — сегнетоэлектрическое ЗУПВ). Первый прибор этого типа, представляющий собой ИС энергонезависимого статического ЗУПВ емкостью 256 бит, будет представлен на Международной конференции по интегральным схемам 16—19 февраля 1988 г. в Сан-Франциско. За ним последует семейство устройств памяти большей емкости: уже в 1988 г. появятся 16- и 64-кбит приборы, а выпуск 256-кбит ЗУ намечен на 1989 г.

FRAM — первое в мире действительно энергонезависимое устройство памяти, допускающее и запись и считывание, — заявляет коммерческий директор фирмы Ramtron Ричард Хортон. — Наша новая технология несомненно окажет влияние на всю электронную промышленность. Мы получили почти идеальное устройство памяти, способное удовлетворить практически все требования, предъявляемые к полупроводниковым приборам. Хотя нынешняя разработка и ограничена рамками устройств памяти, ее технология может быть использована для создания логических схем микропроцессоров, специализированных ИС, аналоговых и других приборов. Новая технология переживает пока начальную стадию своего развития, — говорит Хортон, но ее потенциальные возможности огромны.

Производство сегнетоэлектрических ЗУПВ, как уже создаваемых, так и планируемых на будущее, основано на запатентованной технологии фирмы, заключающейся в осаждении на поверхность обычной полупроводниковой схемы памяти тонкой пленки цирконата-титаната свинца, которая образует в ячейках памяти сегнетоэлектрические конденсаторы, обуславливающие энерго-независимость ЗУ.

Применение сегнетоэлектрических ЗУПВ может существенно сократить число различных типов ЗУ, используемых сейчас в специальных приложениях. Например, в вычислительных системах сегнетоэлектрические ЗУПВ могут со временем заменить статические ЗУПВ в кэш-памяти, динамические ЗУПВ — в оперативной памяти, ППЗУ и СППЗУ — в справочных таблицах. Благодаря использованию сегнетоэлектрических ЗУПВ возможно исключение системных непроизводительных затрат времени, например на восстановление, состояния ожидания и другие операции, обусловленные особенностями существующих ЗУПВ. Поскольку стоимость полупроводниковых ЗУ в основном приближается к стоимости устройств массовой памяти, то магнитные диски и ленты тоже можно будет заменить съемными модулями сегнетоэлектрических ЗУПВ.

Все перечисленные приложения — дело будущего. А сейчас фирма Ramtron подготавливает мелко- и среднесерийное производство сегнетоэлектрических ЗУПВ и продает другим фирмам технологические лицензии на крупносерийный выпуск. «Первое поколение сегнетоэлектрических ЗУПВ постепенно вытеснит ЗСППЗУ и СЗУПВ с резервным батарейным питанием. Но это только начало — предсказывает Хортон. — Наша фирма ищет партнеров — энтузиастов новых идей — для совместных работ, с целью создания принципиально новых видов изделий для конкретных промышленных приложений». Фирма полагает, что подобное партнерство окажет существенное влияние на такие характеризующиеся широкой номенклатурой изделий отрасли промышленности, как вычислительная техника, спутниковая связь, авиационная электроника, системы военного назначения, контрольно-измерительные приборы, бытовая электроника, робототехника, средства связи и автомобильная электроника.

В числе разработок фирмы Ramtron — проект сегнетоэлектрического ЗУПВ с однострансistorной ячейкой памяти, которое будет работать по принципу динамического ЗУПВ с улучшенными характеристиками. По плотности записи этот полностью статический прибор соответствует и даже превосходит динамические ЗУПВ, поскольку сегнетоэлектрический конденсатор в нем размещается непосредственно над транзистором. К тому же сегнетоэлектрические ЗУПВ полностью энерго-независимы и не нуждаются в циклах перезаписи, необходимых для обычных динамических ЗУПВ. Фирма Ramtron разрабатывает также на одно-

¹ Samuel Weber. Ferroelectric capacitors are Ramtron's bright idea, No. 4, pp. 91—94.

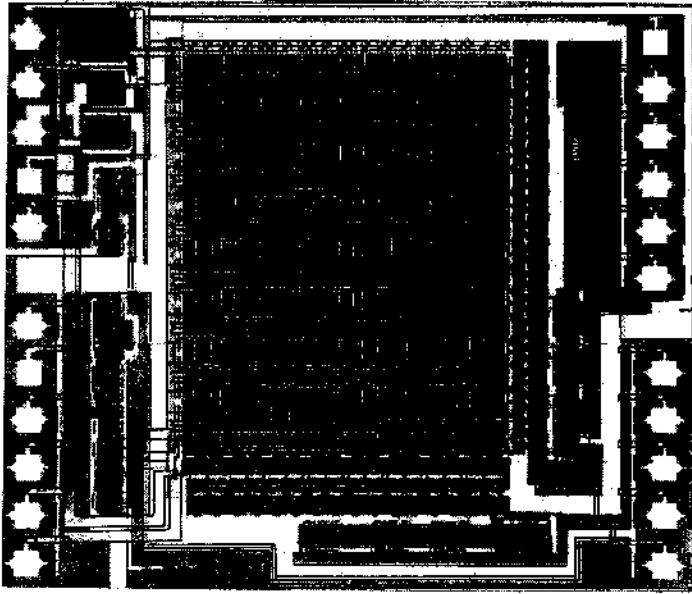


РИС. 1. Сегнетоэлектрическое ЗУПВ фирмы Ramtron обладает рабочими характеристиками статического ЗУПВ, плотностью упаковки динамического ЗУПВ и энергонезависимостью ЭСППЗУ.

транзисторных ячейках приборы памяти емкостью 1 Мбит и более.

Первое изделие, выпущенное компанией, — демонстрационная модель FM801 (рис. 1) — в настоящее время проходит испытания у заказчиков с целью определения его возможностей для таких применений в авиакосмической аппаратуре, системах военного назначения, вычислительной технике, связанном оборудовании, бытовой и промыш-

ленной электронике. 256-бит ИС изготовлена по КМОП-технологии с весьма умеренными проектными нормами. Для планируемых серийных изделий фирма намеревается использовать 1,5-мкм КМОП-технологию.

Все эти устройства по своей структуре почти идентичны обычной шеститранзисторной ячейке статического ЗУПВ (рис. 2, а) и отличаются от нее только наличием двух сегнетоэлектрических конденсаторов Z_1 и Z_2 , соединенных с входными затворами ячейки через управляющие вентили T_1 и T_2 . Эти «теневые» конденсаторы и представляют собой энергонезависимые элементы памяти. В рабочем режиме указанные конденсаторы отсоединены от схемы двумя управляющими вентилями. Единственное влияние, оказываемое этими конденсаторами на работу схемы, состоит в незначительном увеличении входной емкости за счет добавления емкостей затворов вентиля.

Энергонезависимость памяти обеспечивается следующим образом: при выключении питания открываются управляющие вентили и прежде, чем упадет напряжение в цепи, сегнетоэлектрические конденсаторы подключаются к запоминающему элементу и поляризуются в соответствии с его состоянием. Время, необходимое для поляризации конденсаторов до степени, достаточной для последующего восстановления состояния запоминающего элемента, составляет от 10 до 20 нс, что намного меньше времени разрушения состояния ячейки или времени спада напряжения питания. После поляризации конденсаторы сохраняют свое состояние практически неограниченно долго.

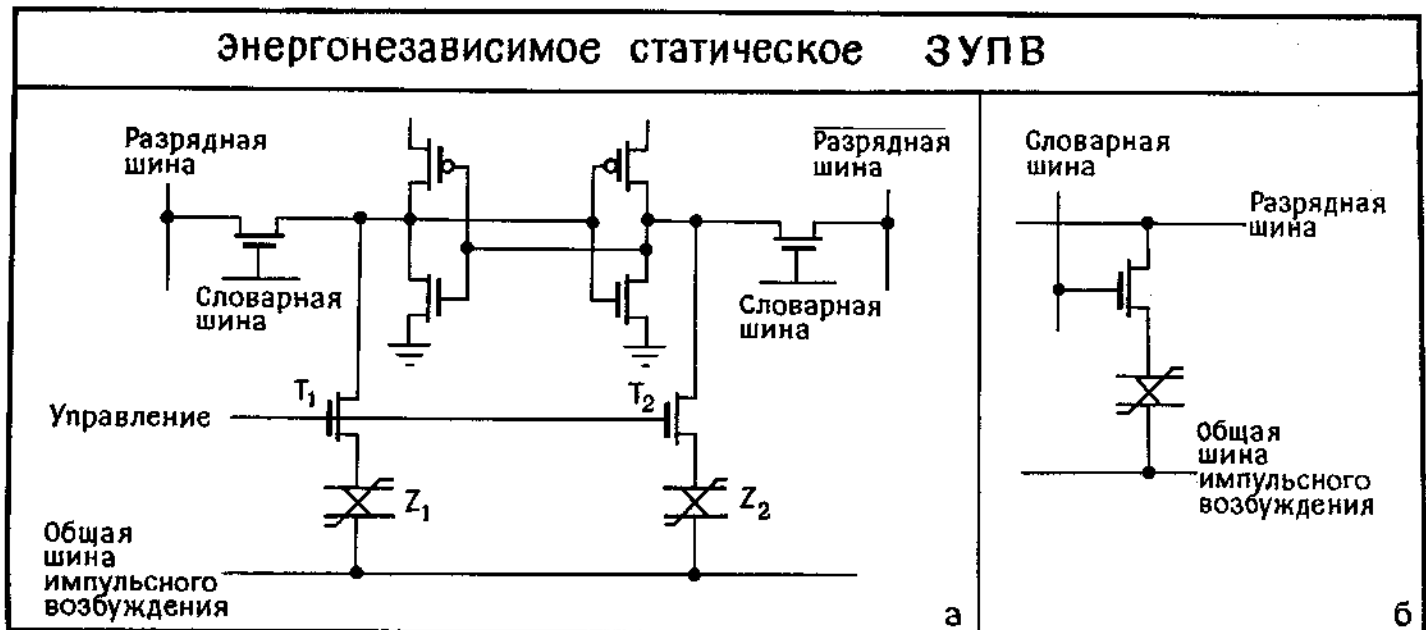


РИС. 2. Логическая структура сегнетоэлектрического ЗУПВ (а) напоминает структуру шеститранзисторных статических ЗУПВ. PZT-конденсаторы Z_1 и Z_2 энергонезависимы. В разрабатываемых гибридных структурах (б) ячейка памяти образована одним транзистором и одним конденсатором.

Восстановление информации и возврат ЗУПВ в активный режим при включении питания происходит также просто. При подаче напряжения конденсаторы создают на входах ячейки разность потенциалов, соответствующую ее состоянию перед выключением, а когда напряжение питания достигнет номинальной величины, управляющие вентили отключают конденсаторы от схемы и ЗУПВ возвращаются в то же состояние, что и до отключения питания.

Такое техническое решение устраняет проблему усталости сегнетоэлектрика, выносливость которого до сих пор ограничивалась примерно 10^{10} циклами перезарядки. Большинство предыдущих экспериментальных схем было основано на повторной поляризации сегнетоэлектрика при каждом цикле перезаписи, что делает эти схемы непригодными для применения в большинстве устройств оперативной памяти. В устройстве FM801 и серийных приборах первого поколения показатель выносливости 10^{10} циклов более чем достаточен, поскольку перезарядка совершается только при включении и выключении питания. Это означает, что срок службы устройства FM801 превысит 27 000 лет, если даже его включать и выключать по 10 раз в день. Результаты первых испытаний показывают, что оно может выдерживать до 10^{15} циклов переключений. Более высокий показатель выносливости позволит использовать сегнетоэлектрик как элемент памяти взамен нынешних конденсаторных ячеек памяти динамических ЗУПВ.

Все характеристики сегнетоэлектрических ЗУПВ практически совпадают с характеристиками обычных статических ЗУПВ. Циклы чтения и записи симметричны и имеют такую же продолжительность; время выборки для FM801 составляет 70 нс, а для готовящихся к выпуску серийных элементов — от 20 до 40 нс.

Сегнетоэлектрические ЗУПВ, подготовленные к серийному выпуску, имеют, подобно прибору FM801, шеститранзисторную структуру и будут выпускаться в двух вариантах — $2K \times 8$ - и $8K \times 8$ -бит кристаллы, заключенные в корпуса типа Jedec. Новые приборы совместимы по выводам с существующими статическими ЗУПВ и ЭСППЗУ. Для следующего поколения 256-кбит кристаллов фирма Ramtron разрабатывает оптимизированную гибридную технологию с уменьшенным числом операций металлизации. Применение гибридной технологии и однотранзисторной структуры элементов (рис. 2, б) позволит снизить стоимость сегнетоэлектрических приборов до уровня динамических ЗУПВ.

Технология изготовления сегнетоэлектрических ЗУПВ так же проста, как и схемотехническое решение, лежащее в их основе. Основная часть схемы FM801 изготавливается по обычной 3-мкм технологии специализированных КМОП ИС с кремниевыми затворами и одним уровнем металлизации (рис. 3). Никаких согласующих слоев между сегнетоэлектриком и материалом подложки не требуется. Поэтому к обычной технологии добавляются только три технологические опе-

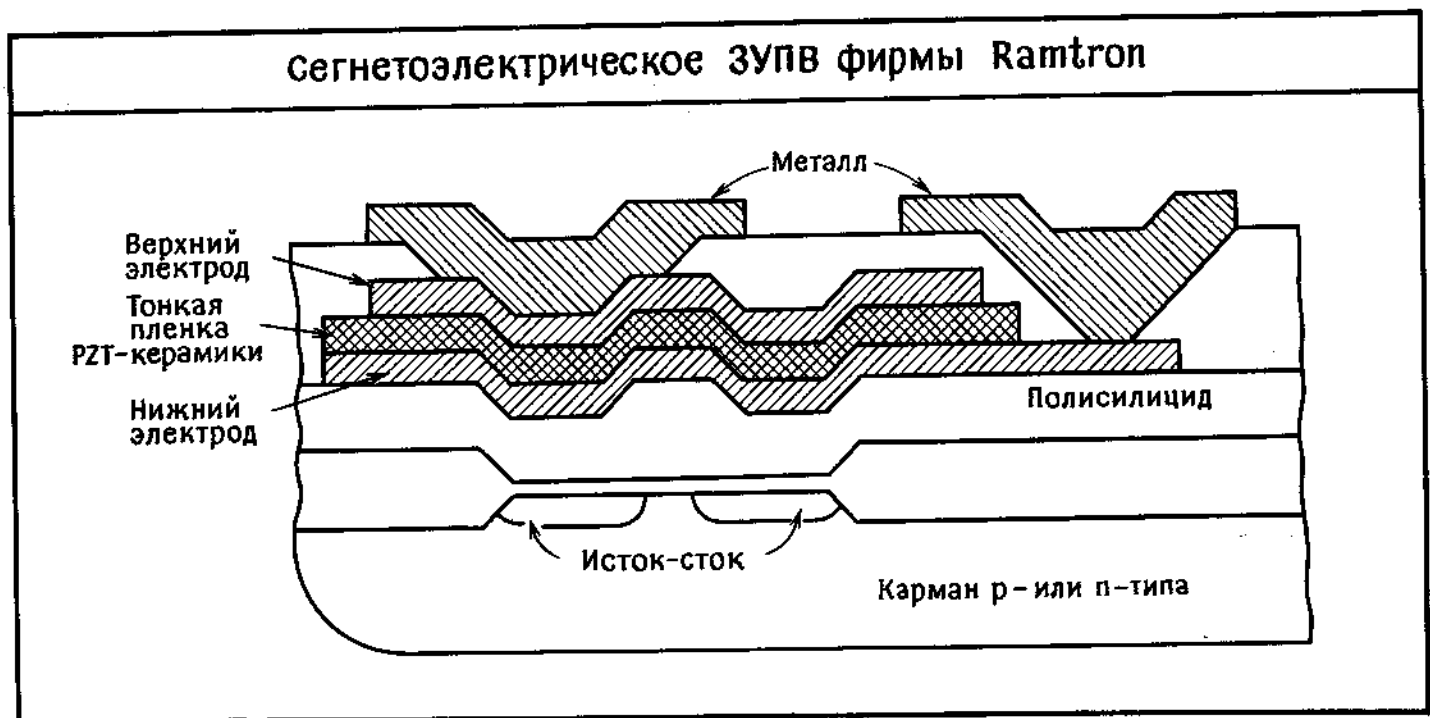


РИС. 3. Чтобы в МОП-схеме на полевых транзисторах с кремниевым затвором сформировать конденсатор, представляющий собой энергонезависимый элемент памяти, фирма Ramtron дополняет схему двумя электродами с тонким слоем PZT-керамики между ними.

рации: нанесение двух металлических слоев (обкладок конденсатора) и тонкого слоя керамики цирконат-титанат свинца. Указанные три слоя образуют цифровой запоминающий конденсатор, представляющий собой энергонезависимый элемент памяти. Этот конденсатор — новый элемент ИС, который, по словам Хортон, будет играть столь же фундаментальную роль в будущих схемах, что и полевые транзисторы. Соединение конденсатора с основной схемой осуществляется с помощью обычной металлизации и межслойных соединений.

Слой сегнетоэлектрика могут быть нанесены непосредственно на активный элемент, в результате чего получается настоящая трехмерная структура, надстроенная вертикально поверх обычной планарной схемы. Разработанный фирмой Ramtron процесс нанесения сегнетоэлектрического слоя может дополнять все современные полупроводниковые технологии, в том числе биполярных и КМОП-схем — кремниевых, арсенид-галлиевых, типа «кремний-на-диэлектрике» и других. При этом сохраняются все физические и электрические свойства структуры под слоем сегнетоэлектрика, который к тому же не требует дополнительной площади. Более того, варьируя толщину слоя сегнетоэлектрика и слоя металлизации, можно добиться совместимости по логическим уровням с широким кругом приборов, исключив зависимость рабочих характеристик сегнетоэлектрического ЗУПВ от материала и технологического процесса.

Керамика цирконат-титанат свинца (PZT-керамика) обладает хорошими физическими и электрическими характеристиками: высоким удельным сопротивлением (благодаря плотно упакованной решетке она является изолятором), термической и химической стойкостью, поскольку она химически почти инертна, и типичной для керамики высокой твердостью. Ее точка Кюри (температура фазового перехода) превышает 350 °C. PZT-керамика фирмы Ramtron обеспечивает энергонезависимость схем в температурном

диапазоне от -180° до $+350^{\circ}$ C и выше, что намного превосходит рабочий температурный диапазон существующих кремниевых схем. Пробивное напряжение PZT-слоя высокое — такой слой, обеспечивающий совместимость с КМОП-схемами, легко выдерживает напряжение 40 В. И наконец, PZT-керамика отличается высокой радиационной стойкостью.

Еще одним преимуществом PZT-материала является его чрезвычайно высокая диэлектрическая проницаемость, равная 1200, что примерно в 300 раз превышает диэлектрическую проницаемость диэлектриков, используемых в современных схемах динамических ЗУПВ. Благодаря этому сегнетоэлектрические ЗУПВ допускают более высокую плотность интеграции, нежели динамические приборы памяти, поскольку сегнетоэлектрические запоминающие элементы требуют меньшей площади и могут быть размещены непосредственно над активной частью схемы или внутри нее.

Чтобы убедиться в энергонезависимости и выносливости схем, необходимы продолжительные испытания на долговечность. Основываясь на результатах аналогичных испытаний ЭППЗУ, специалисты фирмы Ramtron предсказывают для своих сегнетоэлектрических ЗУПВ первого поколения срок службы свыше 10 лет и считают весьма вероятным, что называемая ими цифра возрастет до 100 лет, если они будут располагать результатами более продолжительных испытаний.

Фирма Ramtron считает, что сейчас еще рано назначать цену на 16-кбит сегнетоэлектрические ЗУПВ, первые образцы которых появятся в сентябре. Но, как считает Хортон, цена будет примерно такой же, что и на ЭСППЗУ и статические ЗУПВ с батарейным резервным питанием той же сложности и информационной емкости. Он предполагает, что разрабатываемые в настоящее время 256-кбит приборы FM1808 в 1991 г. будут продаваться по цене 6 долл. за штуку при заказах партий объемом 10 000 шт.