

Конструкции ячеек радиационно-стойких энергонезависимых ОЗУ, интегрированных в КМОП КНИ процесс

Е.Г. Грязнов¹, А.Н. Мансуров¹, К.О. Петросянц²

¹ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седякова», aYatmanov@niiis.nnov.ru

²МИЭМ НИУ ВШЭ

Аннотация — В статье рассмотрены вопросы интеграции матриц памяти энергонезависимых ОЗУ в КМОП КНИ процесс, проведен анализ существующих конструктивно-технологических решений изготовления ячеек памяти, использующих сегнетоэлектрический эффект, магниторезистивный эффект и эффект изменения фазового состояния.

Ключевые слова — FRAM, MRAM, PCM.

I. ВВЕДЕНИЕ

Для разработки современной бортовой аппаратуры спутниковой навигации и систем спецавтоматики, крайне необходимы радиационно-стойкие энергонезависимые ЗУ, устойчивые к воздействию спецфакторов. Широко используемые типы памяти МНОП/EEPROM/Flash невозможно применить по причине низкой спецстойкости, из-за утечки заряда и потери информации при спецвоздействиях.

Ведущие разработчики и изготовители полупроводниковой памяти активно проводят работы по разработке новых конструктивно-технологических решений для создания спецстойких многократно программируемых энергонезависимых элементов памяти [1]-[7]. Наиболее интенсивно идут разработки сегнетоэлектрической памяти (Ferroelectric Random Access Memory, FRAM) [8] и [9], магниторезистивной памяти (Magnetoresistive Random Access Memory, MRAM) [10] и памяти с изменением фазового состояния (Phase Change Memory, PCM) [11]-[14].

Проводимые исследования показали, что спецстойкость данных микросхем памяти определяется стойкостью элементов управляющей логики [15] и для разработки схем электронного обрамления энергонезависимых ЗУ необходимо применять базовый технологический процесс КМОП КНИ, занимающий ведущую позицию при разработке радиационно-стойкой электронной компонентной базы.

Целью работы является анализ конструктивно-технологических решений интеграции ЗУ для разработки ячеек спецстойких энергонезависимых ОЗУ на основе КМОП КНИ технологии.

II. СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЗУ

В запоминающем устройстве FRAM-типа сегнетоэлектрик создает конденсаторную структуру, в которой формируются два состояния спонтанной поляризации. При приложении напряжения к электродам конденсатора сегнетоэлектрик оказывается в одном из этих состояний, оно сохраняется и после снятия электрического поля. Приложение электрического поля той же величины, но противоположного направления, переключает сегнетоэлектрик во второе стабильное состояние поляризации.

Развитие конструкций ячеек FRAM с прогнозом до 2014 года показано на рис. 1 [9].

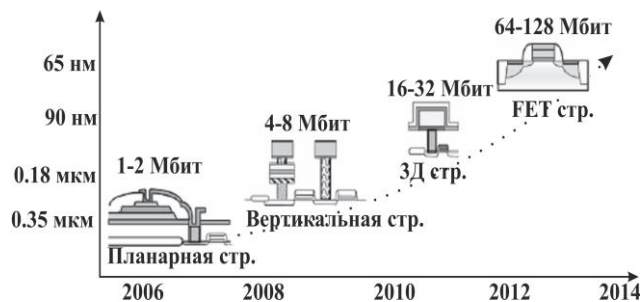


Рис. 1. Развитие конструкций FRAM ячеек памяти

Представленный прогноз развития конструкций характерен для всех видов энергонезависимых ОЗУ. Развитие конструкций направлено на увеличение степени интеграции путем снижения планарных размеров элемента памяти, размещения элемента памяти над управляющей логикой (рис. 2), перехода к трехмерным элементам памяти, интеграции элемента памяти в управляющий транзистор (рис. 3).

Производство ячеек памяти FEFET с интегрированным в затвор сегнетоэлектрическим конденсатором вносит ряд пока не решенных проблем расположения сегнетоэлектрических материалов непосредственно на кремнии и сроков службы [18]. Необходимо выполнять ячейки памяти на последних этапах маршрута для снижения воздействий высокотемпературных процессов формирования

сегнетоэлектрических слоев на КМОП логику. Снижение площади сегнетоэлектрического конденсатора позволяет совмещать ячейки FRAM с КМОП логикой, размещая тонкую сегнетоэлектрическую пленку между двумя уровнями металлизации.



Рис. 2. Ячейка памяти, интегрированная в технологию объемного кремния с тремя уровнями металла

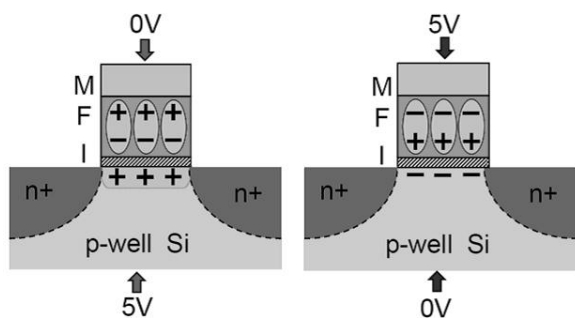


Рис. 3. Ячейка FRAM с интегрированным сегнетоэлектрическим конденсатором [16]

Ячейка FRAM конструкции 2T2C, содержащая два конденсатора и два транзистора, используется для массового производства FRAM емкостью до 256 Кбит. Время считывания/записи для такой ячейки составляет 70-150 нс, срок службы – 10^{10} циклов считывания/записи, а время хранения информации – более 10 лет.

Архитектура COP (capacitor-on-plug) FRAM ячейки, в которой сегнетоэлектрический конденсатор размещен на верху контактного штырька, соединяющего конденсатор и транзистор, позволяет масштабировать площадь конденсаторов в FRAM-ячейках до размеров 0.20 мкм^2 и 0.13 мкм^2 , используя КМОП-технологии 0.25 мкм и 0.18 мкм , соответственно [8].

Основные недостатки 3У FRAM [17]:

- разрушающее чтение, необходимость регенерации информации;
- высокотемпературные процессы формирования, сложность совмещения с КМОП КНИ технологией;
- большой размер ячейки памяти.

III. МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫЕ ЗУ

Ячейки MRAM используют магнитный туннельный переход (MTJ) сформированный из двух ферромагнитных слоёв, разделённых тонкой изолирующей прослойкой. Один из двух слоёв представляет собой постоянный магнит, намагниченный в определённом направлении, а намагниченность другого слоя может измениться при записи под действием внешнего поля.

Выделяют два вида MRAM: с генерацией магнитного поля при одновременном протекании тока в линии слов и разрядов (рис. 4 а) [19] и усовершенствованная конструкция ячейки памяти с вращением магнитного момента (SPRAM), где операция записи выполняется током, непосредственно протекающим через MTJ, без прохождения через линию слов (рис. 4 б).

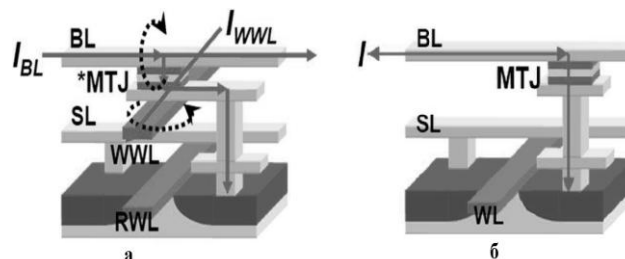


Рис. 4. Структура ячеек MRAM

Так как повышенная температура снижает качество, либо разрушает магнитные слои ячейки памяти, то для уменьшения воздействия данного фактора формирование MRAM необходимо проводить на верхних уровнях металлизации. Для применения в технологическом процессе с четырьмя уровнями металла, формирование ячейки памяти необходимо проводить между третьим и четвертым уровнем металла при пониженных температурах.

MRAM ЗУ обладают низкими рабочими напряжениями, высокой скоростью чтения и записи, и высокой износостойкостью. Основной проблемой ЗУ MRAM является высокая стоимость, связанная со сложностями интеграции с технологией КМОП, и высокие токи записи.

SPRAM ЗУ работают при меньших токах записи, что повышает надежность и уменьшает стоимость ЗУ. Площадь интегрированной в КМОП технологию ячейки памяти SPRAM может быть уменьшена вплоть до $4F^2$ [19].

В начале 2011 года EverSpin анонсировала новый продукт MR25H40 (4Мбит MRAM), работающий на тактовых частотах вплоть до 40 МГц и обеспечивающий хранение данных более чем 20 лет. Образцы чипа уже используются в промышленности при температурах от -40°C до 85°C .

По сообщениям Toshiba в 2011 году, их недавно разработанный магнитный туннельный переход (MTJ) с перпендикулярной намагниченностью обладает

уникальными свойствами - на его основе, в ближайшие 3 - 4 года, будут разработаны гигабитные STT MRAM-устройства.

Пример встраивания ячейки памяти MRAM в КМОП-технологии между четвертым и пятым уровнем металлизации приведен на рис. 5 [20].

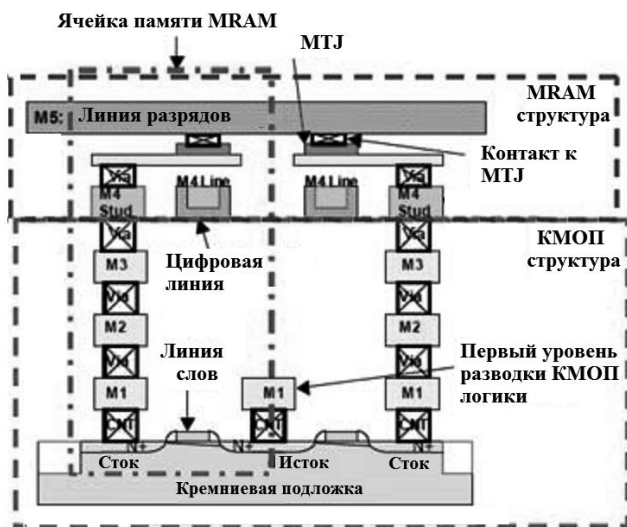


Рис. 5. Поперечное сечение ячейки MRAM

IV. ЗУ С ИЗМЕНЕНИЕМ ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ

Технология памяти с изменением фазового состояния PCM (Phase Change RAM, PRAM, OUM, C-RAM) основывается на уникальном поведении халькогенида, который при нагреве меняет фазовое состояние (рис. 6). Если программирующий ток высокой амплитуды, но малой длительности, то халькогенид переходит в аморфное высокоомное состояние. Если программирующий ток низкой амплитуды, но высокой длительности, то халькогенид переходит в поликристаллическое низкоомное состояние. Основными недостатками PCM являются высокий ток записи и зависимость характеристик от температуры, что может привести к потере информации.

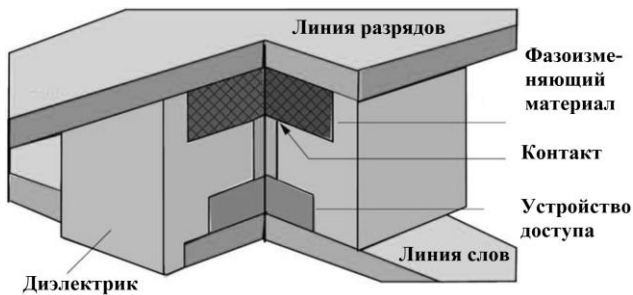


Рис. 6. Структура ячейки PCM [21]

Микросхемы PCM имеют высокую степень интеграции и хорошо встраиваются в КМОП технологию.

В сентябре 2006 года Samsung анонсировала прототип 512 мегабитного устройства, использующего в своей основе переключающий диод. Размер ячеек прототипа составляет всего 46.7 нм, что обеспечило высокую плотность. В 2008 году инженеры Intel и STMicroelectronics продемонстрировали первый прототип многоуровневого (MLC) PCM-массива эффективной емкостью 256 Мбит. Прототип мог хранить два логических бита на физическую ячейку, используя полностью аморфное, полностью кристаллическое и два состояния частичной кристаллизации [12]. Также в 2008 году Intel начал поставки PCM емкостью 128 Мбит (технологический процесс 90 нм) [13]. Можно отметить, что с переходом от флэш-памяти типа NOR на PCM можно на 30% снизить уровень энергопотребления и на 40% - занимаемую площадь [11].

ЗУ PCM уже применяется в военной и аэрокосмической области, где радиация не позволяет использовать флэш-память. PCM ЗУ, разработанные военной корпорацией BAE Systems, обладают высокой стойкостью к радиационному излучению и выдерживают порядка 10^8 циклов записи [14], что делает эту разработку претендентом на замену PROM- и EEPROM-чипов в космических системах.

V. ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

На основе проанализированных материалов была составлена сравнительная таблица 1, в которой приведены основные параметры ЗУ FRAM, MRAM и PCM.

Таблица 1

Характеристики запоминающих устройств

| Свойства | FeRAM | MRAM | PCM |
|---|-------------|-------------|----------|
| Высокая плотность | - | + | + |
| Неразрушающее чтение | - | + | + |
| Неограниченное число обращений | - | + | + |
| Цикл чтения | 40–150 нс | 2–70 нс | 70нс |
| Цикл записи | 50–150 нс | 35–70 нс | 1мс |
| Срок хранения данных (без питания), лет | >10 | бесконечно | >300 |
| Максимальное число циклов записи | > 10^{14} | > 10^{15} | > 10^8 |
| Достигнутые объемы на чип | 16Мбит | 16Мбит | 512Мбит |
| Многоуровневые ячейки | - | - | + |
| Устойчивость к температурным воздействиям | + | + | - |

При интеграции ячеек памяти в КМОП КНИ маршрут возникают проблемы температурной несовместимости процессов, проблемы качественной планаризации для роста качественных пленок ячеек памяти, взаимной диффузии материалов и поиска буферных слоев.

Проведенный анализ показал, что MRAM ячейки памяти, среди приведенных типов памяти, обладают наилучшими скоростными характеристиками, практически не ограниченным сроком хранения данных и радиационной стойкостью. Матрицы памяти MRAM возможно интегрировать в КМОП КНИ маршрут.

В России и ближнем зарубежье аналогов экстремально радиационно-стойких многократно программируемых запоминающих устройств нет.

Энергонезависимые ОЗУ иностранного производства не могут быть применены в приборах с повышенной радиационной стойкостью:

- большинство современных спецстойких энергонезависимых ОЗУ не поставляются в РФ, либо поставляются с ограничениями;

- зарубежные изготовители при проектировании энергонезависимых ОЗУ, поставляемых в РФ без ограничений, не применяют спецстойкие библиотеки элементов и не гарантируют требуемые уровни спецстойкости;

- отсутствует, либо представлена не полностью, информация об уровнях спецстойкости ЗУ по различным факторам;

- необходимо проводить полный комплекс испытаний спецстойкости и контроля надежности по требуемым методикам и с контролем необходимых параметров.

Для освоения данных видов памяти необходимо проводить разработки проектов технологических маршрутов, режимов осаждения и травления структурных слоев для интеграции производства многократно программируемой памяти в стандартный КМОП КНИ процесс, решать задачи качественной планаризации поверхности и снижения температур формирования элементов памяти.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Бойт К. Цифровая электроника Москва: Техносфера, - 2007. - 472 с. ISBN 978-5-94836-124-6.
[2] Bez R. and Pirovano A. Non-Volatile Memory Technologies: Emerging Concepts and New Materials // Materials Science in Semiconductor Processing. - 2004. - V. 7. - P. 349-355.

[3] Tabuchi Y., Hasegawa S., Tamura T., Hoko H., Kato K., Arimoto Y., Ishiwara H. Multi-bit programming for 1T-FeRAM by local polarization method // SSDM. - 2005. - P. 1038-1039.
[4] Валентинова М. Полупроводниковая энергонезависимая память. На перепутье // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. - 2003. - № 5. - С. 10-15.
[5] Зайцев И. Сравнение новых технологий энергонезависимой памяти // Компоненты и технологии. - 2006 - № 4.
[6] Вихарев Л. Микросхемы энергонезависимой памяти: накануне революции // Компоненты и технологии. - 2003. - № 9.
[7] Burr G.W., et al. Overview of candidate device technologies for storage-class memory // IBM J. RES. & DEV. - JULY/SEPTEMBER 2008. - V. 52. - № 4/5.
[8] Онищенко Е. Сегнетоэлектрическая память: состояние и перспективы // Бюллетень ПерсТ. - 2002. - № 11.
[9] Maruyama K., et al. New Ferroelectric Material for Embedded FRAM // LSIs. FUJITSU Sci. Tech. J. - 2007. - V. 43,4. - P. 502-507.
[10] Соколов М. Магниторезистивная память MRAM – быстродействующие ОЗУ и ПЗУ в одной микросхеме // Электронные компоненты. - 2007. - № 1.
[11] Шах А. Samsung начинает производство памяти PCM // Computerworld Россия. - 2009. - № 38.
[12] Greene K. A Memory Breakthrough // Technology Review. - 2008.
[13] Intel STMicroelectronics Deliver Industry's First Phase Change Memory Prototypes // Numonyx. - 2008.
[14] Lowell G. BAE Systems Develops High-density, Radiation-hardened C-RAM Semiconductor.
[15] Орлов А.А., Петров А.Г., Уланова А.В. Исследование характеристик сегнетоэлектрических ОЗУ (FRAM) 256 Кбит при воздействии ионизирующих излучений // Сборник докладов конференции «Стойкость-2010». - 2010. - С. 25-27.
[16] Takeuchi K. Ferroelectric-Gate FET for Flash Memory & SRAM (CMOS) from Design/System Perspective // ITRS ERD/ERM Memory Workshop Presentation. - 2010.
[17] Baldi L., Technology Limitations FeRAM // ITRS ERD/ERM Memory Workshop Presentation. - 2010.
[18] Ma T.P. and Han J.-P. Why Is Nonvolatile Ferroelectric Memory Field-Effect Transistor Still Elusive? // IEEE Elect. Dev. Lett. 23. - 2002. - № 7. - P. 386-388.
[19] Endoh T. Emerging Research Memory Technologies Spin Transfer Torque MRAM (SPRAM) and its Application // ITRS ERD/ERM Memory Workshop White Paper. - 2010.
[20] Hosomi M., Yamagishi H., Yamamoto T., Bessho K., Higo Y., Yamane K., Yamada H., Shoji M. and Kano H. A novel nonvolatile memory with spin torque transfer magnetization switching: spin-ram // IEEE Elec. Dev. Meeting 2005 Technical Digest, IEEE International. - 2005. - P. 473-476.
[21] Qureshi M.K., Srinivasan V., and Rivers J.A. Scalable High Performance Main Memory System Using Phase-Change Memory Technology // Proc. of the 36th Int. Symp. on Computer Architecture. - 2009. - P. 24-33.