

Халькогенидная энергонезависимая память CRAM

Александр ПОПОВИЧ
popovich@bae-radhard.ru

Практическая реализация запатентованного более 40 лет назад запоминающего устройства на основе эффекта изменения фазы агрегатного состояния вещества потребовала десятилетий исследований. Сегодня микросхемы энергонезависимой памяти CRAM с запоминающими ячейками на основе сплавов GeSbTe начинают входить в повседневную практику космического приборостроения как один из ключевых элементов радиационно-стойкой вычислительной техники. Рассмотрим подробнее доступные на рынке микросхемы CRAM и перспективы развития халькогенидной технологии.

История и физические принципы технологии CRAM

«Отцом» современной технологии запоминающих устройств на основе эффекта изменения фазы агрегатного состояния вещества является ныне здравствующий выдающийся американский ученый и изобретатель литовского происхождения Стэн Оушински (Stanford Ovshinsky) (рис. 1). Результатами его исследований в области практического применения поликристаллических и аморфных материалов стали около 400 патентов в различных областях техники. За 60 лет активной изобретательской деятельности этот ученый-самоучка, не получивший высше-

го образования, заслужил всемирную славу «Эдисона современности» и в 1999 г. был назван журналом Time одним из «героев планеты» XX века. Среди его изобретений наиболее известны и массово повседневно используются во всем мире NiMH-аккумуляторные батареи и тонкопленочные солнечные батареи.

Созданная Оушински в 1960 г. научно-исследовательская компания Energy Conversion Devices и ныне успешно занимается разработкой перспективных технологий топливных элементов, аккумуляторных и солнечных батарей и, помимо этого, халькогенидных запоминающих устройств (CRAM). Для коммерциализации технологии запоминающих устройств на эффекте изменения фазы им же в 1999 г. была создана компания Ovonix, обладающая авторскими правами на это изобретение. В настоящее время Ovonix совместно с лидерами мировой полупроводниковой индустрии продолжает исследования в области практического применения халькогенидных материалов.

К сегодняшнему дню лицензию Ovonix на производство продукции по технологии CRAM приобрели уже 12 компаний, что говорит об активной подготовке к ее внедрению. В таблице приведено состояние работ по CRAM на 2009 г. Первой компанией, которая смогла предложить рынку готовый продукт, стала корпорация BAE Systems, но в ближайшие годы ожидается появление и других изделий.

В чем причина столь агрессивного интереса ведущих мировых производителей электронных компонентов к этой технологии? Ключевые преимущества CRAM можно сформулировать так: потенциальная возможность создания элементов памяти намного меньших размеров, чем все ныне существующие, и устойчивость хранимой информации к электромагнитным полям и радиации. В 2009 г. рынок устройств энергонезависимой памяти по некоторым оценкам составил приблизительно 20 млрд долларов, практически 100% из которых приходится на память типа Flash. Пока не ясно, как бы-

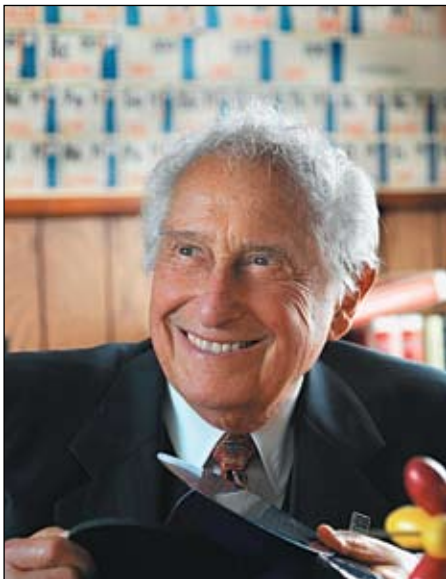


Рис. 1. Стэн Оушински (Stanford Ovshinsky) (фотограф: Glenn Triest)

Таблица. Компании, разрабатывающие изделия по технологии CRAM

Компания	Патенты	Готовые изделия	Примечание
Energy Conversion Devices	да	нет	Изобретатель технологии CRAM на основе сплавов GeSbTe
Ovonix	да	нет	Выдана лицензия на технологию
BAE Systems	да	есть	Совместные исследования с Ovonix
Intel	много	нет	Совместные исследования с Ovonix
ST Microelectronics	много	нет	Совместные исследования с Ovonix
Samsung	да	нет	Совместные исследования с Ovonix
Elpida	много	нет	Совместные исследования с Ovonix
Macronix	много	нет	Совместные исследования с Infineon, IBM
IBM	да	нет	Совместные исследования с Infineon, Macronix
Hynix	нет	нет	Совместные исследования с Ovonix
Infineon/Quimonda	да	нет	Совместные исследования с Ovonix, Macronix
Micron	да	нет	Самостоятельные исследования
Philips	да	нет	Самостоятельные исследования
Silicon Storage	да	нет	Самостоятельные исследования

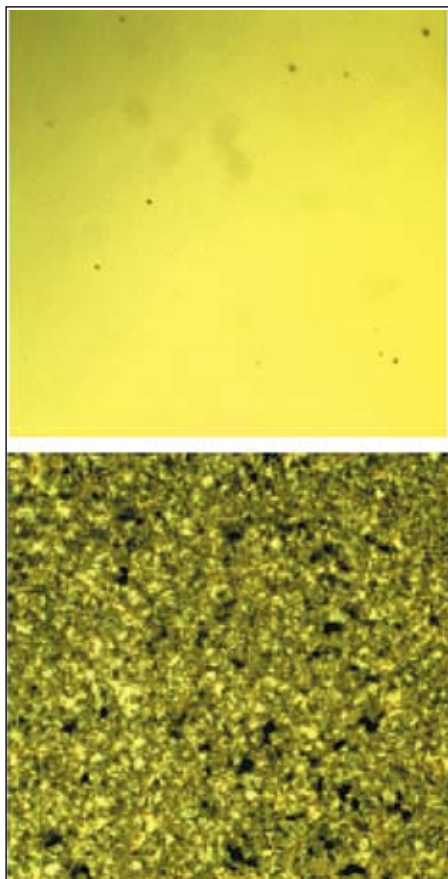


Рис. 2. Пленка $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ при увеличении 1500×:
а) в аморфном состоянии;
б) в поликристаллическом состоянии
(по материалам Structured Materials Industries, Inc.)

стро и какую долю рынка займет технология CRAM, однако есть основания полагать, что дни безраздельного доминирования Flash подходят к концу.

Разберемся подробнее в технологии запоминающих устройств на основе эффекта изменения фазы агрегатного состояния вещества. Принцип действия «халькогенидной» ячейки памяти очень прост: тонкая пленка вещества, описываемого химической формулой $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, располагается между двумя электродами. В зависимости от фазы состояния вещества (аморфная или поликристаллическая) измеренное сопротивление пленки может отличаться на порядки. На рис. 2 представлена микрофотография пленки $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ с увеличением 1500× в двух различных состояниях.

Для осуществления перехода между фазами используется нагрев, возникающий при прохождении через ячейку электрического тока. Быстрый нагрев выше точки плавления и последующее быстрое охлаждение позволяют перевести пленку в аморфное состояние, а относительно продолжительный нагрев до температуры чуть ниже точки плавления позволяет восстановиться кристаллической структуре материала. Практически достигнутое в опытных образцах время кристаллизации составляет уже не более 50 нс, что по-

зволяет говорить о сопоставимости скорости записи CRAM и SRAM. Достигнутое количество циклов перезаписи одной ячейки без потери надежности уже сейчас составляет 10^8 . Практическая реализация запоминающего элемента на вышеописанном принципе, включающая в себя управляемый нагреватель и измеритель сопротивления, разумеется, не проста. Можно смело утверждать, что изготовление массивов ячеек CRAM размером в единицы нанометров является одним из лучших достижений современной нанотехнологии.

Еще одна любопытная возможность халькогенидной технологии хранения информации заключается в создании не-двоичных систем памяти. Все привыкли, что бит может принимать только два значения — «0» и «1», и современная цифровая схемотехника не предполагает иных вариантов. Безусловно, максимальная надежность хранения информации в ячейке CRAM достигается при полном переходе всего объема вещества в элементе из одной фазы в другую, однако, поскольку информация — это фактически значение электрического сопротивления, то возможно создание элементов памяти с 3 и более состояниями, количество которых теоретически не ограничено. Так, например, в лаборатории Ovonic был создан устойчиво действующий элемент памяти, сохраняющий 10 возможных значений для одного бита за счет управляемого частичного перехода фазы в веществе наноячейки. Практического применения для этого способа хранения информации пока нет, но сам факт его существования свидетельствует о том, что возможности увеличения плотности записи данных в единице объема отнюдь не исчерпаны.

Существенным преимуществом CRAM по сравнению с многими другими технологиями хранения информации является практически полная нечувствительность хранимой информации к электромагнитным полям, импульсам, ионизирующему облучению и другим факторам воздействия окружающей среды, что становится особенно важно для космического приборостроения и военных приложений. Впрочем, усиление солнечной активности всего в несколько раз может привести к невозможности применения современной Flash-памяти в мобильных телефонах, компьютерах и других бытовых устройствах. В таком случае альтернатив CRAM практически не останется. Возможно, этим и объясняется повышенный интерес производителей к технологии, изобретенной Стэнном Оушински в 1968 г.

Микросхемы CRAM и их применение

Обзор рынка микросхем, изготовленных по технологии CRAM, сделать чрезвычайно просто: на сегодняшний день потребителям

во всем мире (а с 2009 г. и в России) доступно всего лишь одно семейство, выпускаемое корпорацией BAE Systems. Создавая первые в мире микросхемы по новой технологии, BAE решало практическую задачу обеспечения нужд NASA и министерства обороны США быстродействующей энергонезависимой памятью для приложений, функционирующих в условиях повышенной радиации и сильных электромагнитных полей. Результатом совместного применения разработанной Lockheed Martin Aerospace Electronic Systems (с 2000 г. это часть корпорации BAE Systems) технологии R25 изготовления радиационно-стойких CMOS-микросхем и лицензированной Ovonic структуры ячейки CRAM стало семейство изделий «8406746». В состав семейства входят два базовых кристалла объемом 2 и 4 Мбайт, а также многокристалльные сборки, состоящие из 2–5 одинаковых модулей, размещенных в одном корпусе.

Относительно скромные показатели по скорости записи и чтения (100 нс гарантированное время доступа и 1000 нс гарантированное время записи информации), а также по количеству циклов перезаписи (всего 100 000 циклов) в сочетании с колоссальной стойкостью к радиации и общей надежностью позволяют, тем не менее, говорить о безусловном прорыве в области схемотехники для космического приборостроения. Действительно, как типичный представитель изделий, изготовленных по технологии R25, микросхемы энергонезависимой памяти CRAM обеспечивают:

- радиационную стойкость по накопленной дозе не менее 200 крад (до 1 Мрад в специальном исполнении);
- бесперебойное функционирование при кратковременном облучении интенсивностью до 2×10^7 рад/с;
- сохранение работоспособности после 50 нс импульсного облучения 1×10^{12} рад/с;
- стойкость к ТЗЧ с энергией < 120 МэВ·см²/мг;
- стойкость к нейтронному потоку до 1×10^{13} нейтронов на см².

Сложно ли интегрировать CRAM в существующие схемы бортовых вычислительных и управляющих электронных устройств? Нет. С точки зрения сигнала управления, халькогенидная микросхема памяти фактически идентична статическому ОЗУ и доступна для побайтового чтения (записи) в произвольном порядке с постоянным временем доступа, как это и должно быть для RAM (random access memory). Каждый байт (слово) записывается и считывается индивидуально, без необходимости манипуляций дополнительными буферами или управления какой-либо микросхемотехникой внутри кристалла. Структурная схема типичной CRAM представлена на рис. 3:

- Линии выбора адреса A0–A18 непосредственно адресуют 8-битные слова в массиве ячеек памяти.

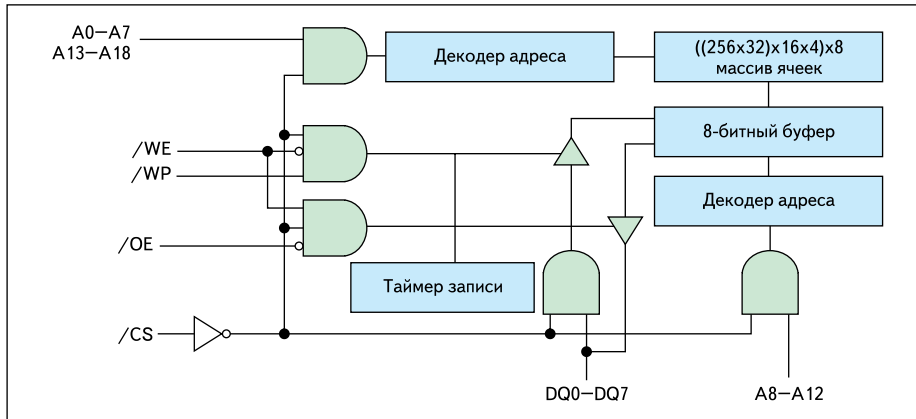


Рис. 3. Структурная схема микросхемы памяти CRAM

- Двухнаправленные линии DQ0–DQ7 осуществляют ввод и вывод данных.
 - Сигнал /CS активирует микросхему памяти, выводя драйверы шины данных из состояния высокого импеданса.
 - Сигнал /WE (write enable) активирует запись слова, а сигнал /OE (output enable) разрешает доступ к данным на чтение.
 - Дополнительный сигнал /WP (write protect) блокирует запись данных и может использоваться для предотвращения случайной записи во время запуска системы по включению питания и в других ситуациях.
- Очевидно, что простой и однозначный интерфейс подключения CRAM позволяет применять эти микросхемы энергонезависимой

памяти практически в любых электронных устройствах.

Микросхемы CRAM выпускаются в корпусах flatpack с количеством выводов 40 и 84 и доступны в различных конфигурациях от 256 К×8 до 512 К×40. Также доступны варианты исполнения со встроенной системой коррекции ошибок (ECC), которая уменьшает полезный объем сохраняемой информации в 2 раза, но значительно повышает надежность хранения. Типичный ток потребления при записи на максимальной частоте составляет 35 мА. На рис. 4 представлен внешний вид микросхемы CRAM в корпусе flatpack-40.

Следует отметить, что поскольку R25 считается технологией двойного назначения, экс-



Рис. 4. Внешний вид микросхемы CRAM

порт данных микросхем из США контролируется в соответствии с требованиями ITAR, и для приобретения CRAM требуется лицензия. Информация о халькогенидных запоминающих устройствах, а также другой продукции и технологиях BAE, разрешенных к ввозу в Российскую Федерацию, доступна на сайте www.bae-radhard.ru.