



Ами ГОРОДЕЦКИЙ, к. т. н. (JTAG.ТЕСТ)
amigo@jtag-test.ru

PCM-память на основе фазового перехода

Общепризнанная тенденция развития современных микросхем памяти заключается, по всей видимости, в том, что так называемая память PCM (Phase Change Memory), или память на основе фазового перехода, в самом скором будущем полностью сменит (или уже сменила) флэш-память NOR и NAND.

Дело в том, что один из ведущих мировых производителей флэш-памяти — фирма Micron, поглотив компанию Numonix, всерьез занялась массовым выпуском микросхем памяти этого типа и уже объявила о начале производства модулей памяти на основе фазового перехода (Phase Change Memory, PCM) по технологии 45 нм для мобильных устройств. Имеются в виду ЗУ, работающие на основе фазового перехода в халькогенидных соединениях, которые также называются CRAM (Chalcogenide RAM), OUM (Ovonic Unified Memory), PRAM (Phase-change RAM или Perfect RAM), но в последнее время для таких ЗУ наиболее часто употребляется название PCM. Первое семейство ЗУ этого типа, Optio PCM, уже находит широкое применение, так как разработчикам электронных систем требуются все большие объемы применяемой памяти. ЗУ PCM обеспечивают сочетание лучших характеристик флэш-памяти NOR и NAND, а также ЭСППЗУ и RAM в единственном корпусе ИС.

ЗУ PCM имеют следующие характеристики:

- Сохранение содержимого ЗУ при выключении питания (так называемая неволатильность), в отличие от ЗУ RAM.
- Возможность смены содержимого отдельных битов ЗУ без необходимости в фазе стирания всего содержимого ИС, в отличие от флэш-памяти.
- Высокая скорость считывания, как у ЗУ RAM, при этом латентность считывания сравнима с одноканальной флэш-памятью NOR, а ширина шины данных сопоставима с ЗУ DRAM.
- Высокая скорость записи, быстрее, чем у флэш-памяти NAND, и с более низкой латентностью.
- Высокая надежность хранения информации при повышении уровня интеграции ИС, в отличие от технологий NOR и NAND, основанных на хранении заряда; технология PCM вовсе не связана с хранением заряда, так что с повышением уровня интеграции ИС надежность хранения данных в ЗУ PCM только возрастает.

Таким образом, со времени открытия эффекта запоминания PCM в 1960 году до начала его практического воплощения прошло ни много ни мало 50 лет. Каждая ячейка памяти этого типа представляет собой микроскопический кристалл вещества, который сначала плавится под воздействием электрического тока, а затем застывает. Магнитные свойства этого застывшего кристалла определяются направлением протекавшего через него электрического тока.

Халькогенид — это материал из стекла с посеребрёнными полупроводниками из германия, сурьмы и теллура. Он способен находиться в двух стабильных фазовых состояниях и переходит из кристаллического в аморфное состояние после приложения небольшой порции тепла. А так как у этих двух состояний характеристики электросопротивления различны — кристаллическая фаза с большим сопротивлением (логическая единица) и аморфная с малым сопротивлением (логической ноль) — и могут быть легко измерены, халькогениды выступают идеальным материалом для хранения логических данных. В принципе, подобные материалы на основе халькогенида с меняющимся коэффициентом преломления применяются в перезаписываемых оптических дисках CD-RW и DVD-RW.

Первые попытки создания такого типа памяти приводили к тому, что микроструктуры требовали для плавления чрезвычайно высоких температур. В настоящее время, благодаря разработке новых типов магнитных материалов и возможности создания микроскопических структур, стало доступным массовое производство памяти нового типа, однако к этому времени на рынке уже прочно закрепилась постоянная память на основе транзисторов — флэш-память.

Новый тип памяти, однако, обладает гораздо лучшими характеристиками, чем флэш-память. Во-первых, память PCM значительно быстрее. В Аахенском университете RWTH в Германии под руководством физика Матиаса Вуттига (Matthias Wuttig) уже разработаны ячейки памяти PCM, время записи и доступа

к которым составляет 19 нс. (Для сравнения: типичное время записи в ячейки флэш-памяти составляет несколько миллисекунд.) Это, в свою очередь, означает значительное увеличение скорости загрузки программ и считывания информации, записываемой в память PCM. Вторым существенным отличием памяти PCM является ее надежность. Ячейки этой памяти не подвержены процессам старения, поэтому такая память имеет практически неограниченное количество циклов записи и неограниченное время хранения информации.

Существующие образцы могут находиться даже в четырех отдельных состояниях, что позволяет хранить в одной ячейке сразу два логических разряда. Память с фазовым переходом PCM способна заменить собой не только флэш-память, но и нынешние модули оперативной памяти, требующей постоянной подпитки электричеством.

Принято считать, что подача высокоамплитудного импульса с малой длительностью вызывает плавление материала, а последующее охлаждение фиксирует полученное беспорядочное расположение атомов. Такое теоретическое описание казалось абсолютно логичным, но его все равно необходимо было проверить экспериментально. Поскольку сделать это в опытах с традиционными PCM-элементами, построенными на основе поликристаллических тонких пленок с небольшими (10–20 нм) зернами, не удавалось, американцы решили работать с монокристаллическими нанопроводами. Эти провода изготавливались из самого распространенного PCM-материала — $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, обозначаемого как GST, и исследовались под просвечивающим электронным микроскопом.

Рассматривая микрофотографии, исследователи соотнесли обнаруженные изменения электрических параметров нанопровода с перестройкой его структуры. Как оказалось, нагрев структуры, вызванный приходом импульсов большой амплитуды, приводит к образованию вакансий (точечных дефектов кристалла), при конденсации которых появляются линейные дефекты — дислокации. Последние начинают

двигаться вдоль нанопровода, встречая и поглощая новые вакансии и уменьшая вероятность рассеяния носителей заряда, то есть снижая электрическое сопротивление. Подобные одномерные перемещения дефектов, однако, всегда нестабильны, и на каком-то отрезке нанопровода вскоре возникает «затор». В итоге падение сопротивления прекращается, дислокации скапливаются в труднопроходимой области, в объеме кристаллического состояния создается участок с высокой степенью неупорядоченности, а за этим следует аморфизация.

Результаты экспериментов с нанопроводами из GST авторы изложили в статье, опубликованной в журнале Science [1]. В том же номере журнала можно найти отчет физиков Великобритании и Сингапура, продемонстрировавших рекордно быструю PCM-память, измеряемую по длительности управляющего импульса на уровне половины амплитуды. Британо-сингапурской группе, работавшей с традиционным PCM-элементом на основе GST, удалось довести время кристаллизации до 500 пс.

Снижение требуемой длительности импульса исследователи связывают с предварительной «обработкой» материала слабым электрическим полем. Вызванное включением этого поля повышение температуры на ≈ 100 К не инициирует, например, нуклеацию (первый этап кристаллизации, образование небольших упорядоченных «зародышей»), но способствует общему упорядочению структуры и образованию кластеров в аморфной матрице. В результате число относительно больших кластеров возрастает, а вслед за этим увеличивается вероятность успешной нуклеации и роста кристаллических «зародышей» при подаче управляющего импульса.

На рисунке сверху показан обычный переход, а снизу — «быстрый» переход с предварительным включением слабого поля.

Кембриджским исследователям под руководством Стивена Эллиота (Stephen Elliott) удалось искусственно «стимулировать» кристаллы материала $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, снизив время кристаллизации до рекордно низкого значения. Этим стимулом стала предварительная организация атомов кристалла $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, которая производилась под воздействием слабого электрического поля. Ученые взяли крошечный цилиндр из GST диаметром всего 50 нм и зажали его между двумя титановыми электродами, на которые подавался «разогревающий» потенциал в 0,3 В. Электрический импульс напряжением в 1 В и длительностью 500 пс приводил к почти моментальной кристаллизации материала цилиндра. Достижимое при этом время кристаллизации в десятки раз превышало время кристаллизации традиционных германий-теллуридовых сплавов. С полученной скоростью записи, уже сопоставимой со скоростью динамической памяти, повсеместно используемой в современных компьютерах, новая PCM-память может стать основой вычислительных систем совсем недалекого будущего, ко-

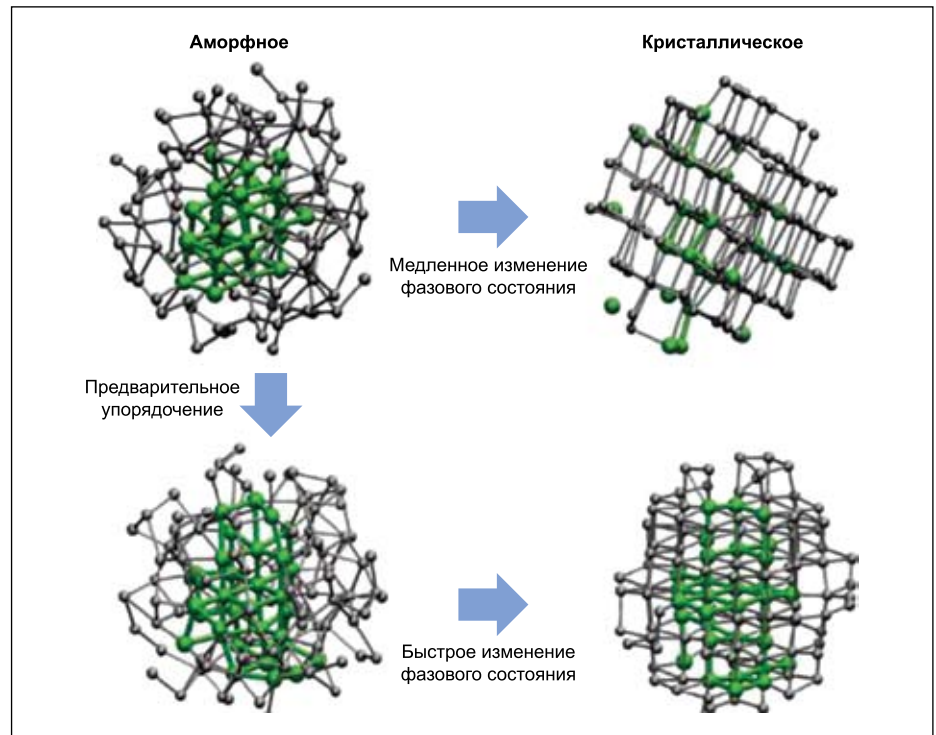


Рисунок. Перегруппировка атомов во время фазового перехода

торые будут готовы к работе моментально после включения питания.

Фирма Micron Technology, американский производитель чипов памяти, стала первой, кто объявил о запуске PCM-памяти в массовое производство. Micron начала выпуск ИС PCM только для мобильных устройств и на первом этапе производства предложила объединенные решения, включающие в себя 1 Гбайт 45-нм PCM-память и 512 Мбайт обычной DDR2-памяти в едином 1,8-В чипе. Компания утверждает, что готова изготовить два этих решения под заказ порознь. Объединенное решение, по идее, должно стать популярным среди производителей мобильных устройств, которые традиционно имеют склонность к интеграции как можно большего числа компонентов на одном чипе.

Важно отметить одну существенную особенность этого типа памяти: PCM-память использует тепло, генерируемое электрическими цепями, для изменения физического состояния материалов чипа. Так называемые фазовые переходы здесь служат логическими нулями или единицами. Кроме того, в отличие от флэш-памяти, PCM-ячейки стираются на уровне битов, а не целых блоков, поэтому здесь процесс записи может происходить быстрее, а средняя задержка отклика — примерно в 20 раз меньше, чем у флэш-памяти.

Следует повторить, что, как и NAND-память, используемая в современных SSD-накопителях, PCM относится к неволатильной (энергонезависимой) памяти, то есть она способна хранить информацию и после прекращения подачи на чип напряжения питания. Однако в отличие от современной NAND-памяти, PCM-чипы

не требуют предварительного стирания информации перед записью новых данных. Этот цикл, известный как цикл стирания-записи, обязателен для NAND. Он же является причиной снижения производительности и со временем более высокого износа памяти.

Ячейки памяти на основе фазового перехода PCM создаются путем соединения элемента хранения данных и переключающего элемента. Использовать PCM в качестве элемента хранения данных пытались давно, но ранее применяли сразу несколько типов переключающих элементов, что приводило к ограничениям массивов по размеру и эффективности. В фирме Micron утверждают, что их новый чип имеет суммарную производительность в 400 Мбит/с и поддерживает более 100 000 циклов записи.

В заключение этого краткого обзора отметим, что первые микросхемы являются гибридными: они располагают энергонезависимым PCM-модулем на 128 Мбайт и LPDDR2-модулем оперативной памяти на 64 Мбайт. Зафиксирована скорость случайного чтения данных в пределах 400 Мбайт/с, и это хороший показатель, учитывая, что речь идет о первом поколении PCM-памяти. Фирма заявила о готовности к массовому производству новинок, которые сейчас ориентированы на простые мобильники, а затем, когда появятся микросхемы более крупного объема, в линейку поддерживаемых устройств ИС будут включены смартфоны и планшеты. ■

Литература

1. <http://www.sciencemag.org/magazine>