

ЭКЗОТИЧЕСКАЯ ПАМЯТЬ

ГОНКИ ПРОДОЛЖАЮТСЯ

В поиске дешевых, маломощных, энерго-независимых схем памяти следующего поколения для портативных устройств (сотовых телефонов, мобильных ПК и т.п.) разработчики все чаще обращаются к новым необычным типам памяти, таким как полимерные СзОЗУ, ЗУ на основе обратимого фазового изменения состояния материала ячейки. А как насчет устройств памяти будущих "систем-на-чипе"? И здесь существуют свои новые, хорошо забытые старые решения. Эти технологии не исчерпаны до конца и обещают многое: уменьшение потребляемой мощности запоминающих устройств, увеличение их пропускной способности и объема хранимой информации, снижение стоимости. Но пока еще не ясно, когда они появятся на рынке, если вообще появятся, и как долго продержатся на нем.

ЗОЛОТАЯ ЧАША ПЕРСПЕКТИВНЫХ СХЕМ ПАМЯТИ

Серьезная проблема флэш-памяти — рост вероятности утечки заряда и, следовательно, потери данных по мере сокращения размеров ее элементов. Существующие способы снижения утечек заряда сложны и дороги. К тому же для их реализации требуется относительно высокое напряжение. Решить эту проблему при создании схем памяти для сотовых телефонов пытаются разработчики фирмы Agere Systems (ранее отделение микроэлектроники компании Lucent Technologies). На Международной конференции по электронным приборам (IEDM) 2000 года они доложили о разработке флэш-подобного энергонезависимого запоминающего устройства, в котором каждая ячейка памяти разбита на 20 тыс.—40 тыс. малых ячеек ("корзиночек"). Даже если несколько таких "корзиночек" протекут, большая часть заряда не потеряется, и данные, хранимые в ячейке, не будут потеряны. Плавающие затворы накопительных транзисторов состоят из нанокристаллов диаметром 5—10 нм, формируемых разработанным Калифорнийским университетом аэрозольным методом нанесения покрытия в высокотемпературной кислородной ванне. Основная трудность метода — достижение равномерного распределения нанокристаллов. Тем не менее, разработчики у-

М. Валентинова

верждают, что метод намного дешевле традиционной литографии и позволяет сократить продолжительность технологического процесса формирования устройств памяти. Более того, он позволит продвигаться в область все меньших размеров элементов. Созданные ячейки памяти отличаются чрезвычайно высокой "живучестью": испытания показали, что они выдерживают 10^6 циклов зарядки-разрядки без значительной деградации параметров. Эти результаты, конечно, очень обнадеживающие, но сейчас трудно предсказать, когда эта технология будет освоена в серийном производстве, если такие попытки вообще будут предприняты.

Обширные программы разработки достаточно дешевых энерго-независимых схем памяти большого объема для портативных устройств ведет сегодня фирма Intel. Помимо разработки магнитных ОЗУ (MRAM)¹ эти программы предусматривают создание "пластмассовых" ЗУ, или полимерной сегнетоэлектрической памяти (PFRAM), и так называемой унифицированной памяти фирмы Ovonic² (Ovonic Unified Memory — OUM), в которой, как и в современных CD-ROM с возможностью перезаписи, используются халькогениды.

Структуру полимерной PFRAM-памяти формируют два расположенные под прямым углом друг к другу слоя металлических полос, разделенные тонкой полимерной пленкой (рис.1). Ячейку памяти образует область под пересечением металлических полос. Для записи или считывания данных достаточно изменить поляризацию полимерной пленки, т.е. для хранения данных транзисторы не нужны. Схема памяти изготавливается на кремниевой подложке с КМОП-устройствами управления. На такой подложке с помощью простой операции центрифугирования может быть сформировано до восьми слоев полимерной памяти, т.е. затраты на изготовление PFRAM чрезвычайно низкие: по утверждению разработчиков, они составляют около 1/8 затрат на производство КМОП-памяти. Важное достоинство полимерного ЗУ — низкая потребляемая мощность: в режиме ожидания энергия не потребляется, не нужно обновлять данные. Правда, по времени записи данных (50 мкс) PFRAM уступает флэш-памяти NAND-типа. Тем не менее, для большинства бытовых устройств, требующих памяти большого объема, особенно на сменных платах, это достаточно перспективный тип ЗУ.

Intel совместно со шведской компанией Thin Film Electronics (инвестируемой Intel) уже приступила к изготовлению тестовых

¹ ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2001 №5, с. 24.

² Ovonic — венчурное предприятие, образованное бывшим главным техническим руководителем компании Micron Technology и фирмой Energy Conversion Devices, возглавляемой С.Овшинским, впервые предложившим память на основе материала с фазовым изменением состояния.

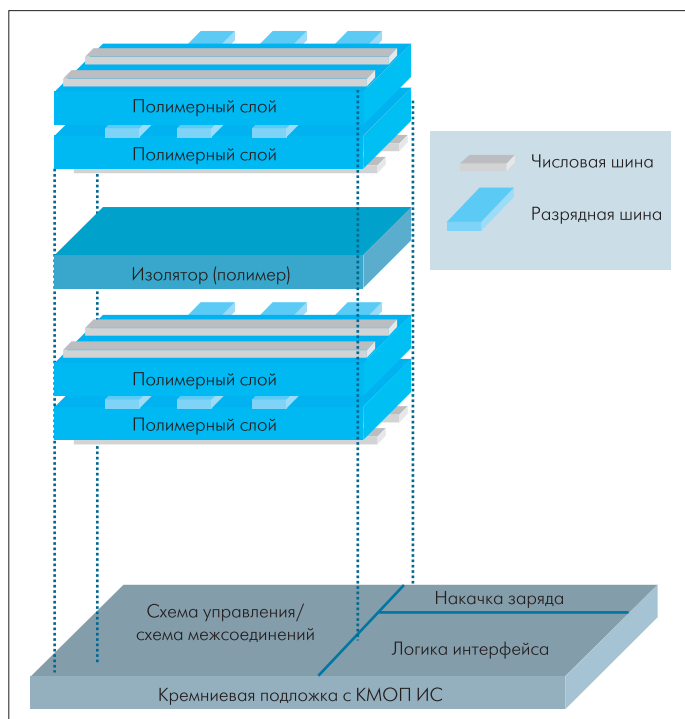


Рис. 1. Структура полимерной памяти

PFRAM-структур. Но пока о сроках появления коммерческих образцов памяти этого типа речи не ведется.

Программа создания второго типа памяти – OUM – проводится Intel совместно с фирмой Ovonic, владеющей основными патентами на эту технологию. Разработка OUM, как и многих других современных "новых" типов памяти, ведется не одно десятилетие: первое сообщение о возможности создания памяти на базе аморфных пленок и пленок кристаллического кремния появилось в сентябре 1970 года (и одним из авторов статьи, опубликованной в журнале Electronics, был Гордон Мур). Но потребовались годы для отработки процессов получения высококачественных тонких пленок кремния и халькогенидов. При воздействии лазерного излучения (как в CD-ROM или DVD) или электрического тока (как в памяти типа OUM) на аморфный халькогенид атомы его занимают более упорядоченное положение, и фазовое состояние халькогенида изменяется (рис.2). При этом проводимость материала может изменяться в три раза. Это явление и лежит в основе элемента памяти. Данные считываются как и в MRAM, путем измерения сопротивления ячейки памяти.

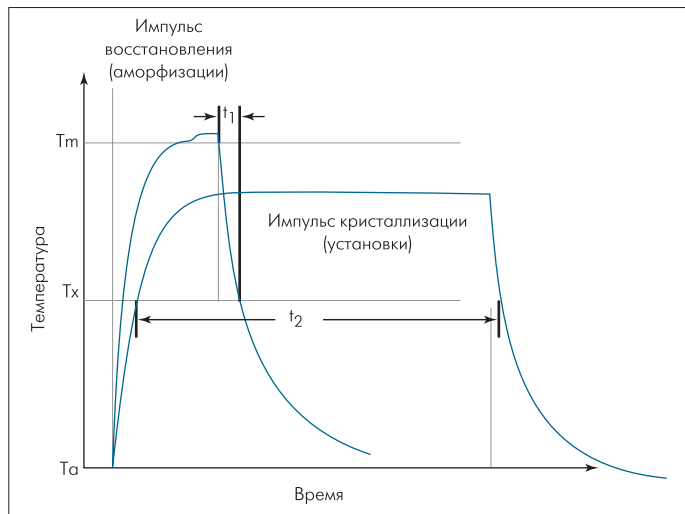


Рис.2. Временная зависимость электрической энергии (нагрева)

На сегодняшний день фирмой Intel по 0,18-мкм технологии создан тестовый 4-Мбит OUM-чип, продемонстрировавший возможность формирования базовой ячейки памяти (рис.3) малых размеров. Значения времени записи и считывания ячейки не превышают 100 нс, "износоустойчивость" достигает $\sim 10^{12}$ циклов записи/стирания. Таким образом, память OUM-типа превосходит флэш по быстродействию, будучи таким же энергонезависимым ЗУ. Быстродействие этого типа памяти достаточно высокое, что позволяет хранить данные и большинство современных кодов. Применение OUM приведет к значительному сокращению емкости СОЗУ/ДОЗУ, используемых в портативном оборудовании. И еще одно достоинство OUM – это достаточно дешевое устройство, процесс изготовления которого можно легко объединить с технологией стандартных логических схем. Специалисты Ovonic считают также возможным в будущем задавать промежуточные значения сопротивления халькогенидного слоя, что позволит создать многоразрядную ячейку памяти. Таким образом, OUM – весьма перспективная технология для создания схем памяти дешевых портативных устройств. И не только.

Интерес к разработкам фирмы Ovonic проявила Исследовательская лаборатория ВВС США (AFRL)*, заключившая контракт с компаниями Lockheed Martin Space Electronics & Communications и Ovonic. В ходе выполнения контракта компания Lockheed надеется создать новое поколение радиационно стойких быстродействующих энергонезависимых ЗУ, способных работать в неблаго-

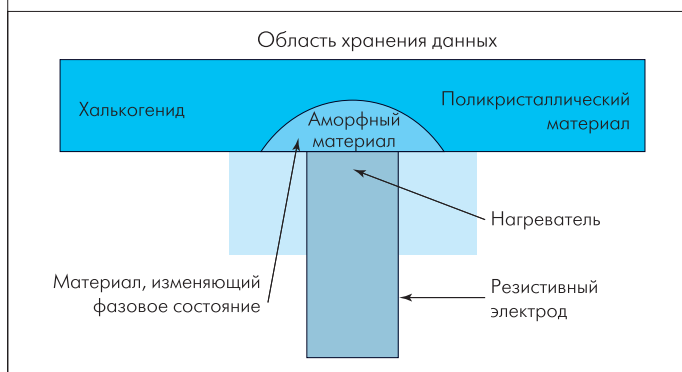


Рис.3. Структура памяти OUM-типа

приятных космических условиях. Первым изделием должна стать 16-Мбит память с кодовым именем C-RAM (возможно, Chalcogenide RAM).

В конце 2000 года договор о приобретении лицензии на технологию формирования тонкопленочной энергонезависимой памяти заключил с фирмой Ovonic и крупнейший мировой производитель энергонезависимых ЗУ – компания STMicroelectronics. Тем не менее, по мнению разработчиков Intel, для окончательной отработки OUM-технологии и создания пригодных для внедрения в производство устройств требуется большой объем исследований. И первые коммерческие образцы появятся не раньше, чем в конце 2003 года.

КАК СКАЗКУ СДЕЛАТЬ БЫЛЬЮ?

Применительно к микронным устройствам ответ таков – непрерывно уменьшать размеры элементов, по крайней мере до нескольких десятков нанометров. А как этого добиться уже сегодня, когда минимальные топологические размеры ИС почти на порядок

*AFRL – крупнейшая лаборатория Министерства обороны США. Ведет разработку новейших технологий военных космических систем, пусковых установок и перспективных космических концепций.

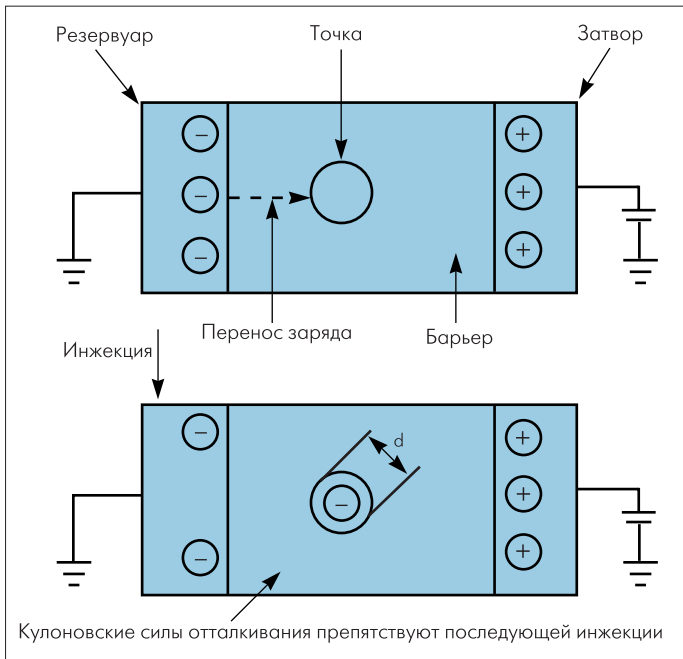


Рис.4. Воздействие кулоновских сил на электрон в ловушке

больше? Что если исключить из ячейки конденсатор или его заменить и обойтись только транзистором и при этом попытаться найти способ управления единичными электронами в канале. Эта идея и легла в основу разработки учеными Кембриджской лаборатории фирмы Hitachi (Hitachi Cambridge Laboratory – HCL) и Центра исследований в области микроэлектроники (MRC) Кавендишской лаборатории Кембриджского университета (Великобритания) так называемой одноэлектронной (или "малозлектронной") памяти – запоминающего устройства, в котором для хранения единицы информации достаточно одного или нескольких электронов. Первые устройства этого типа, работавшие при температуре, близкой к абсолютному нулю, были созданы еще 10 лет назад, чему в значительной степени способствовали работы русского ученого К.К. Лихарева. Первое одноэлектронное запоминающее устройство, способное функционировать при комнатной температуре, появилось в 1993 году в рамках совместной программы HCL и MRC. А на Международной конференции по твердотельным схемам (ISSCC) 1997 года разработчики доложили о создании "малозлектронной" памяти емкостью 128 Мбит, изготовленной по 0,25-мкм КМОП-технологии.

При разработке одноэлектронной памяти были использованы методы формирования поликремниевых транзисторов, а также так называемое явление "произвольного телеграфного шума" (Random Telegraph Noise – RTN). Суть его в том, что при измерении тока стока МОП-транзистора в течение определенного периода при постоянном напряжении на затворе проводимость канала может произвольно изменяться от высокой к низкой. Причина этого – захват или высвобождение единичного электрона ловушкой, находящейся между затвором транзистора и резервуаром (истоком). При захвате дальнейшее перемещение электрона блокируется, поскольку результирующие силы кулоновского взаимодействия больше, чем производящие или тепловые силы (рис.4). Правда, до сих пор RTN изучался лишь в связи с решением проблемы уменьшения токового шума МОП-устройств, и попыток применения его для создания каких-либо полупроводниковых приборов не предпринималось.

Предложенная специалистами Hitachi ячейка "малозлектронной" памяти может быть выполнена на базе поликремниевого пленочного полевого транзистора. Области истока и стока его формируются

в сильнолегированной пленке поликремния *n*-типа. Материал канала – нелегированный поликремний толщиной до 10 нм (предпочтительно 3,4 нм), получаемый осаждением аморфного кремния с последующей термообработкой при температуре 750°C. Толщина пленки канала ограничивает размеры формируемых при термообработке кристаллитов кремния, при этом скорость роста кристаллитов в плоскости поверхности пленки замедляется. В результате их размеры в обоих направлениях примерно одинаковы и малы. Ширина канала равна 0,1 мкм. Электрод затвора толщиной 0,1 мкм расположен так, чтобы пересекать область канала (рис.5). В такой структуре границы зерен или их групп, энергетические уровни на границе раздела Si-SiO₂, уровни в оксидной пленке могут образовывать уровни захвата (ловушки) носителей.

Чтобы захват единичного носителя заряда (электрона или дырки) ловушкой можно было обнаружить по изменению тока канала полевого транзистора, емкость между затвором и каналом транзистора должна быть мала и удовлетворять условию $1/C_{зк} > kT/q^2$, где $C_{зк}$ – эффективная емкость между электродом затвора и эффективной областью канала, k – постоянная Больцмана, T – рабочая температура и q – заряд электрона. Для уменьшения емкости между электродом затвора и эффективной областью канала $C_{зк}$ образующая канал пленка поликремния полностью окружена оксидом кремния. Этому же способствуют и малые размеры кристаллитов. В предложенной структуре МОП-транзистора ток канала обусловлен переносом электронов от одного кристаллита к другому, а поскольку размеры их ограничены, ширина токопроводящей дорожки

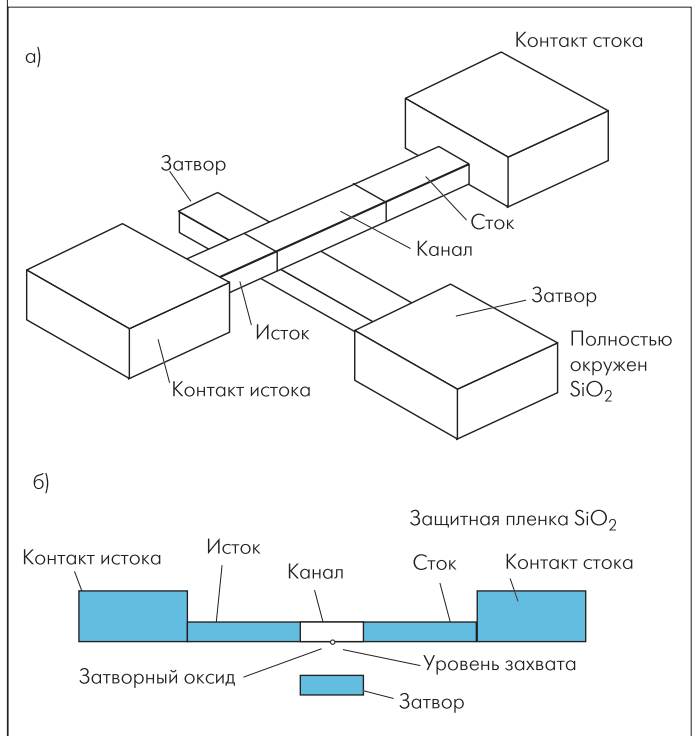


Рис.5. Структура поликремниевого транзистора одноэлектронной ячейки памяти: а) общий вид и б) вид в разрезе

в сравнении с областью канала мала. И, как следствие, чрезвычайно мала емкость между электродом затвора и эффективной областью канала – разработчикам Hitachi удалось получить значение емкости $C_{зк}$ равное 0,02 аФ ($2 \cdot 10^{-20}$ Ф). Благодаря столь малой емкости в кривой зависимости тока стока от напряжения на затворе при постоянном напряжении сток-исток возникает гистерезис, экспериментально обнаруженный разработчиками. Это позволило уста-

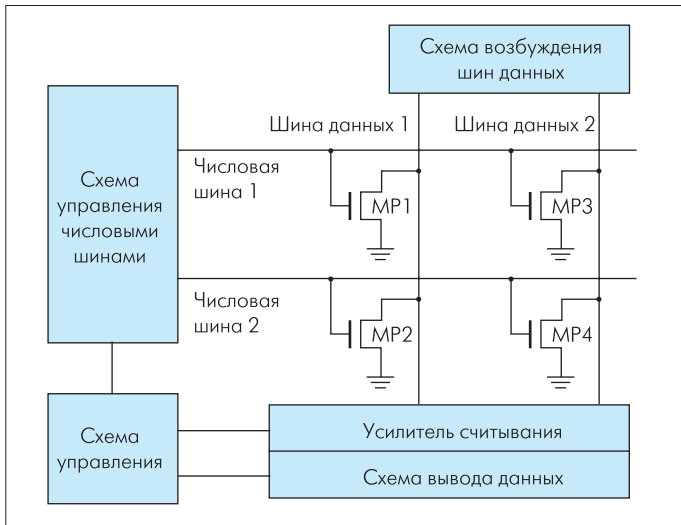


Рис.6. Блок-схема одноэлектронной памяти

новить соответствие между значениями порогового напряжения транзистора и присутствием в канале захваченного или высвобожденного электрона(ов) при комнатной температуре.

В предложенной одноэлектронной памяти затворы четырех полукремниевых транзисторов присоединены к числовой шине, области истока – к шине данных и области стока – заземлены (рис.6). При записи логической "1", например в транзистор MP1, напряжение его числовой шины устанавливается равным половине напряжения полного размаха гистерезисной кривой ($V_{w/2}$), а шины данных равными $-V_{w/2}$. При этом напряжение на остальных числовых шинах и шинах данных равно нулю. В результате напряжение затвор-сток MP1 равно V_w , т.е. высокому пороговому напряжению и, следовательно, записи "1". При записи логического "0" полярности подаваемого на шины напряжения противоположны. При считывании данных, скажем MP1, потенциал числовой шины 1 устанавливается равным нулю. Это значит, что при хранении "1" транзистор MP1 будет отключен и при этом уровень напряжения шины данных останется высоким. При хранении "0" ток шины данных 1 через MP1 проходит в заземленную шину, приводя к снижению потенциала этой шины данных. Это падение напряжения поступает в усилитель считывания. Периферийные схемы памяти выполнены по стандартной МОП-технологии, а на осажденном поверх них диэлектрическом слое сформированы полукремниевые транзисторы одноэлектронной памяти. Помимо достижения высокой плотности упаковки, к достоинствам такой схемы относятся статический характер опера-

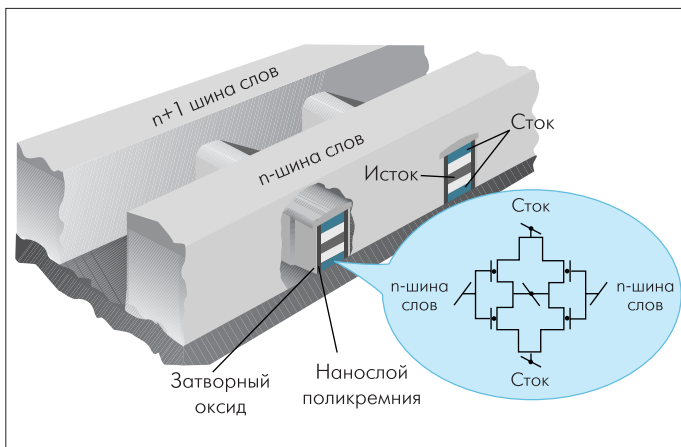


Рис.7. Структура ячейки 128-Мбит одноэлектронной памяти

ции считывания, высокое отношение сигнал/шум, длительный период хранения данных без их обновления, малая потребляемая мощность и низкая стоимость в пересчете на бит хранимой информации.

Развитие этой технологии привело к созданию 128-Мбит малоэлектронной памяти, в которой ловушками электронов выступают границы 10-нм зерен поликремния (рис.7). В ячейку памяти такой вертикальной структуры могут быть записаны 2 бита данных, причем для хранения одного требуется приблизительно пять захваченных электронов. Пять – не один электрон, но и не десятки тысяч электронов, необходимых для хранения данных в современных запоминающих устройствах. Разработчики надеются решить проблемы освоения массового производства одноэлектронной памяти к 2005 году. Правда, прежде им придется решить, по какому пути им идти – увеличения быстродействия, увеличения емкости или снижения стоимости памяти.

Сотрудничество ученых HCL и MRC привело к появлению в 1999 году еще одного перспективного типа одноэлектронной памяти – так называемой памяти фазового состояния, управляемой малым числом электронов (дырок) (Phase-state-Low-Electron (hole)-number Drive Memory – PLEDM). В основу его легла идея формирования в кремниевой пленке тонкого изолирующего слоя и использования его для управления током транзистора. В PLEDM-ячейке поверх затвора стандартного МОП-транзистора формируется небольшой транзистор с высоким усилением. Структуру PLEDM-транзистора (транзистора записи) формируют три чрезвычайно тонких (несколько нанометров) изолирующих слоя, образующих туннелируемый барьер (рис.8). Высота барьера, блокирующего ток основного транзистора, регулируется напряжением на затворе меньшего, верхнего транзистора. Таким образом, для хранения информации вместо транзистора и конденсатора используются два тран-

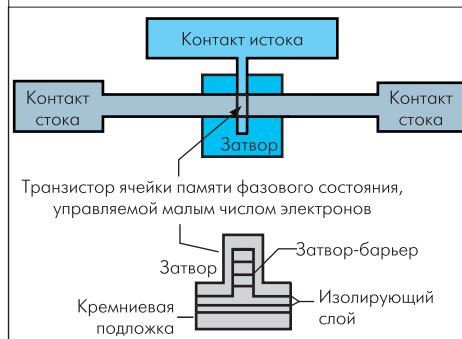


Рис.8. Блок-схема транзистора PLEDM-ячейки

зистора, и поскольку один из них изготовлен поверх другого, площадь ячейки равна площади, занимаемой одним элементом. Благодаря применению второго усилительного элемента в ячейке число электронов, необходимых для записи разряда, сокращается на два порядка, а поскольку электроны прочно удерживаются структурой транзистора записи, период между циклами обновления данных увеличивается. В результате потребляемая мощность существенно сокращается.

В лаборатории уже создана опытная PLEDM-ячейка, изготовленная по стандартной 0,25-мкм КМОП-технологии. Изолирующие слои барьера сформированы путем термического азотирования кремния, что позволило получить слои с точно контролируемой толщиной около 2 нм. Размер транзистора записи 0,2x0,4 мкм. Благодаря малому значению тока во включенном состоянии (1 мкА) время считывания/записи не превышает 10 нс. Ток в выключенном состоянии измерить не удалось, поскольку он меньше предельного значения измерительных устройств (1 фА). А это значит, что период между операциями обновления данных может быть достаточно большим – более 0,1 с. Ячейка отличается и чрезвычайно малым разбросом значений порогового напряжения – менее 0,1 В. И хотя

для изготовления нового типа памяти не требуются каких-либо новых материалов или новейшего суперсложного оборудования, а число операций в сравнении со стандартной технологией изготовления ДОЗУ может быть сокращено на 10% (поскольку не нужно формировать конденсатор), путь от создания единичной опытной ячейки до освоения производства многобитовой памяти длителен, тернист и рискован. И Hitachi обещает выпустить память нового типа не раньше, чем через пять лет. Но возможности ее применения, по мнению разработчиков, не ограничены: ведь один PLEDM-чип может хранить все изображение и звуковые треки полноформатного кинофильма. А малая потребляемая мощность делает его весьма перспективным для мобильных телефонов и ПК. В конечном итоге Hitachi надеется создать PLEDM-память, способную заменить накопители на магнитных дисках.

MONEY, MONEY, MONEY

Низкая себестоимость не перестает быть основным требованием, предъявляемым к системам памяти. И это объясняет интерес, проявляемый сегодня к такому "ретроустройству", как трехмерное ПЗУ (3D-ROM). В идеале разработчик ИС хотел бы иметь энергонезависимую память неограниченного объема и с неограниченными возможностями программирования. В принципе этим требованиям удовлетворяет флэш-память. Зачем же тогда создавать другие по-

стоянные ЗУ, да еще с ограниченными возможностями программирования? Обратимся к системе памяти обычного компьютера. В нее входят и СОЗУ, и ДОЗУ, и накопитель на магнитных дисках, тогда как, казалось бы, достаточно использовать один тип памяти – СОЗУ. Объяснение этому простое – себестоимость системы. Тщательно устанавливая соответствие между объемом памяти и ее стоимостью, разработчик добивается оптимального соотношения *стоимость-производительность* компьютера. То же относится и к энергонезависимой постоянной памяти. И здесь для достижения оптимального соотношения *стоимость-производительность* приходится обращаться к более дешевым типам памяти, несколько поступаясь их свойствами, в том числе быстродействием и возможностью программирования. А если разница в цене 40-кратная (см. табл.)? Вот тогда заинтересованный взор разработчика обращается к такому "ретроПЗУ", как 3D-ROM. В сочетании с флэш 3D-ROM образует ядро энергонезависимой памяти системы и выполняет задачу хранения большого объема программного обеспечения, тем самым ослабляя требования, предъявляемые к объему гибкой и программируемой флэш-памяти.

В базовой структуре 3D-ROM, которую ее создатель Джубою Жэнг (основатель фирмы 3D-ROM) рассматривает как основную структуру будущих ИС, многочисленные уровни постоянной памяти, разделенные диэлектриком, могут размещаться друг над другом и поверх любого обычного чипа – микропроцессора, флэш-памяти, ЭСРПЗУ (рис.9а). Каждый уровень памяти состоит из двух активных слоев с набором числовых и, соответственно, разрядных шин, отделенных друг от друга изолирующим слоем. Область пересечения разрядных и числовых шин образует ячейку памяти.

3D-ROM допускает масочное или электрическое программирование. В последнем случае между числовой шиной и ее контактами с ячейками формируется высокоомный "барьерный" (antifuse) слой (достаточно толстая пленка аморфного кремния собственной проводимости или оксид металла), препятствующий прохождению тока в ячейке (рис.9б) при подаче напряжения на шины. Программирующий импульс вызывает электрический пробой барьерного слоя, что приводит к формированию токопроводящих соединительных каналов между контактом и разрядной шиной. При этом между числовыми и разрядными шинами ячейки оказывается включенным *p-n*-диод. Наличие промежуточного слоя обеспечивает однократное программирование 3D-ROM. Для формирования слоев, допускающих многократное программирование, изучается возможность применения халькогенидного стекла и других материалов. При подаче напряжения считывания на шины в разрядной шине ячейки с диодом протекает ток считывания, если диод отсутствует, – в разрядной шине тока нет. Таким образом, наличие в ячейке включенного между шинами диода соответствует записи логической "1", отсутствие – записи логического "0" (рис.9в). Диоды также служат для минимизации перекрестных наводок разрядных шин.

Выполняются диоды на аморфном кремнии. Возможно применение и других полупроводниковых материалов, например карбида кремния. Технология изготовления полупроводниковых структур на этом материале хорошо отработана в ходе создания тонкопленочных полевых транзисторов для схем управления плоскостельными ЖК-индикаторами. Достоинство ее – возможность осаждения и легирования α -Si при температурах ниже 300°C, т.е. формирование трехмерной структуры не влияет на ИС на подложке. Для создания одного уровня памяти необходимо нанести двухслойную металлизацию и сформировать *p-n*-диод, что требует всего около пяти операций маскирования (против 20-30 таких операций, необходимых для изготовления флэш или ЭСРПЗУ). При 0,18-мкм технологии

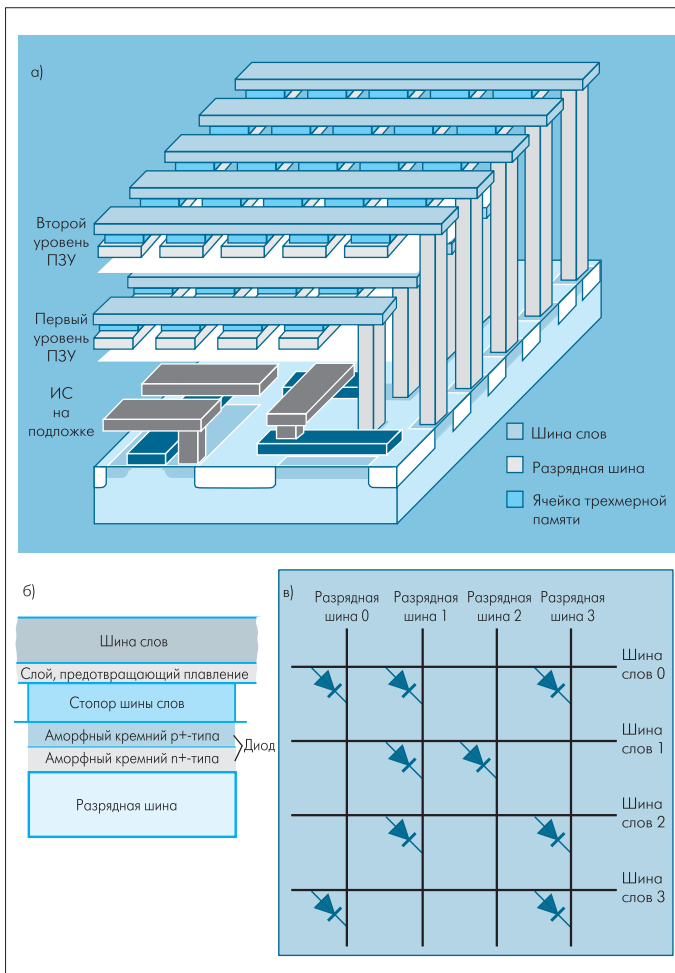


Рис.9. Трехмерная память: а) наличие тонкопленочного диода соответствует записи логической "1", отсутствие диода – логического "0"; б) применение дополнительного препятствующего расплавлению слоя обеспечивает однократное программирование; в) параллельный доступ в сочетании с трехмерной структурой позволяет исключить проблему низкой скорости произвольного считывания



площадь ячейки 3D-ROM будет равна 0,21 мкм² и плотность записи данных может достигать 60 Мбит/см²/уровень. Поскольку трехмерное ПЗУ изготавливается поверх чипа, дополнительная стоимость корпуса минимальна.

Согласно данным Национальной программы развития полупроводниковой технологии США (National Technology Roadmap), в ИС с топологическими нормами 0,18-мкм возможно формирование шести-семи слоев металлизации. В современных устройствах памяти требуются три уровня металлизации. Это значит, что к ним можно добавить два уровня 3D-ROM. В логических ИС уровней металлизации больше, но и к ним можно добавить по крайней мере один уровень трехмерного ПЗУ. Все это делает 3D-ROM весьма перспективным типом памяти для будущих "систем-на-чипе".

Здесь следует "разоблачить" еще оно заблуждение относительно недостатков 3D-ROM – низкое быстродействие. Большинство разработчиков привыкло к тому, что время ожидания полупроводниковой памяти составляет несколько десятков наносекунд, благодаря чему между процессором и системой хранения данных не возникает конфликтов. Поскольку время ожидания 3D-ROM достигает нескольких микросекунд, можно прийти к выводу, что такое ЗУ не пригодно для работы в быстродействующих системах. Так ли это? Вновь обратимся к системе компьютерной памяти. Время ожидания накопителя на магнитных дисках равно ~10 мс. Вопросы о том, как такой накопитель работает в системах с высокой пропускной способностью и возможно ли применять ту же технику для 3D-ROM, оставим решать заинтересованному читателю. К тому же, благодаря возможности реализации массивной параллельной передачи данных пропускная способность ПЗУ превышает 0,5 Гбайт/с. Поскольку выборка данных из 3D-ROM занимает 100-3000 тактовых циклов (против 700 тыс.–6 млн. для НЖМД), интенсивность неудачного поиска системы памяти мо-

Сравнительная характеристика устройств "Криптон"

Тип памяти	Стоимость, долл./Мбит	Площадь ячейки, f2	Объем, Мбит	Время ожидания, нс	Пропускная способность*, Гбайт/с
3D-ROM	0,05	4	120	0,5-5 мкс	>0,5
СОЗУ	~10	~100	1	3-10	~5
ДОЗУ	~1	8	32	~50	~0,5
Флэш	~2	10	16	~50	~0,5
Масочное ПЗУ	<1	8	32	~50	~0,5

* Для встроенной памяти

жет составлять 0,1–1,0%. А это позволяет существенно сократить требуемый объем памяти ДОЗУ или обойтись кэшем второго уровня.

По утверждению разработчика, 3D-ROM особо перспективны для хранения объектно-ориентированного программного обеспечения, такого как Java, библиотеки программ которого требуют большого объема памяти. Новые компактные, обновляемые программы Java в этом случае могут храниться во флэш-памяти. Объединение этих двух типов ЗУ на одном чипе позволит обновлять программное обеспечение и тем самым продлить жизненный цикл чипа.

EDN, 2001, Apr.26.

www.cnet.com/news/0-1006-200-6549716.html

www.ovonyx.com/feb8_2000.html

www.ovonyx.com/dec21_2000.html

www.ovonyx.com/afri.html

www.lucent.com/press/1200/001213.mea.html

www.hitachi-eu.com/r&d/rd_pro1.htm

www.hitachi-eu.com/newsroom/european/990517.html

sites.netscape.net/zangpatents/3D-ROM/3D-ROM.htm