**Флеш-память** — разновидность полупроводниковой технологии электрически перепрограммируемой памяти. Благодаря компактности, дешевизне, механической прочности, большому объёму, скорости работы и низкому энергопотреблению, флеш-память широко используется в цифровых портативных устройствах и носителях информации. Серьёзным недостатком данной технологии является ограниченный срок эксплуатации носителей, а также чувствительность к электростатическому разряду.

Основным компонентом в флеш памяти является транзистор с плавающим затвором, который является разновидностью МОП-транзисторов. Его отличие в том, что у него есть дополнительный затвор (плавающий), расположенный между управляющим затвором и p-слоем. Плавающий затвор изолирован и хранимый в нём отрицательный заряд будет оставаться надолго.

Транзистор с плавающим затвором представляет из себя транзистор с двумя изолированными затворами: управляющим (control) и плавающим (floating). Важной особенностью последнего является способность удерживать электроны, то есть заряд. Также в транзисторе имеются так называемые «сток» и «исток». При программировании между ними, вследствие воздействия положительного поля на управляющем затворе, создается канал — поток электронов. Некоторые из электронов, благодаря наличию большей энергии, преодолевают слой изолятора и попадают на плавающий затвор. На нем они могут храниться в течение нескольких лет. Определенный диапазон количества электронов (заряда) на плавающем затворе соответствует логической единице, а все, что больше его, — нулю. При чтении эти состояния распознаются путем измерения порогового напряжения транзистора. Для стирания информации на управляющий затвор подается высокое отрицательное напряжение, и электроны с плавающего затвора переходят (туннелируют) на исток. В технологиях различных производителей этот принцип работы может отличаться по способу подачи тока и чтению данных из ячейки

MLC и SLC

Различают приборы, в которых элементарная ячейка хранит один бит информации и несколько бит. В однобитовых ячейках различают только два уровня заряда на плавающем затворе. Такие ячейки называют одноуровневыми (*single-level cell, SLC*). В многобитовых ячейках различают больше уровней заряда; их называют многоуровневыми (*multi-level cell, MLC*). MLC-приборы дешевле и более ёмки, чем SLC-приборы, однако имеют более высокое время доступа и примерно на порядок меньшее максимальное количество перезаписей.

Обычно под MLC понимают память с 4 уровнями заряда (2 бита) на каждую ячейку. Более дешёвую в пересчёте на объём память с 8 уровнями (3 бита) чаще называют TLC (*Triple Level Cell*) или *3bit MLC* (MLC-3). Существуют экспериментальные устройства с 16 уровнями на ячейку (4 бита), 16LC или QLC, однако с уменьшением техпроцесса их массовое производство маловероятно из-за чрезвычайно низкой надёжности хранения.

К 2017 году многоуровневая память доминирует на рынке. Тем не менее SLC изделия, несмотря на многократно меньшую ёмкость, продолжают разрабатываться и выпускаться для особо ответственных применений.

Естественным развитием идеи MLC-ячеек была мысль записать в ячейку аналоговый сигнал. Наибольшее применение такие аналоговые флеш-микросхемы получили в воспроизведении относительно коротких звуковых фрагментов в дешёвых тиражируемых изделиях. Такие микросхемы могут применяться в простейших игрушках, звуковых открытках и т. д.

NOR и NAND

Флеш память различается методом соединения ячеек в массив.

Конструкция NOR использует классическую двумерную матрицу проводников, в которой на пересечении строк и столбцов установлено по одной ячейке. При этом проводник строк подключался к стоку транзистора, а столбцов — ко второму затвору. Исток подключался к общей для всех подложке.

Для чтения определённой ячейки памяти необходимо подать на её управляющий затвор промежуточный ток (достаточный для проводимости транзистора только при отсутствии заряда в плавающем затворе). На остальные ячейки в линии следует подать минимальный ток для исключения проводимости этих ячеек. Если в интересующей нас ячейке отсутствует заряд, то возникнет ток между разрядной линией (*bit line*) и землёй.

Запись: На первой стадии очистка ячеек происходит с помощью туннельного эффекта: на все управляющие затворы подаётся сильное напряжение. Для установки конкретной ячейки в 0 используется инжекция горячих носителей. На разрядную линию подаётся большое напряжение. Вторым важным условием этого эффекта является наличие положительных зарядов на управляющем затворе. Положительное напряжение подаётся лишь на некоторые транзисторы, на остальные транзисторы подаётся отрицательное напряжение. Таким образом ноль записывается только в интересующие нас ячейки.

Применение NOR-флеши, устройства энергонезависимой памяти относительно небольшого объёма, требующие быстрого доступа по случайным адресам и с гарантией отсутствия сбойных элементов:

* Встраиваемая память программ однокристальных микроконтроллеров. Типовые объёмы — от 1 кбайта до 1 Мбайта.
* Стандартные микросхемы ПЗУ произвольного доступа для работы вместе с микропроцессором.
* Специализированные микросхемы начальной загрузки компьютеров (BIOS). Типовые объёмы — единицы и десятки мегабайт.

Максимальное значение объёмов микросхем NOR — до 256 Мбайт.

NAND

Данный тип памяти был разработан компанией Toshiba. Эти микросхемы благодаря своей архитектуре применяют в маленьких накопителях , которые получили имя NAND (логическая операция И-НЕ). При выполнении операция NAND дает значение нуль только, когда все операнды равны нулю, и единичное значение во всех других случаях. нулевое значение это открытое состояние транзистора. В следствии этого в архитектуре NAND подразумевается, что битовая линия имеет нулевое значение в том случае, когда все подключенные к ней транзисторы открыты, и значение один, когда хотя бы один из транзисторов закрыт. Такую архитектуру можно построить, если подсоединить транзисторы с битовой линией не по одному (так построено в архитектуре NOR) , а последовательными сериями (столбец из последовательно включенных ячеек).

Чтение в NAND осуществляется следующим образом: в данной компоновке также подаётся промежуточный ток на управляющий затвор определённой ячейки. На остальные управляющие затворы в линии подаётся повышенное напряжение, чтобы они гарантировано проводили ток. Таким образом, возникнет ток между землёй и линией, если в интересующей нас ячейке отсутствует заряд.

Запись: Первая стадия в NAND аналогична NOR. Для установки нуля в ячейку используется туннельный эффект, в отличие от NOR. На интересующие нас управляющие затворы подаётся большое отрицательное напряжение.

Там, где требуются рекордные объёмы памяти — NAND-флеш вне конкуренции. Чипы NAND показывали постоянное повышение объёмов, и на 2012 год NAND имел рекордные объёмы на 8-кристальную микросборку в 128 Гбайт (то есть объём каждого кристалла 16 Гбайт или 128 Гбит.

Применение: В первую очередь NAND флеш-память применяется во всевозможных мобильных носителях данных и устройствах, требующих для работы больших объёмов хранения. В основном, это USB-брелки и карты памяти всех типов, а также мобильные устройства, такие, как телефоны, фотоаппараты, медиаплееры.

NAND чаще всего применяется для USB флеш накопителей, карт памяти, SSD, NOR в свою очередь во встраиваемых системах.

Как и кластеры жесткого диска так и ячейки NAND группируются в небольшие блоки. По этой причине при последовательном чтении или записи преимущество в скорости будет у NAND. Но с другой стороны NAND сильно проигрывает в операции с произвольным доступом и не имеет возможности работать на прямую с байтами информации. В ситуации когда нужно изменить всего несколько бит, система вынуждена переписывать весь блок, а это если учитывать ограниченное число циклов записи, ведет к большому износу ячеек памяти.

Существовали и другие варианты объединения ячеек в массив, но они не прижились.

Контроллер флэш-памяти необходим для согласования выходного интерфейса микросхемы памяти с внешней шиной.

Каждая страница в банке флэш-памяти содержит рабочую область и служебную часть, предназначенную для записи контрольных кодов и резервирования рабочих ячеек памяти.

Кроме функций, свойственных любому контроллеру, контроллер пытается устранить самый главный недостаток флэш-памяти – ограничение на количество операций P/E (программирования/стирания).

Обнаружение и коррекция случайных ошибок (ECC/EDC) на основе дополнительных разрядов служит для устранения случайных сбоев.

Управление дефектными блоками (bad block management) используется для устранения ошибок, которые сохраняются после стирания блока памяти (в отличие от случайных ошибок записи/чтения, которые пропадают после стирания ячейки).

Снижение усиления записи (Write amplification) – устранение нежелательного феномена, вызванного тем, что запись и стирание производятся блоками, поэтому для каждого незаполненного до конца блока выполняются «лишние» операции записи/стирания, дополнительно сокращающие срок службы

Стремление достичь предельных значений ёмкости для NAND-устройств привело к «стандартизации брака» — праву выпускать и продавать микросхемы с некоторым процентом бракованных ячеек и без гарантии непоявления новых «bad-блоков» в процессе эксплуатации. Чтобы минимизировать потери данных, каждая страница памяти снабжается небольшим дополнительным блоком, в котором записывается контрольная сумма, информация для восстановления при одиночных битовых ошибках, информация о сбойных элементах на этой странице и количестве записей на эту страницу. Это функции контроля бэд-секторов, коррекции ошибок (ECC — error check and correct), равномерности износа ячеек (wear leveling). Если появляется плохой сектор, функция контроля подменяет его адрес в таблице размещения файлов адресом сектора из резервной области.

Интерфейсы работы с флэш памятью:

* Внешние (для связи контроллера и ЭВМ):
  + USB (Universal Serial Bus – универсальная последовательная шина);
  + FireWare – последовательная высокоскоростная шина;
  + SCSI (Small Computer System Interface) – набор стандартов для физического подключения компьютеров и периферийных устройств (параллельные интерфейсы подключения);
  + IDE (Integrated Drive Electronics) – параллельный интерфейс подключения накопителей (например жестких дисков) к компьютеру;
* Внутренние (для связи контроллера и микросхемы памяти):
  + NAND Flash;
  + NOR Flash.