

**Энергонезависимая
память на
полупроводниковых
структурах**

Флэш-память - особый вид *энергонезависимой перезаписываемой полупроводниковой памяти*.

Энергонезависимая - не требующая дополнительной энергии для хранения данных (энергия требуется только для записи).

Перезаписываемая - допускающая изменение (перезапись) хранимых в ней данных.

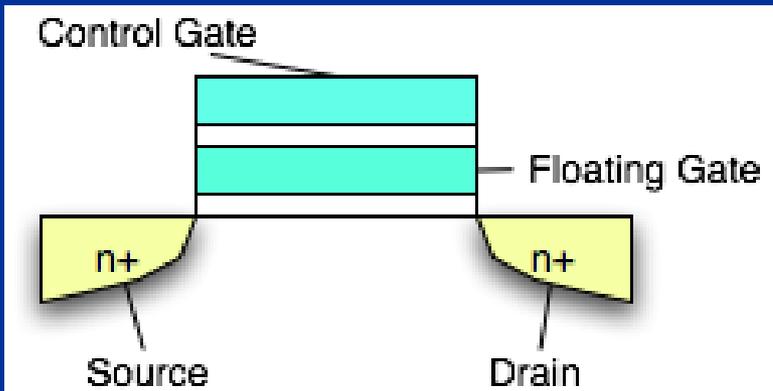
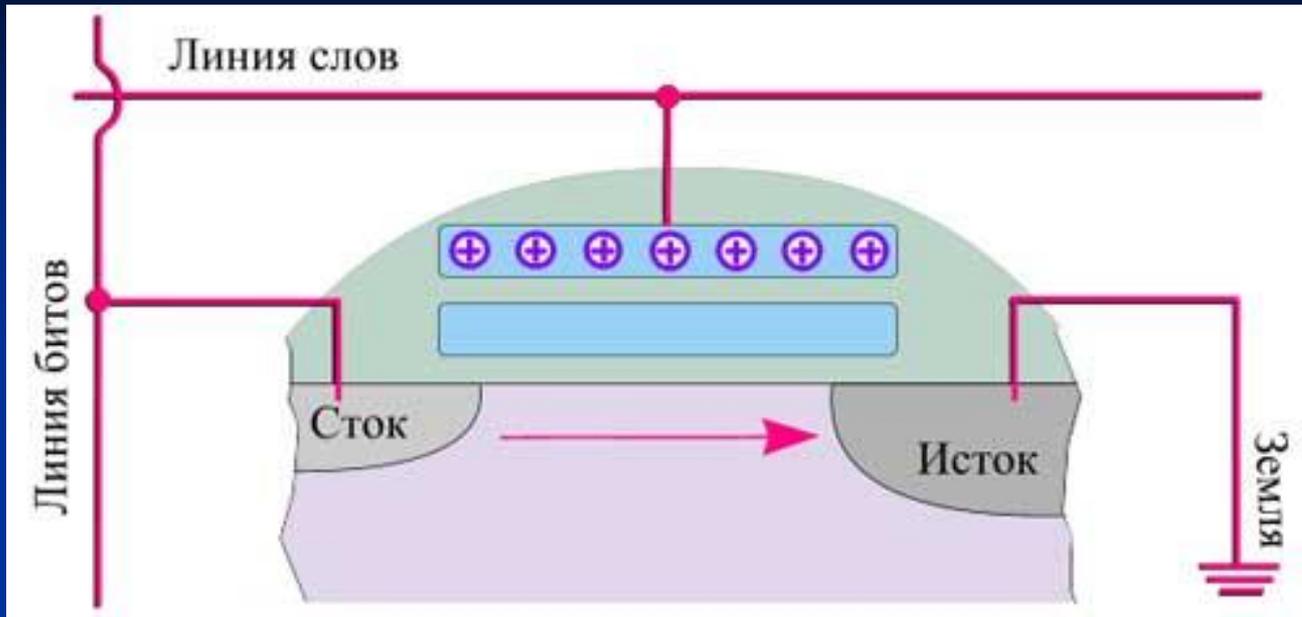
Полупроводниковая (твердотельная) - не содержащая механически движущихся частей (как обычные жёсткие диски или CD), построенная на основе интегральных микросхем (IC-Chip).

- В отличие от многих других типов полупроводниковой памяти, ячейка флэш-памяти не содержит конденсаторов — типичная ячейка флэш-памяти состоит всего-навсего из одного транзистора особой архитектуры. Ячейка флэш-памяти прекрасно масштабируется, что достигается не только благодаря успехам в миниатюризации размеров транзисторов, но и благодаря конструктивным находкам, позволяющим в одной ячейке флэш-памяти хранить несколько бит информации.
- Флэш-память исторически происходит от ROM (Read Only Memory) памяти, и функционирует подобно RAM (Random Access Memory). Данные флэш хранит в ячейках памяти, похожих на ячейки в DRAM. В отличие от DRAM, при отключении питания данные из флэш-памяти не пропадают.

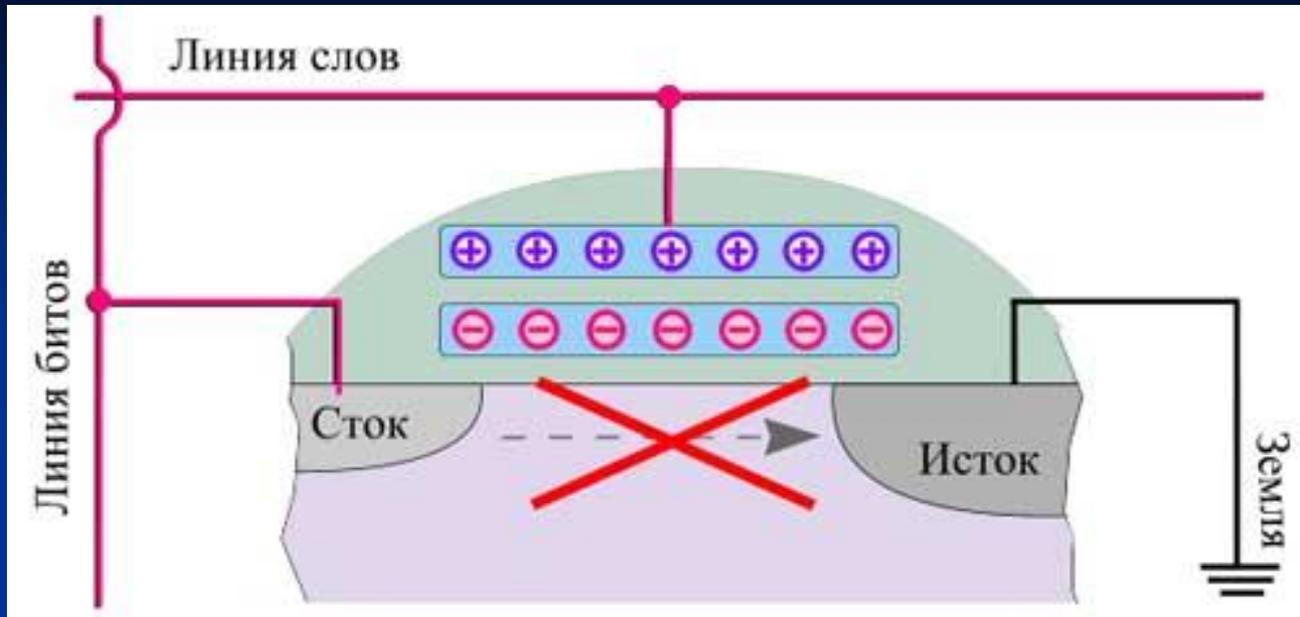
Общий принцип работы ячейки флэш-памяти.

- Рассмотрим простейшую ячейку флэш-памяти на одном n-p-n транзисторе. Ячейки подобного типа чаще всего применялись во flash-памяти с NOR архитектурой, а также в микросхемах EPROM.
- Поведение транзистора зависит от количества электронов на "плавающем" затворе. "Плавающий" затвор играет ту же роль, что и конденсатор в DRAM, т. е. хранит запрограммированное значение.
- Помещение заряда на "плавающий" затвор в такой ячейке производится методом инжекции "горячих" электронов (CHE - channel hot electrons), а снятие заряда осуществляется методом квантомеханического туннелирования Фаулера-Нордхейма (Fowler-Nordheim [FN]).

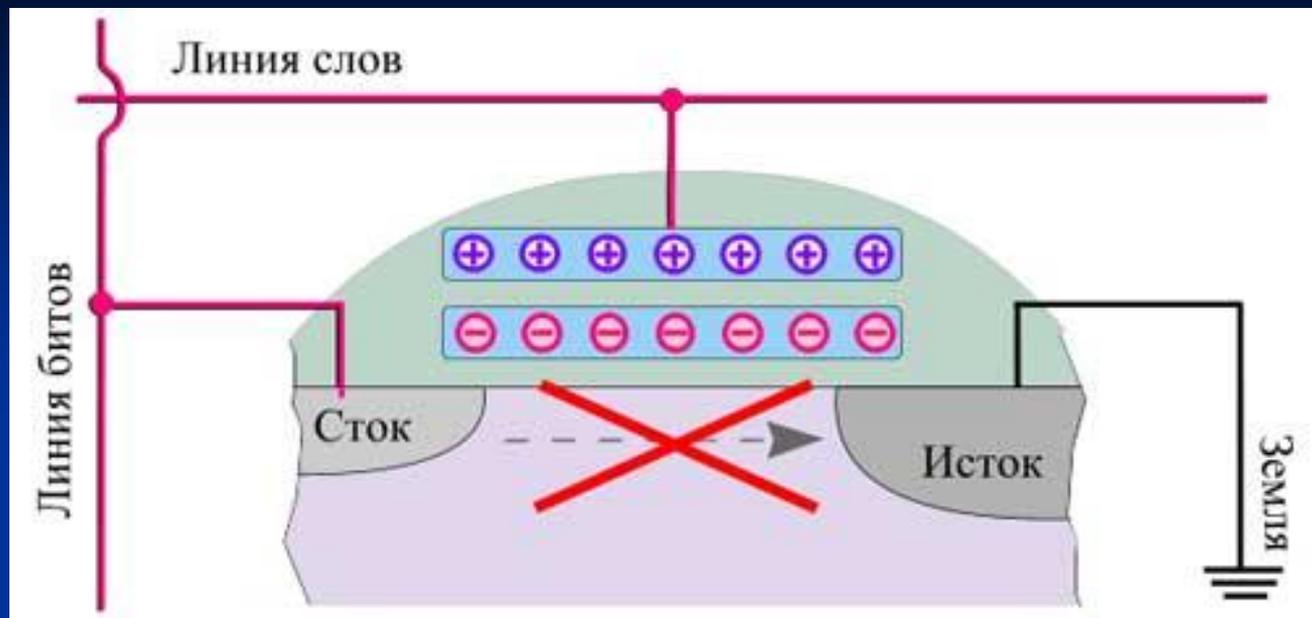
- **Эффект туннелирования** - один из эффектов, использующих волновые свойства электрона. Сам эффект заключается в преодолении электроном потенциального барьера малой "толщины". Для наглядности представим себе структуру, состоящую из двух проводящих областей, разделенных тонким слоем диэлектрика (обеднённая область). Преодолеть этот слой обычным способом электрон не может - не хватает энергии. Но при создании определённых условий (соответствующее напряжение и т.п.) электрон проскакивает слой диэлектрика (туннелирует сквозь него), создавая ток.



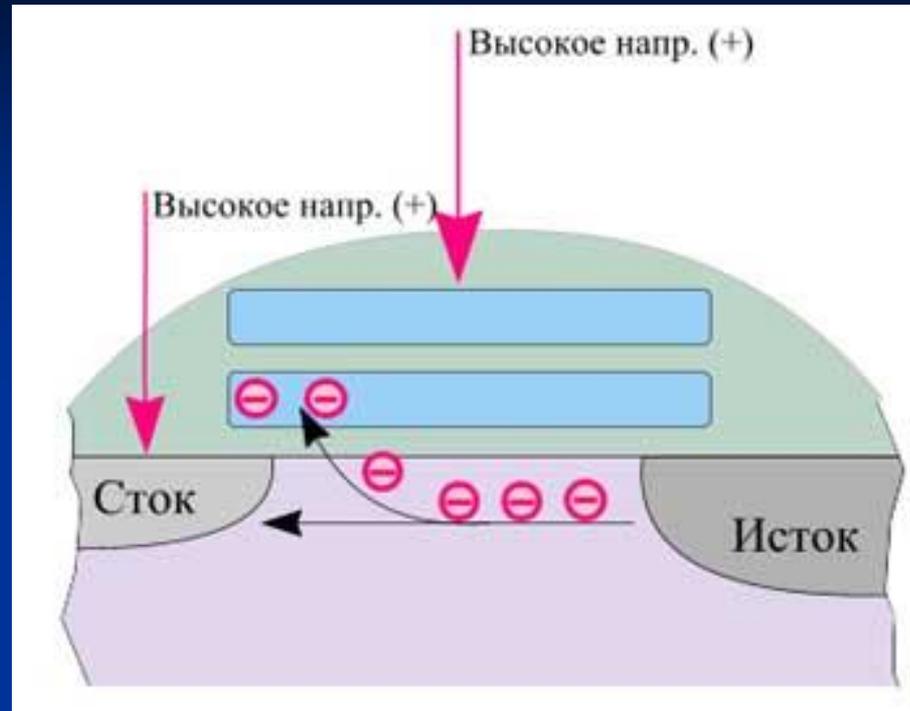
При **ЧТЕНИИ**, в отсутствие заряда на "плавающем" затворе, под воздействием положительного поля на управляющем затворе, образуется n-канал в подложке между истоком и стоком, и возникает ток.



- Наличие заряда на "плавающем" затворе меняет вольт-амперные характеристики транзистора таким образом, что при обычном для чтения напряжении канал не появляется, и тока между истоком и стоком не возникает.



- При **программировании** на сток и управляющий затвор подаётся высокое напряжение (причём на управляющий затвор напряжение подаётся приблизительно в два раза выше). "**Горячие**" электроны из канала инжектируются на плавающий затвор и изменяют вольт-амперные характеристики транзистора. Такие электроны называют "**горячими**" за то, что обладают высокой энергией, достаточной для преодоления потенциального барьера, создаваемого тонкой плёнкой диэлектрика.



- При стирании высокое напряжение подаётся на исток. На управляющий затвор (опционально) подаётся высокое отрицательное напряжение. Электроны туннелируют на исток.

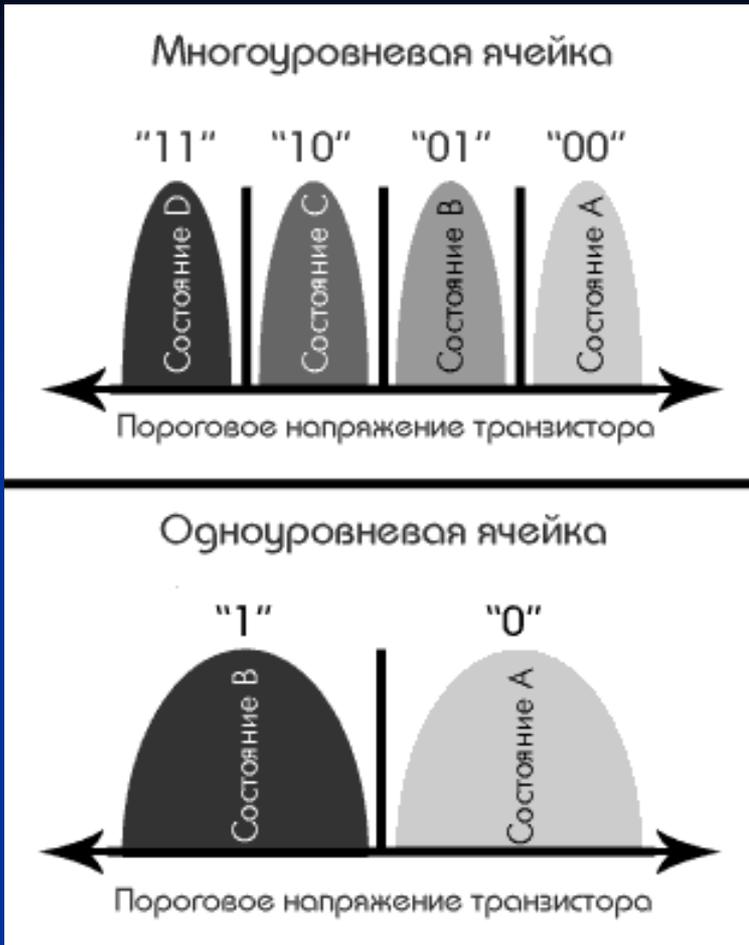
- **Различия методов тунелирования Фаулера-Нордгейма (FN) и метода инъекции "горячих" электронов:**
- **Channel FN tunneling** - не требует большого напряжения. Ячейки, использующие FN, могут быть меньше ячеек, использующих СНЕ.
- **СНЕ injection (СНЕI)** - требует более высокого напряжения, по сравнению с FN. Таким образом, для работы памяти требуется поддержка двойного питания.
- Программирование методом СНЕ осуществляется быстрее, чем методом FN.

- **Некоторые виды ячеек флэш-памяти на основе МОП-транзисторов с "плавающим" затвором:**
- **Stacked Gate Cell** - ячейка с многослойным затвором. Метод стирания - Source-Poly FN Tunneling, метод записи - Drain-Side CHE Injection.
- **SST Cell, или SuperFlash Split-Gate Cell** (Silicon Storage Technology - компания-разработчик технологии) - ячейка с расщеплённым затвором. Метод стирания - Interpoly FN Tunneling, метод записи - Source-Side CHE Injection.
- **Two Transistor Thin Oxide Cell** - двухтранзисторная ячейка с тонким слоем окисла. Метод стирания - Drain-Poly FN Tunneling, метод записи - Drain FNTunneling.

- Кроме наиболее часто встречающихся ячеек с "плавающим" затвором, существуют также ячейки на основе **SONOS**-транзисторов, которые **не содержат плавающего затвора**. SONOS-транзистор напоминает обычный МНОП (M_NOS) транзистор. В SONOS-ячейках функцию "плавающего" затвора и окружающего его изолятора выполняет композитный диэлектрик ONO. Расшифровывается **SONOS** (Semiconductor Oxide Nitride Oxide Semiconductor) как Полупроводник-Диэлектрик-Нитрид-Диэлектрик-Полупроводник. Вместо давшего название этому типу ячейки нитрида в будущем планируется использовать поликристаллический кремний.

■ SLC- и MLC-приборы

- 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 ([англ. *single-level cell, SLC*](#)). В многобитовых ячейках различают больше уровней заряда; их называют многоуровневыми ([англ. *multi-level cell, MLC*](#)[\[4\]](#)). MLC-приборы дешевле и более ёмкие, чем SLC-приборы, однако с большим временем доступа и меньшим максимальным количеством перезаписей.
- Обычно под MLC понимают память с 4 уровнями заряда (2 бита), память с 8 уровнями (3 бита) называют TLC[\[5\]](#), с 16 уровнями (4 бита) — 16LC.[\[6\]](#)



- В технологии MLC используется аналоговая природа ячейки памяти. Как известно, обычная однобитная ячейка памяти может принимать два состояния - "0" или "1". Во флэш-памяти эти два состояния различаются по величине заряда, помещённого на "плавающий" затвор транзистора. В отличие от "обычной" флэш-памяти, MLC способна различать более двух величин зарядов, помещённых на "плавающий" затвор, и, соответственно, большее число состояний. При этом каждому состоянию в соответствие ставится определенная комбинация значений бит.

- Во время записи на "плавающий" затвор помещается количество заряда, соответствующее необходимому состоянию. От величины заряда на "плавающем" затворе зависит пороговое напряжение транзистора. Пороговое напряжение транзистора можно измерить при чтении и определить по нему записанное состояние, а значит и записанную последовательность бит.

Основные преимущества MLC микросхем:

- Более низкое соотношение \$/МБ
- При равном размере микросхем и одинаковом техпроцессе "обычной" и MLC-памяти, последняя способна хранить больше информации (размер ячейки тот же, а количество хранимых в ней бит - больше)
- На основе MLC создаются микросхемы большего, чем на основе однобитных ячеек, объёма

Основные недостатки MLC:

- Снижение надёжности, по сравнению с однобитными ячейками, и, соответственно, необходимость встраивать более сложный механизм коррекции ошибок (чем больше бит на ячейку - тем сложнее механизм коррекции ошибок)
- Быстродействие микросхем на основе MLC зачастую ниже, чем у микросхем на основе однобитных ячеек
- Хотя размер MLC-ячейки такой же, как и у однобитной, дополнительно тратится место на специфические схемы чтения/записи многоуровневых ячеек

Ресурс записи

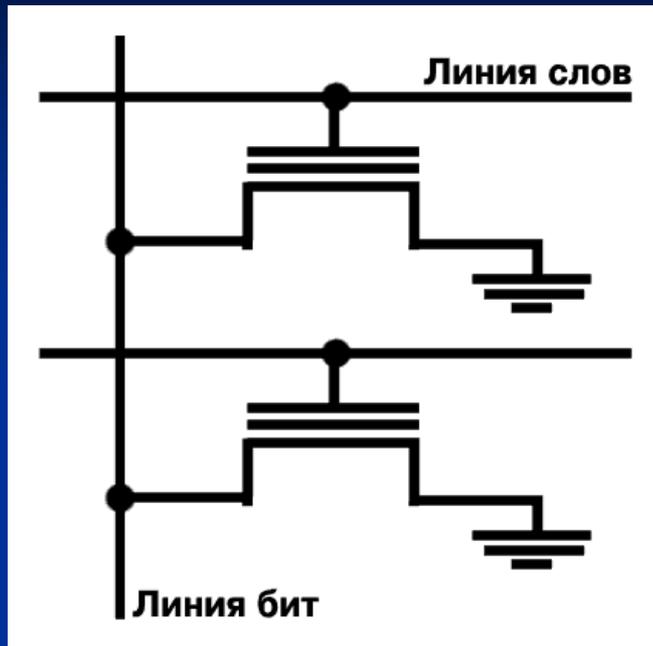
- Изменение заряда сопряжено с накоплением необратимых изменений в структуре и потому количество записей для ячейки флеш-памяти ограничено (обычно до 10 тыс. раз для MLC-устройств и до 100 тыс. раз для SLC-устройств).
- Одна из причин деградации — невозможность индивидуально контролировать заряд плавающего затвора в каждой ячейке. Дело в том, что запись и стирание производятся над множеством ячеек одновременно — это неотъемлемое свойство технологии флеш-памяти. Автомат записи контролирует достаточность инжекции заряда по референсной ячейке или по средней величине. Постепенно заряд отдельных ячеек рассогласовывается и в некоторый момент выходит за допустимые границы, которые может скомпенсировать инжекцией автомат записи и воспринять устройство чтения. Понятно, что на ресурс влияет степень идентичности ячеек. Одно из следствий этого — с уменьшением топологических норм полупроводниковой технологии создавать идентичные элементы все труднее, поэтому вопрос ресурса записи становится все острее.
- Другая причина — взаимная диффузия атомов изолирующих и проводящих областей полупроводниковой структуры, ускоренная градиентом электрического поля в области кармана и периодическими электрическими пробоями изолятора при записи и стирании. Это приводит к размыванию границ и ухудшению качества изолятора, уменьшению времени хранения заряда.

- **Срок хранения данных**
- Изоляция кармана неидеальна, заряд постепенно изменяется. Срок хранения заряда, заявляемый большинством производителей для бытовых изделий — 10-20 лет.
- Специфические внешние условия могут катастрофически сократить срок хранения данных. Например, повышенные температуры или радиационное облучение (гамма-радиация и частицы высоких энергий).
- У современных микросхем NAND при чтении возможно повреждение данных на соседних страницах в пределах блока. Осуществление большого числа (сотни тысяч и более) операций чтения без перезаписи может ускорить возникновение ошибки.

Иерархическая структура

- Стирание, запись и чтение флеш-памяти всегда происходит относительно крупными блоками разного размера, при этом размер блока стирания всегда больше чем блок записи, а размер блока записи не меньше, чем размер блока чтения. Собственно, это — характерный отличительный признак флеш-памяти по отношению к классической памяти EEPROM.
- Как следствие — все микросхемы флеш-памяти имеют ярко выраженную иерархическую структуру. Память разбивается на блоки, блоки состоят из секторов, секторы из страниц. В зависимости от назначения конкретной микросхемы глубина иерархии и размер элементов может меняться.
- (Например, NAND-микросхема может иметь размер стираемого блока в сотни кбайт, размер страницы записи и чтения 4 кбайт. Для NOR-микросхем размер стираемого блока варьируется от единиц до сотен кбайт, размер сектора записи — до сотен байт, страницы чтения — единицы-десятки байт.)

Архитектура флэш-памяти. **NOR (NOT OR, ИЛИ-НЕ)**

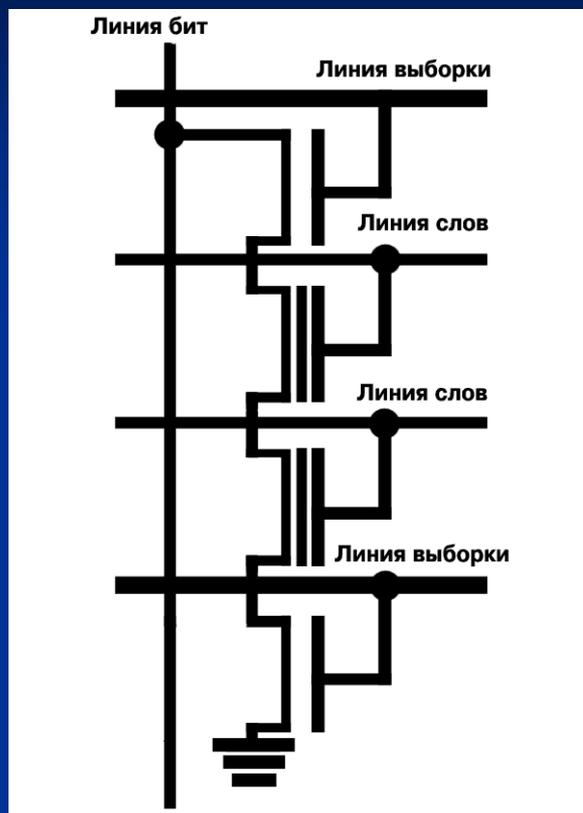


NOR и NAND различаются методом соединения ячеек в массив и алгоритмами чтения-записи.

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. В такой конструкции было легко считать состояние конкретного транзистора, подав положительное напряжение на один столбец и одну строку.

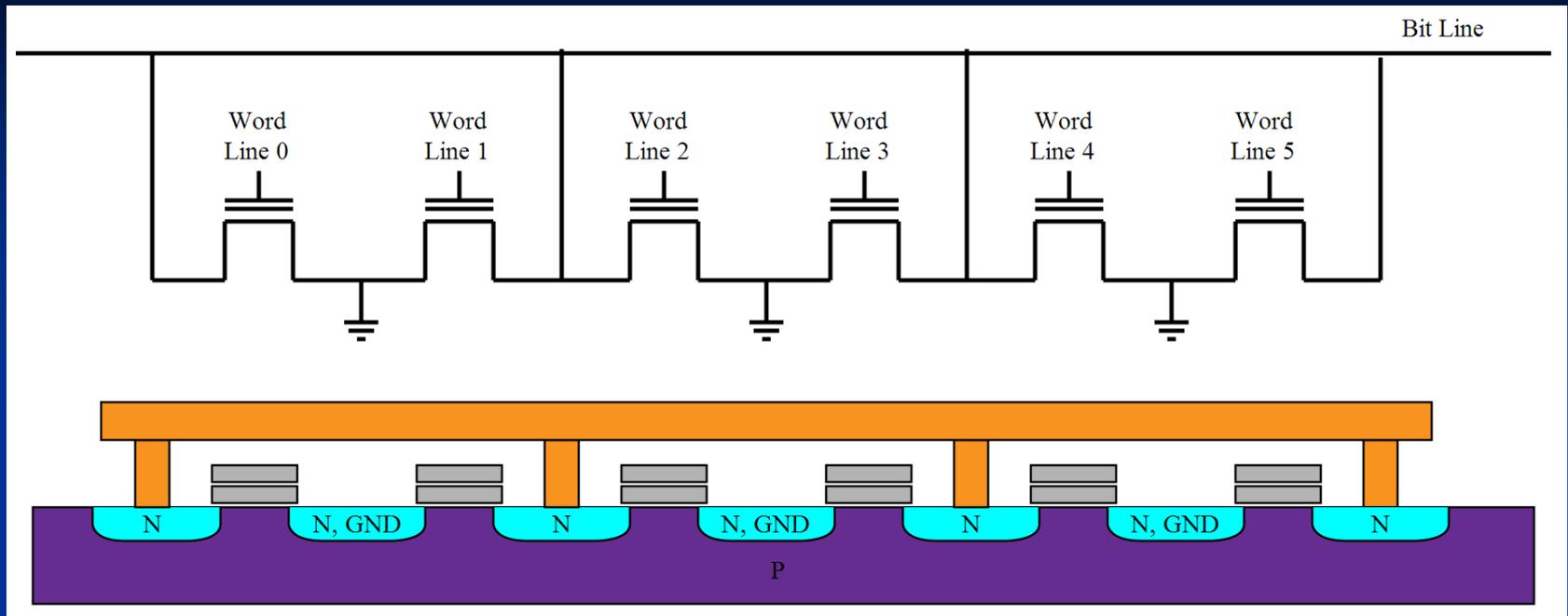
- **Преимущества:** быстрый произвольный доступ, возможность побайтной записи. **Недостатки:** относительно медленная запись и стирание. Из перечисленных здесь типов имеет наибольший размер ячейки, а потому плохо масштабируется. Единственный тип памяти, работающий на двух разных напряжениях. Идеально подходит для хранения кода программ (PC BIOS, сотовые телефоны), идеальная замена обычному EEPROM. **Основные производители:** AMD, Intel, Sharp, Micron, Ti, Toshiba, Fujitsu, Mitsubishi, SGS-Thomson, STMicroelectronics, SST, Samsung, Winbond, Macronix, NEC, UMC.
- **Программирование:** методом инъекции "горячих" электронов
Стирание: туннелированием FN

Архитектура флэш-памяти. NAND (NOT AND, И-НЕ)

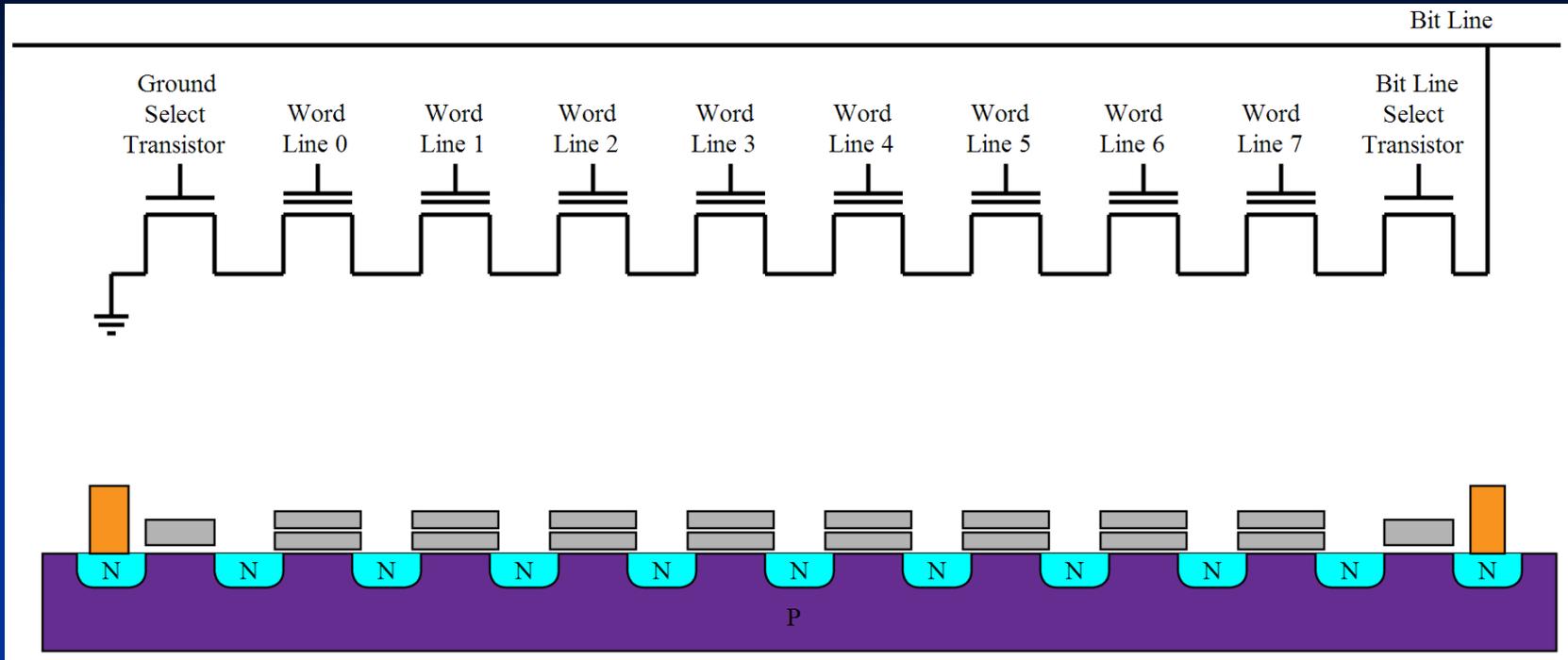


- Конструкция NAND — трёхмерный массив. В основе та же самая матрица, что и в NOR, но вместо одного транзистора в каждом пересечении устанавливается столбец из последовательно включенных ячеек. В такой конструкции получается много затворных цепей в одном пересечении.
- Плотность компоновки можно резко увеличить (ведь к одной ячейке в столбце подходит только один проводник затвора), однако алгоритм доступа к ячейкам для чтения и записи заметно усложняется.

- **Преимущества:** быстрая запись и стирание, небольшой размер блока.
 - **Недостатки:** относительно медленный произвольный доступ, невозможность побайтной записи. Наиболее подходящий тип памяти для приложений, ориентированных на блочный обмен: MP3 плееров, цифровых камер и в качестве заменителя жёстких дисков. **Основные производители:** Toshiba, AMD/Fujitsu, Samsung, National
- Программирование:** туннелированием FN
Стирание: туннелированием FN

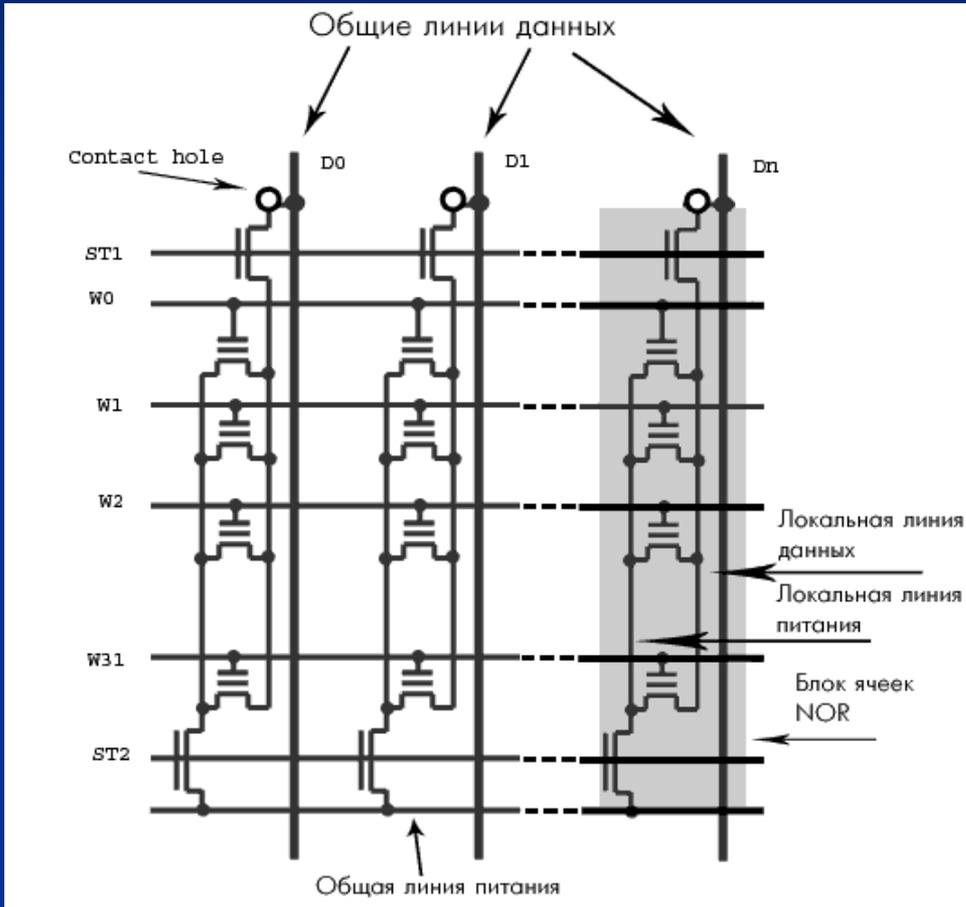


- Компоновка шести ячеек NOR flash

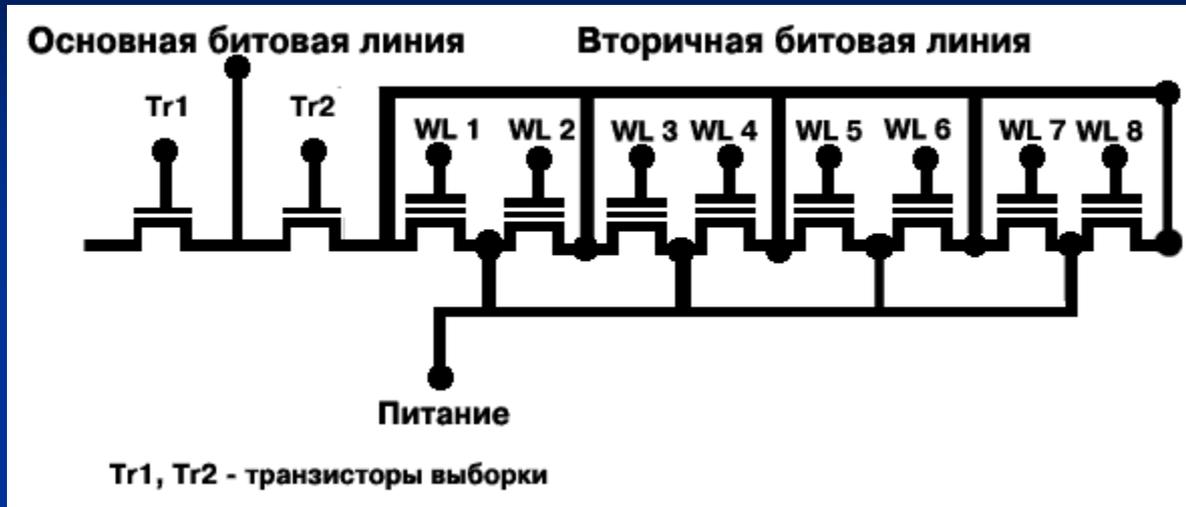


■ Структура одного столбца NAND flash

- Технология NOR позволяет получить быстрый доступ индивидуально к каждой ячейке, однако площадь ячейки велика. Наоборот, NAND имеют малую площадь ячейки, но относительно длительный доступ сразу к большой группе ячеек.



- Доступ к ячейкам памяти последовательный, архитектурно напоминает NOR и NAND, комбинирует их лучшие свойства. Небольшой размер блока, возможно быстрое мультиблочное стирание. Подходит для потребностей массового рынка.
- **Основные производители:** Hitachi и Mitsubishi Electric.
- **Программирование:** туннелированием FN
- **Стирание:** туннелирование м FN



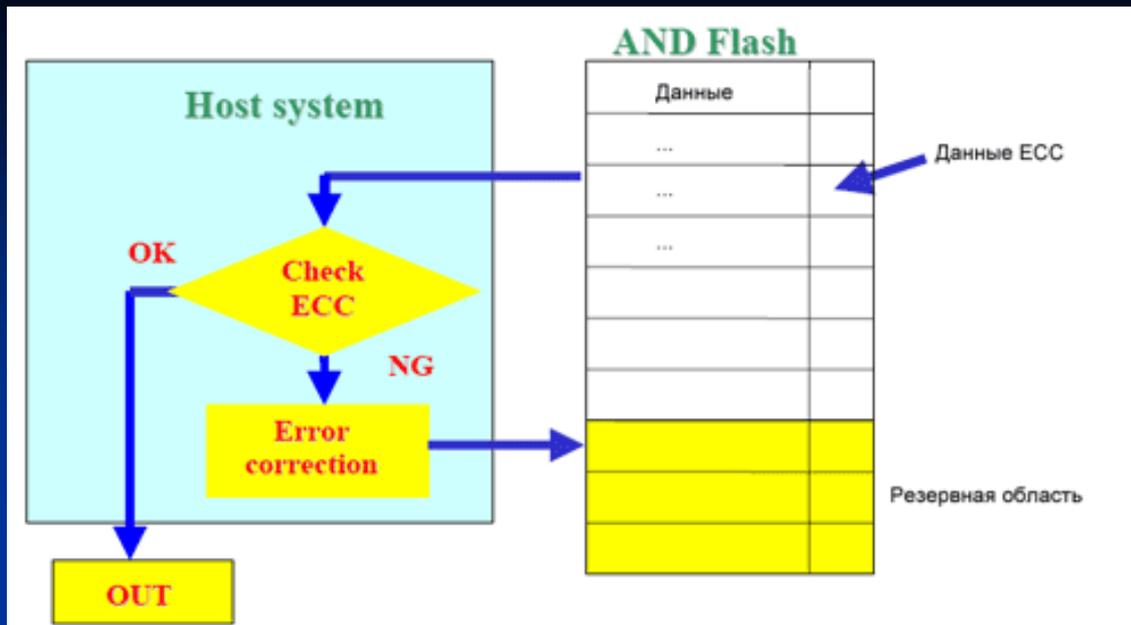
- Тип памяти, комбинирующий свойства NOR и NAND. Доступ к ячейкам произвольный. Использует особый метод стирания данных, предохраняющий ячейки от пережигания (что способствует большей долговечности памяти). Размер блока в DiNOR всего лишь 256 байт. **Основные производители:** Mitsubishi Electric, Hitachi, Motorola. **Программирование:** туннелированием FN **Стирание:** туннелированием FN

Доступ к флэш-памяти

- Существует три основных типа доступа:
- **обычный** (*Conventional*): произвольный асинхронный доступ к ячейкам памяти.
- **пакетный** (*Burst*): синхронный, данные читаются параллельно, блоками по 16 или 32 слова. Считанные данные передаются последовательно, передача синхронизируется. Преимущество перед обычным типом доступа - быстрое последовательное чтение данных. Недостаток - медленный произвольный доступ.
- **страничный** (*Page*): асинхронный, блоками по 4 или 8 слов. Преимущества: очень быстрый произвольный доступ в пределах текущей страницы. Недостаток: относительно медленное переключение между страницами.

Бэд-секторы

- Уже с конвейера сходят чипы, имеющие в среднем до 2% нерабочих ячеек — это обычная технологическая норма. Но со временем их количество может увеличиваться (окружающую среду в этом винить особо не стоит — электромагнитное, физическое (тряска и т.п.) влияние флэш-чипу не страшно). Поэтому, как и в жестких дисках, во флэш-памяти предусмотрен резервный объем. Если появляется плохой сектор, функция контроля подменяет его адрес в таблице размещения файлов адресом сектора из резервной области.



- Выявлением бэдов занимается алгоритм ECC – он сравнивает записываемую информацию с реально записанной. Также в связи с ограниченным ресурсом ячеек (порядка нескольких миллионов циклов чтения/записи для каждой) важно наличие функции учета равномерности износа. Приведу такой редкий, но встречающийся случай: брелок с 32 Мбайт, из которых 30 Мбайт заняты, а на свободное место постоянно что-то записывается и удаляется. Получается, что одни ячейки простаивают, а другие интенсивно исчерпывают свой ресурс. Чтобы такого не было, в фирменных устройствах свободное пространство условно разбивается на участки, для каждого из которых осуществляется контроль и учет количества операций записи.

Flash карты памяти

Тип	MMC	RS-MMC	MMC Plus	SecureMMC	SD	SDIO	miniSD	microSD
Разъём SD	Да	Механический адаптер	Да	Да	Да	Да	Электро-механический адаптер	Электро-механический адаптер
Число контактов	7	7	13	7	9	9	11	8
Ширина	24 мм	24 мм	24 мм	24 мм	24 мм	24 мм	20 мм	11 мм
Длина	32 мм	18 мм	32 мм	32 мм	32 мм	32 мм+	21,5 мм	15 мм
Толщина	1,4 мм	1,4 мм	1,4 мм	1,4 мм	2,1 мм (возможны исключения)	2,1 мм	1,4 мм	1 мм (0,7 мм без выступа)
Режим SPI	Опционально	Опционально	Опционально	Да	Да	Да	Да	Да
1-битовый режим	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да
4-битовый режим	Нет	Нет	Да	Нет	Опционально	Опционально	Опционально	Опционально
8-битовый режим	Нет	Нет	Да	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
Прерывания	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Опционально	Нет	Нет
Тактовая частота обмена	20 МГц	20 МГц	52 МГц	20 МГц?	208 МГц	208 МГц	50 МГц	208 МГц
Максимальная скорость передачи	20 Мбит/с	20 Мбит/с	416 Мбит/с	20 Мбит/с?	832 Мбит/с	200 Мбит/с	832 Мбит/с	832 Мбит/с
Максимальная скорость передачи по SPI	20 Мбит/с	20 Мбит/с	52 Мбит/с	20 Мбит/с	50 Мбит/с	50 Мбит/с	50 Мбит/с	50 Мбит/с
DRM	Нет	Нет	Нет	Да	Да	N/A	Да	Да
Пользовательское шифрование	Нет	Нет	Нет	Да	Нет	Нет	Нет	Нет
Упрощенная спецификация	Да	Да	Нет	Ещё нет?	Да	Да	Нет	Нет
Стоимость членства	2500 долл./год (не обязательно)				2000 долл./год (общая), 4500 долл./год (исполнительная)			
Стоимость спецификации	Бесплатно начиная с версии 4.3		?	?	Для членов		Для членов	Для членов
Лицензия для хоста	Нет	Нет	Нет	Нет	1000 долл./год + стоимость членства			
Лицензия для карты памяти	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да
Лицензия для карты ввода-вывода	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Да: \$1000/год + стоимость членства	N/A	N/A
Совместимость со свободным ПО	Да	Да	Да?	Да?	Кроме файловой системы по SDXC	Да	Кроме файловой системы в SDXC?	Кроме файловой системы в SDXC?
Номинальное рабочее напряжение	3,3 В	1,8 В/3,3 В	1,8 В/3,3 В ^[Comp 2]	1,8 В/3,3 В	2,7-3,6 В ^[Comp 3]			

Secure Digital

- Формат был разработан в 1999 году фирмами Panasonic, SanDisk и Toshiba на основе MMC-карты. В 2000 году на CES компаниями Matsushita, SanDisk и Toshiba было объявлено о создании SD Card Association.
- Карта размером 24x32x2,1 мм снабжена собственным контроллером и специальной областью, способной, в отличие от MMC, записывать информацию таким образом, чтобы «незаконное» чтение информации было невозможно, в соответствии с требованиями «Secure Digital Music Initiative». Этот факт был отражён в названии стандарта («Secure Digital»). Для записи в защищённую область используется специальный протокол записи, недоступный для обычных пользователей. При этом карта также может быть защищена паролем, без которого доступ к записанной информации невозможен; восстановить работоспособность карты можно только её полным переформатированием с потерей записанной информации.

