

Lesson №2 Флэш-память



Flash-driver

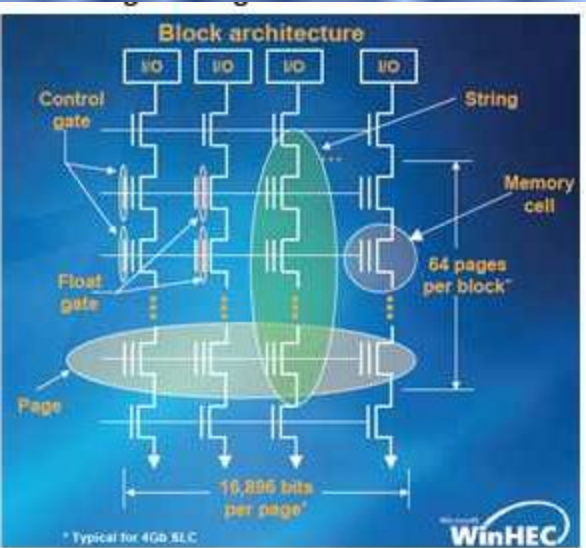
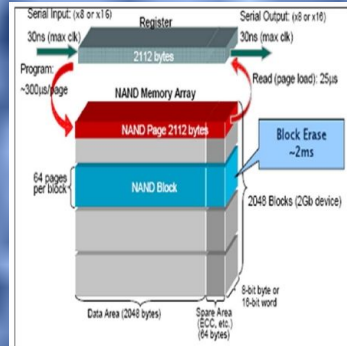
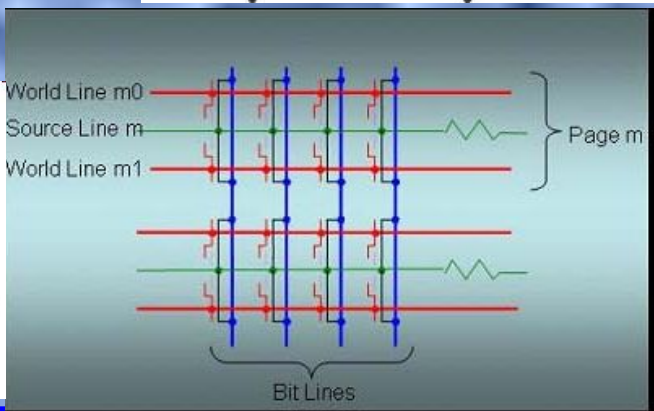
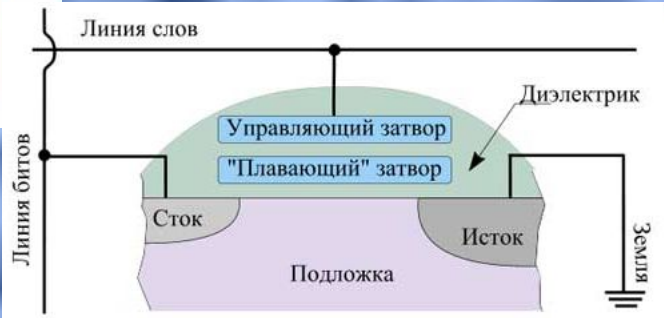
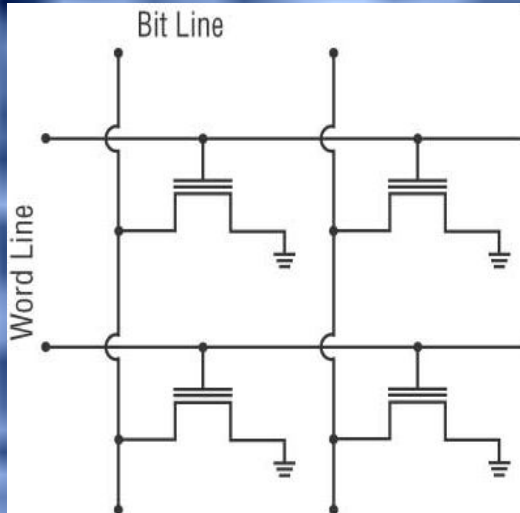
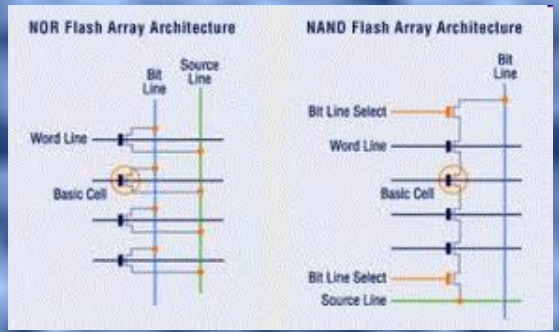
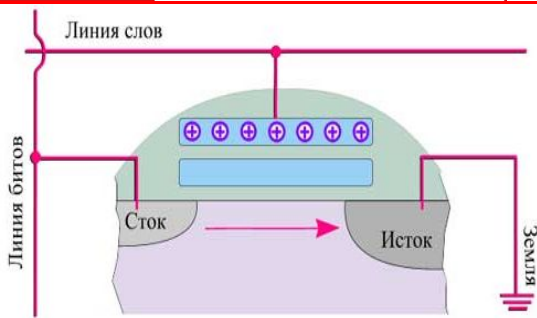


Figure 4, NAND Architecture Diagram

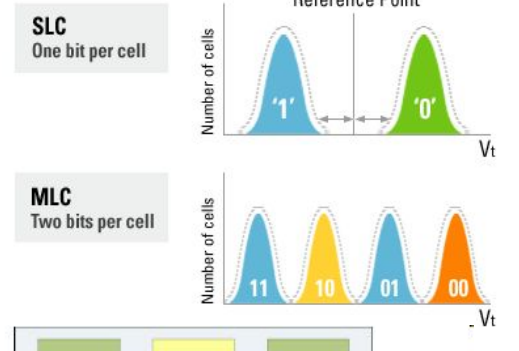




□ **Что такое flash-память?:** ● от ROM к Flash

□ **Принцип действия:** ● организация flash-памяти:

- архитектура NOR;
- архитектура NAND

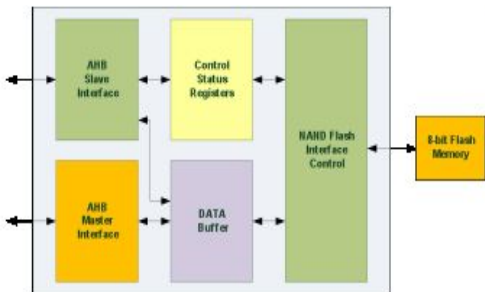


□ **Физика работы flash:**

- квантомеханическое туннелирование Фаулера-Нордгейма;
- инжекция "горячих" электронов.

□ **Многоуровневые ячейки (MLC - Multi Level Cell):** ●

основные преимущества MLC микросхем; ● основные недостатки MLC.



□ **Доступ к флэш-памяти.**

□ **Файловые системы**

□ **Параллельный интерфейс vs. последовательный**





Флэш-память - особый вид энергонезависимой перезаписываемой полупроводниковой памяти.



Энерго-независимая

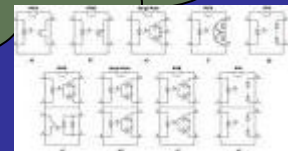


Перезаписываемая

Flash

допускающая изменение (перезапись) хранимых в ней данных

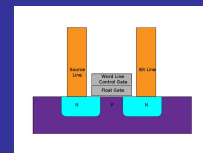
Твердотельная (полупроводниковая)

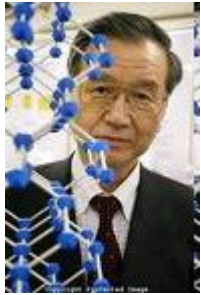


не требующая дополнительной энергии для хранения данных (энергия требуется только для записи)



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



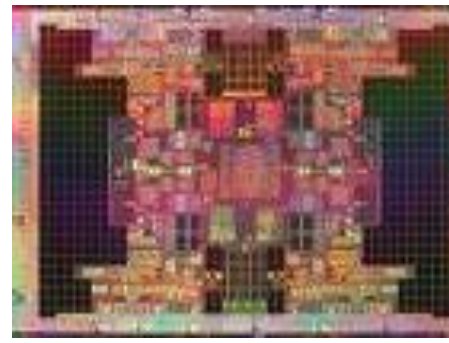
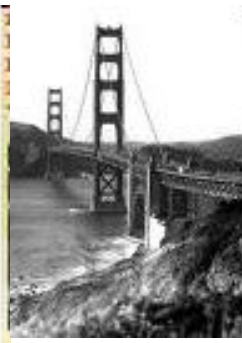


born May 8, 1943, Takasaki, Gunma

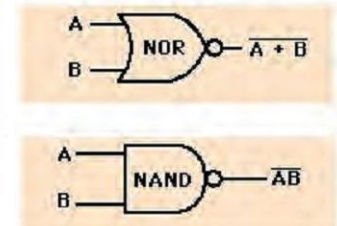
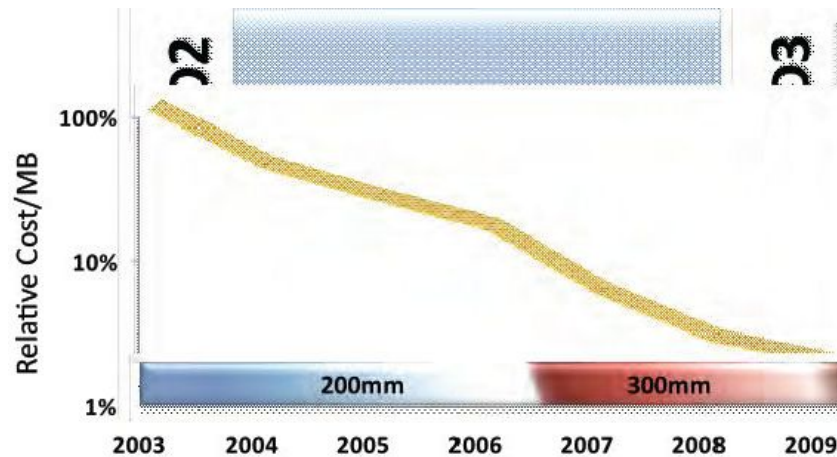
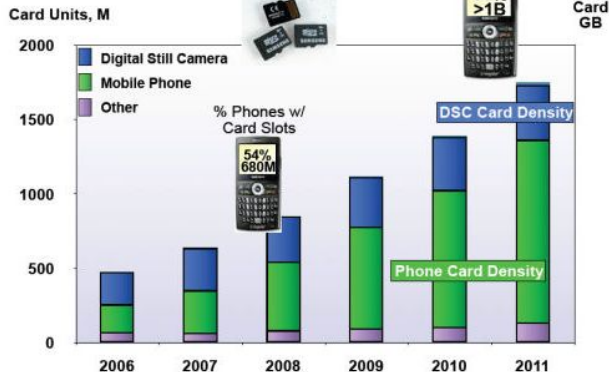
Флеш-память изобрел **Fujio Masuoka** в 1984 году, работая в компании **Toshiba**.

После представления разработки Fujio Masuoka на IEEE 1984 (International Electron Devices Meeting) в Сан-Франциско (Калифорния) компания Intel в 1988 году выпустила первый коммерческий флеш-чип типа NOR.

Появление NAND-типа флеш-памяти было анонсировано **Toshiba** в 1989 году на Международной конференции, посвященной твердотельным дискам (**International Solid-State Circuits Conference**).

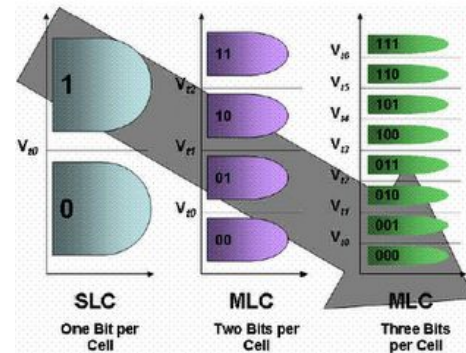
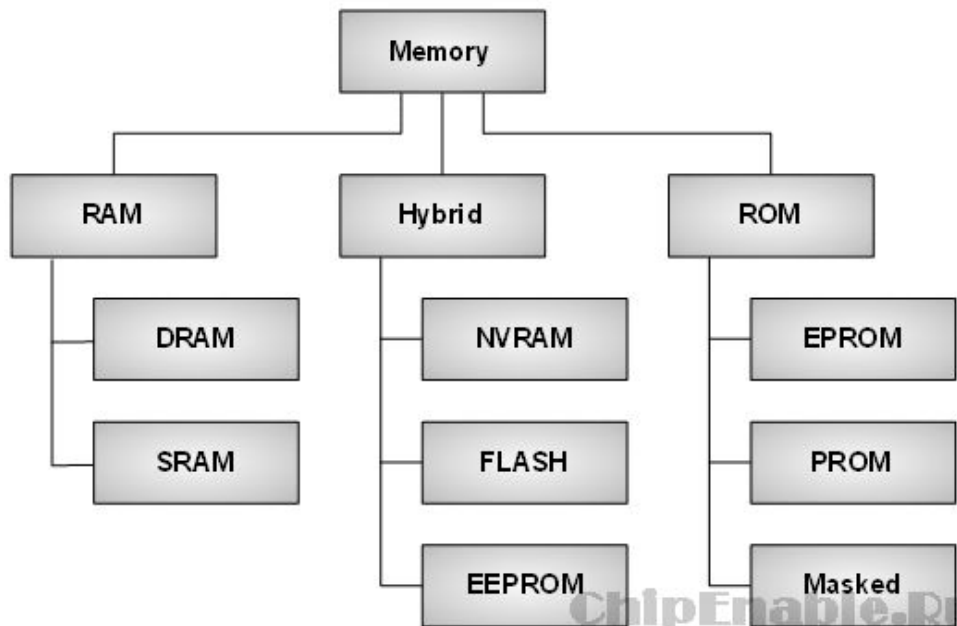


Flash Card Market Growth



NOR and NAND gates

На настоящий момент есть множество вариантов хранения информации, какие-то из них требуют постоянной подпитки электричеством (RAM), какие-то навсегда «вшиты» в управляющие микросхемы окружающей нас техники (ROM), а какие-то сочетают в себе качества и тех, и других (Hybrid).



К последним, в частности, и принадлежит flash. Вроде бы и энергонезависимая память, но законы физики отменить сложно, и периодически на флешках перезаписывать информацию всё-таки приходится.

Random Access Memory

Read-Only Memory

Dynamic RAM

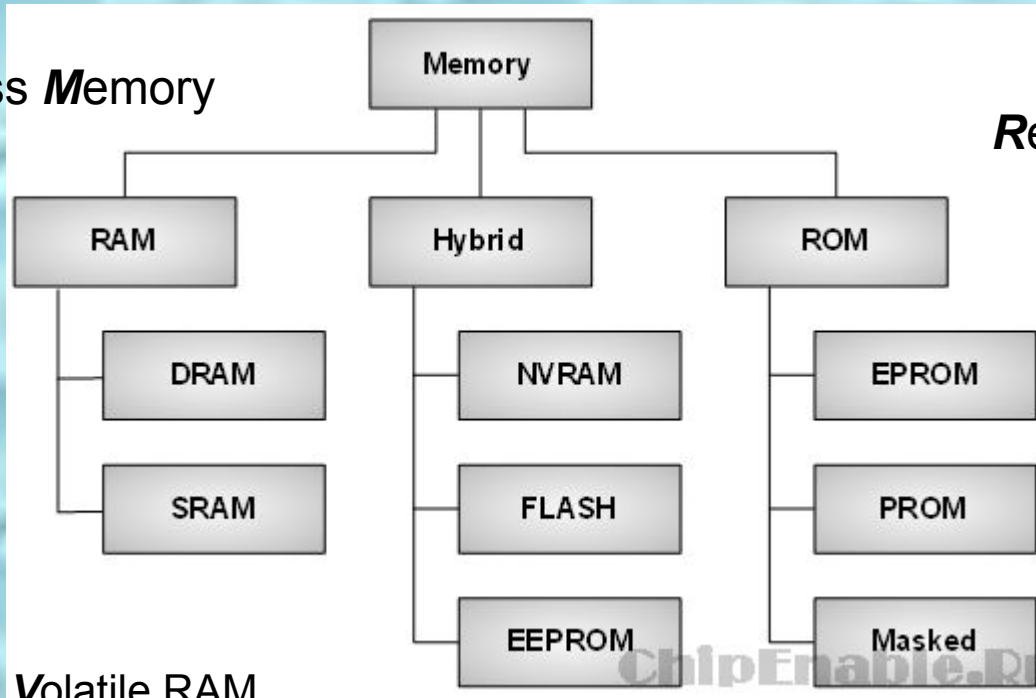
Static RAM

Non Volatile RAM

**Erasable Programmable
Read Only Memory**

Programmable ROM

**Electrically Erasable Programmable
Read-Only Memory**





В отличие от многих других типов полупроводниковой памяти, такие как

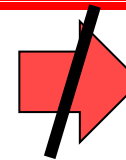
SRAM, DRAM, EEPROM

ячейка флэш-памяти

не содержит конденсаторов,

типичная ячейка флэш-памяти состоит всего-навсего из одного транзистора особой архитектуры.

Flash-память



Фиг. 13.

а — стандартное изображение конденсатора (без конденсатора для удобства различения проволочек от диодов); б — диодный конденсатор; в — его стандартное изображение.

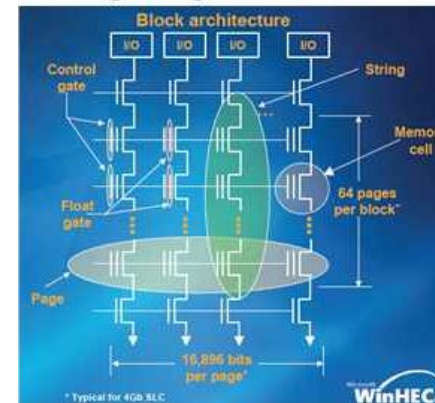
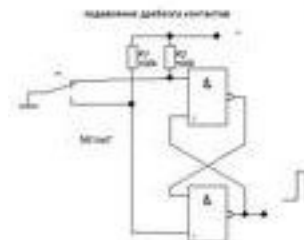
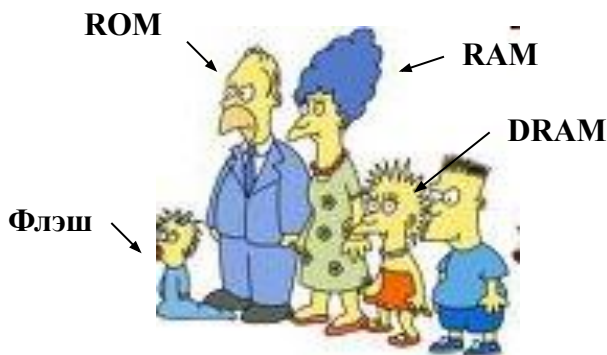
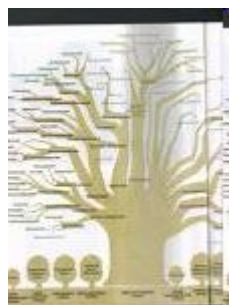


Figure 4, NAND Architecture Diagram

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.



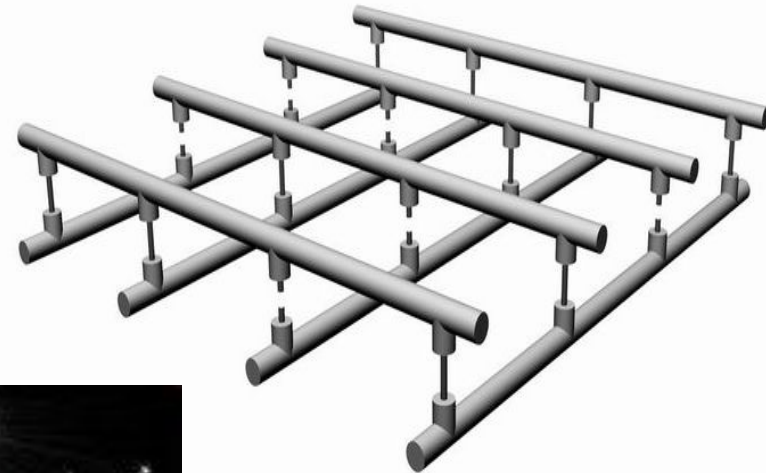
□ Флэш-память исторически происходит от ROM (Read Only Memory) памяти, и функционирует подобно RAM (Random Access Memory).

□ Данные флэш хранит в ячейках памяти, похожих на ячейки в DRAM. В отличие от DRAM, при отключении питания данные из флэш-памяти не пропадают.



Замены памяти **SRAM** и **DRAM** флэш-памятью не происходит из-за двух особенностей флэш-памяти:

- флэш работает **существенно медленнее**;
- имеет ограничение по количеству циклов перезаписи (**от 10 000 до 1 000 000 для разных типов**).



Надёжность/долговечность:



VS.



□ Информация, записанная на флэш-память, может храниться **очень длительное время (от 20 до 100 лет)**, и способна выдерживать значительные механические нагрузки (**в 5-10 раз превышающие предельно допустимые для обычных HDD**).

□ Основное преимущество флэш-памяти перед жёсткими дисками и носителями CD-ROM состоит в том, что флэш-память потребляет значительно (**примерно в 10-20 и более раз**) меньше энергии во время работы, т.к. устройствах CD-ROM, HDD и других механических носителях информации, большая часть энергии уходит на приведение в движение механики этих устройств.

□ Кроме того, флэш-память компактнее большинства других механических носителей.

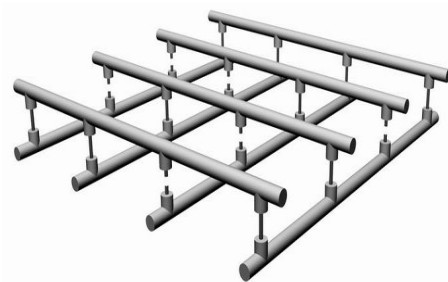
Флэш-память исторически произошла от полупроводникового ROM, однако ROM-памятью не является, а всего лишь имеет похожую на ROM организацию. Множество источников (как отечественных, так и зарубежных) зачастую ошибочно относят флэш-память к ROM. Флэш никак не может быть ROM хотя бы потому, что ROM (Read Only Memory) переводится как "память только для чтения".



Небольшая, по началу, неточность не обращала на себя внимания, однако с развитием технологий, когда флэш-память стала выдерживать до 1 миллиона циклов перезаписи, и стала использоваться как накопитель общего назначения, этот недочет в классификации начал бросаться в глаза.



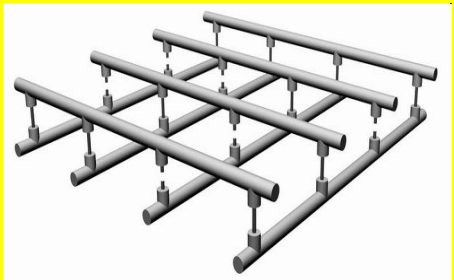
Среди полупроводниковой памяти только два типа относятся к "чистому" ROM - это Mask-ROM и PROM. В отличие от них EPROM, EEPROM и Flash относятся к классу энергонезависимой перезаписываемой памяти (английский эквивалент - nonvolatile read-write memory или NVRWM).



Примечание: всё, правда, встает на свои места, если, как утверждают сейчас некоторые специалисты, не считать RAM и ROM акронимами. Тогда RAM будет эквивалентом "энергозависимой памяти", а ROM - "энергонезависимой памяти".

ROM:

ROM (Read Only Memory) - память только для чтения. Если быть совсем точным, данный вид памяти называется Mask-ROM (Масочные ПЗУ).



- Память устроена в виде адресуемого массива ячеек (матрицы), каждая ячейка которого может кодировать единицу информации.
- Данные на ROM записывались во время производства путём нанесения по маске (отсюда и название) алюминиевых соединительных дорожек литографическим способом.
- Наличие или отсутствие в соответствующем месте такой дорожки кодировало "0" или "1".

Mask-ROM отличается сложностью модификации содержимого (только путем изготовления новых микросхем), а также длительностью производственного цикла (4-8 недель).

➡ Поэтому, а также в связи с тем, что современное программное обеспечение зачастую имеет много недоработок и часто требует обновления, данный тип памяти не получил широкого распространения.

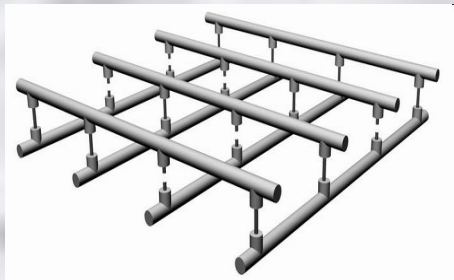
NVRWM:

EPROM

В EPROM перед записью необходимо произвести стирание (соответственно появилась возможность перезаписывать содержимое памяти).

Стирание ячеек EPROM выполняется сразу для всей микросхемы посредством облучения чипа ультрафиолетовыми или рентгеновскими лучами в течение нескольких минут.

Микросхемы, стирание которых производится путем засвечивания ультрафиолетом (были разработаны Intel в 1971 г., и называются UV-EPROM). Они содержат окошки из кварцевого стекла, которые по окончании процесса стирания заклеивают.



EPROM от Intel была основана на МОП-транзисторах с лавинной инжекцией заряда (FAMOS - Floating Gate Avalanche injection Metal Oxide Semiconductor, русский эквивалент - ЛИЗМОП).




В первом приближении такой транзистор представляет собой конденсатор с очень малой утечкой заряда. Позднее, в 1973 году, компания Toshiba разработала ячейки на основе SAMOS (Stacked gate Avalanche injection MOS).

В EPROM стирание приводит все биты стираемой области в одно состояние (обычно во все единицы, реже - во все нули). Запись на EPROM, как и в PROM, также осуществляется на программаторах (однако отличающихся от программаторов для PROM).



В настоящее время EPROM практически полностью вытеснена с рынка EEPROM и Flash.

ROM:

Преимущества:




1. Низкая стоимость готовой запрограммированной микросхемы (при больших объёмах производства). 
2. Высокая скорость доступа к ячейке памяти. 
3. Высокая надёжность готовой микросхемы и устойчивость к электромагнитным полям. 

Недостатки:




1. Невозможность записывать и модифицировать данные после изготовления. 
2. Сложный производственный цикл. 

PROM:

Преимущества:

1. Высокая надёжность готовой микросхемы и устойчивость к электромагнитным полям. 
2. Возможность программировать готовую микросхему, что удобно для штучного и мелкосерийного производства. 
3. Высокая скорость доступа к ячейке памяти. 

Недостатки:



1. Невозможность перезаписи. 
2. Большой процент брака. 
3. Необходимость специальной длительной термической тренировки, без которой надёжность хранения данных была невысокой. 

EPROM:

Преимущества:

Возможность перезаписывать
содержимое микросхемы

Недостатки:

1. Небольшое количество циклов перезаписи.

2. Невозможность модификации части хранимых данных.

3. Высокая вероятность "недотереть" (что в конечном итоге приведет к сбоям) или передержать микросхему под УФ-светом (т.н. overerase - эффект избыточного удаления, "пережигание"), что может уменьшить срок службы микросхемы и даже привести к её полной негодности.

EEPROM:

Преимущества:

1. Увеличенный ресурс работы.

High
Recourse

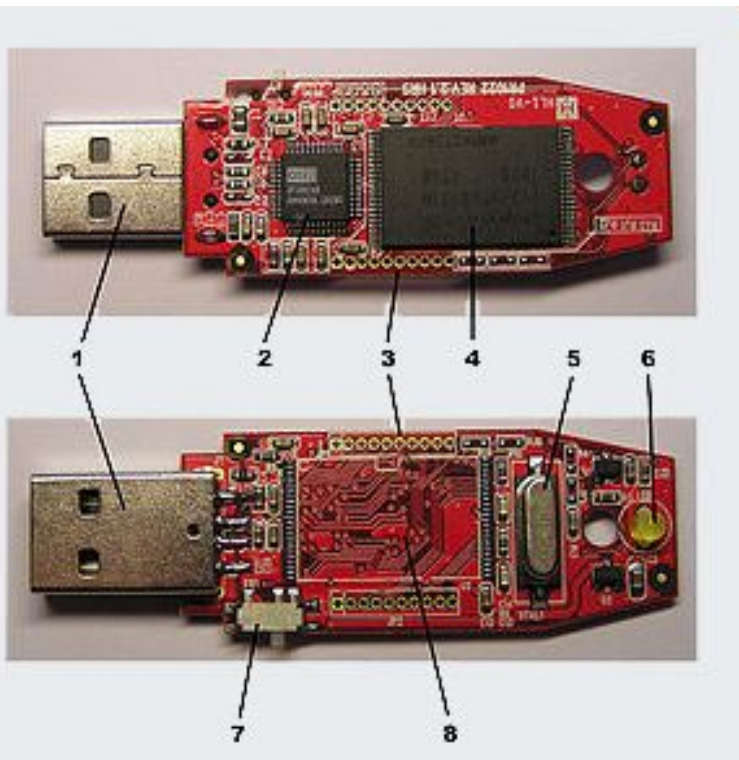
2. Проще в обращении.

Friendly
Interface

Недостатки:

Высокая стоимость

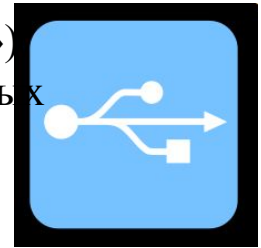
\$



- Основные элементы USB-Flash накопителя:
1. USB-коннектор,
 2. контроллер,
 3. PCB-многослойная печатная плата,
 4. модуль NAND памяти,
 5. кварцевый генератор опорной частоты,
 6. LED-индикатор (сейчас, правда, на многих флешках его нет),
 7. переключатель защиты от записи (аналогично, на многих флешках отсутствует),
 8. место для дополнительной микросхемы памяти.



USB (*Universal Serial Bus* — «универсальная последовательная шина») — последовательный интерфейс передачи данных для среднескоростных и низкоскоростных периферийных устройств в вычислительной технике.



Номер контакта	Обозначение	Цвет провода
1	VBUS	Красный
2	D-	Белый
3	D+	Зелёный
4	GND	Чёрный

Standard A

- **D+** **D-** +

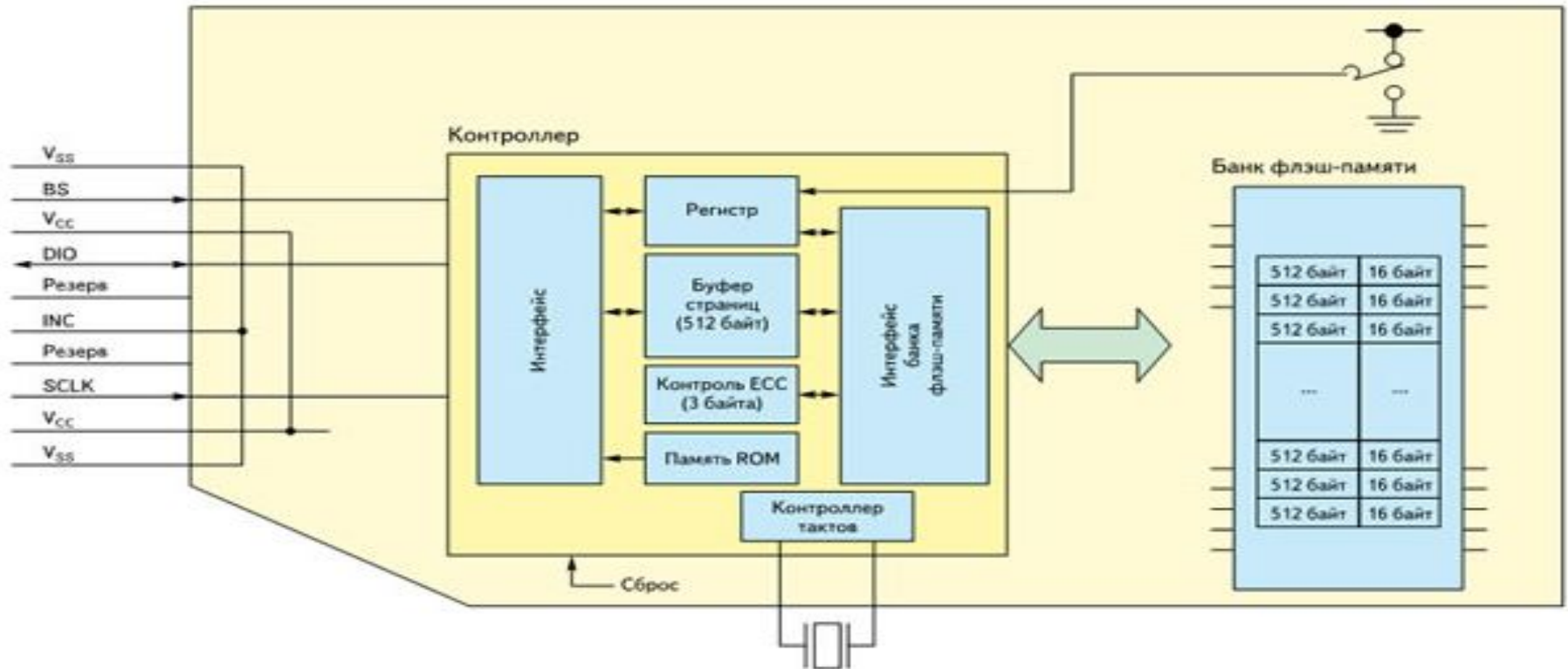
USB Тип А



Здесь GND — цепь «корпуса» для питания периферийных устройств, а VBus — +5 В, также для цепей питания.

Данные передаются по проводам D- и D+ дифференциально (состояния 0 и 1 (в терминологии официальной документации diff0 и diff1 соответственно) определяются по разности потенциалов между линиями более 0,2 В и при условии, что на одной из линий (D- в случае diff0 и D+ при diff1) потенциал относительно GND выше 2,8 В.

Для согласования интерфейсов и обслуживания собственных потребностей банка флэш-памяти используется специальный контроллер, выполненный в виде отдельной микросхемы либо встроенный в микросхему флэш-памяти.



Контроллер флэш-памяти необходим для согласования выходного интерфейса микросхемы памяти с внешней шиной. Банк флэш-памяти состоит из страниц объемом 528 байт. Каждая страница содержит рабочую область (512 байт) и служебную часть (16 байт), предназначенную для записи контрольных кодов и резервирования рабочих ячеек памяти

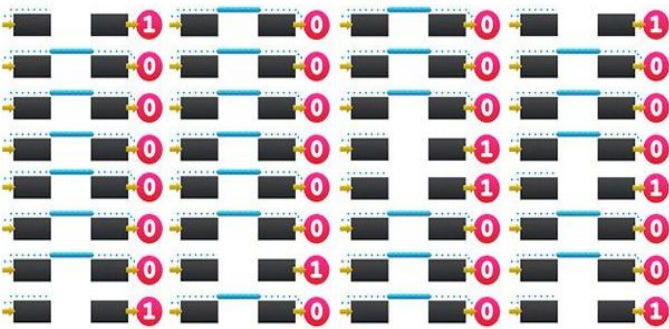
Некоторые функции контроллера относятся следующие:

- Выравнивание износа (wear leveling) позволяет устранить постоянную запись в начальные блоки памяти и равномерно распределять операции по всему банку памяти, увеличивая тем самым общий срок службы устройства.
- Обнаружение и коррекция случайных ошибок (ECC/EDC) на основе дополнительных разрядов служит для устранения случайных сбоев. Применяются простые, но быстрые коды Хемминга, либо более сложные алгоритмы на основе кодов Рида-Соломона или BCH.



- 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). Для замены дефектных ячеек сначала используются резервные разряды слова памяти, затем производится переназначение всего блока памяти на резервную область.
- Контроль напряжения питания. многие устройства флэш-памяти допускают работу с одним из двух питающих напряжений (например, 3,3 или 5 В) при автоматической настройке на имеющееся напряжение питания.



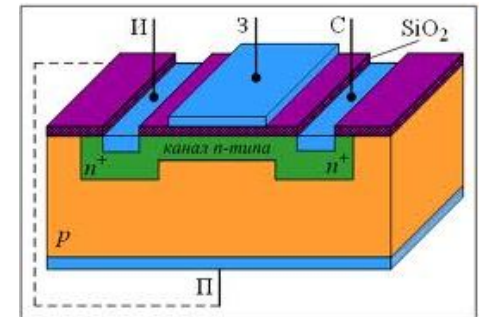
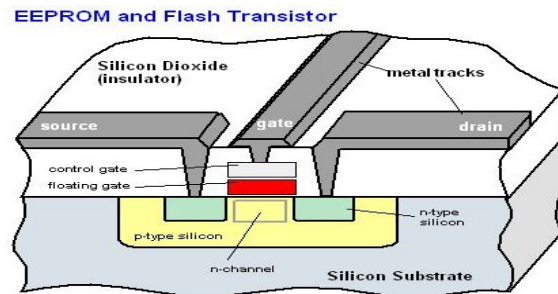
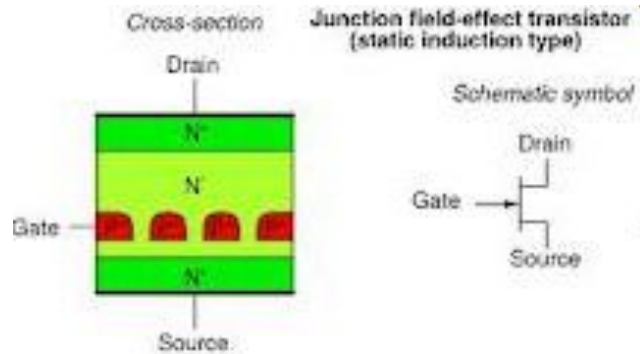


Полевой транзистор — полупроводниковый прибор, в котором ток изменяется в результате действия перпендикулярного току электрического поля, создаваемого входным сигналом.



Исходным полупроводником для полевых транзисторов обычно является кремний, то в качестве диэлектрика используется слой двуокиси кремния SiO_2 , выращенный на поверхности кристалла кремния путём высокотемпературного окисления.

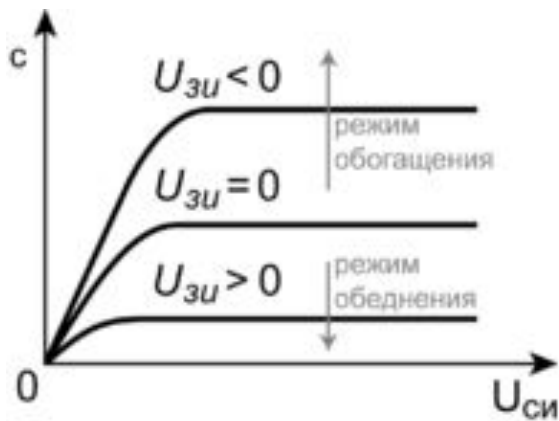
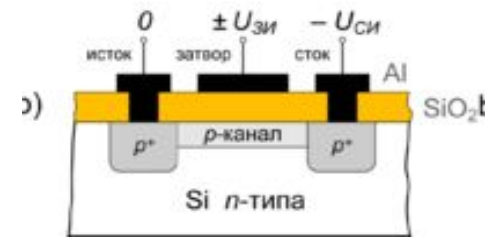
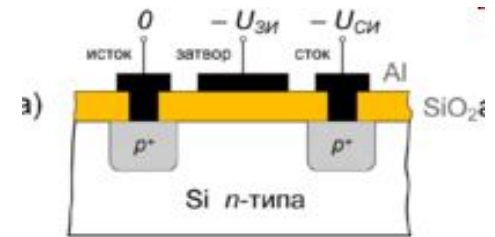
На слой диэлектрика нанесён металлический электрод — затвор.



Получается структура, состоящая из металла, диэлектрика и полупроводника, или МДП-транзистор.

В МДП-транзисторах с индуцированным каналом проводящий канал между сильнолегированными областями истока и стока отсутствует и, следовательно, заметный ток стока появляется только при определённой полярности и при определённом значении напряжения на затворе относительно истока, которое называют пороговым напряжением ($U_{ЗИпор}$).

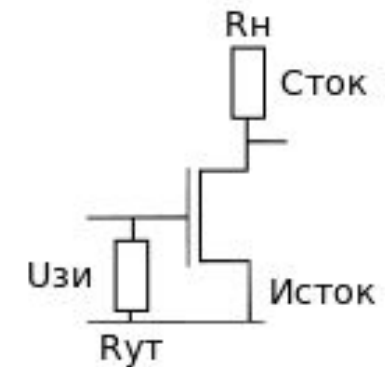
В МДП-транзисторах со встроенным каналом у поверхности полупроводника под затвором при нулевом напряжении на затворе относительно истока существует инверсный слой — канал, который соединяет исток со стоком.



a)



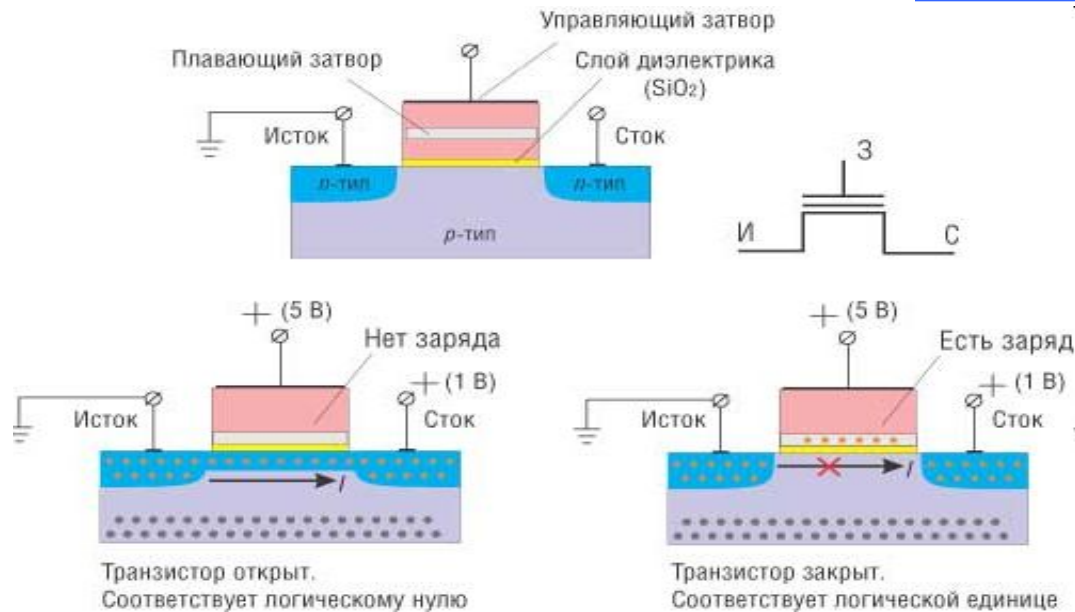
b)



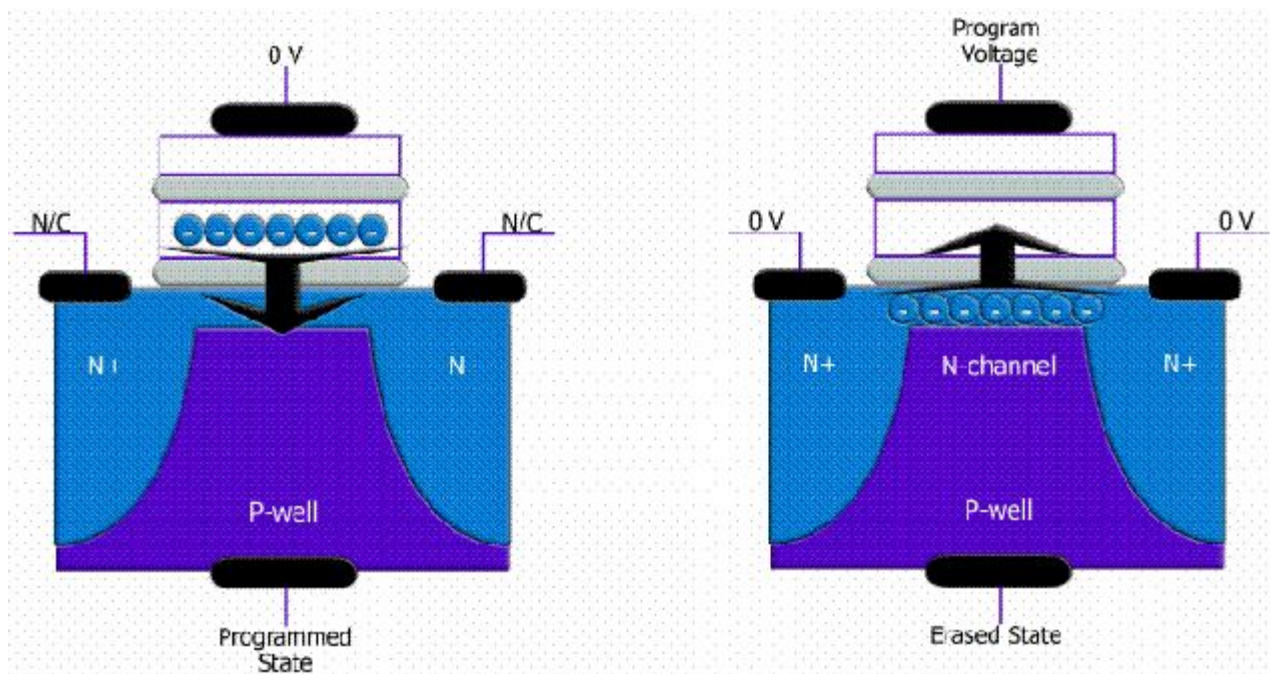
Рассмотрим сначала ситуацию, когда на плавающем затворе нет электронов.

При подаче на управляющий затвор положительного напряжения $+U$ (инициализация ячейки памяти) он будет находиться в открытом состоянии, что соответствует логическому нулю "0".

Если же на плавающем затворе помещен избыточный отрицательный заряд (электроны), то даже при подаче положительного напряжения на управляющий затвор он компенсирует создаваемое управляющим затвором электрическое поле и не дает образовываться каналу проводимости, то есть транзистор будет находиться в закрытом состоянии.



Наличие или отсутствие заряда на плавающем затворе однозначно определяет состояние транзистора (открыт или закрыт) при подаче одного и того же положительного напряжения на управляющий затвор.

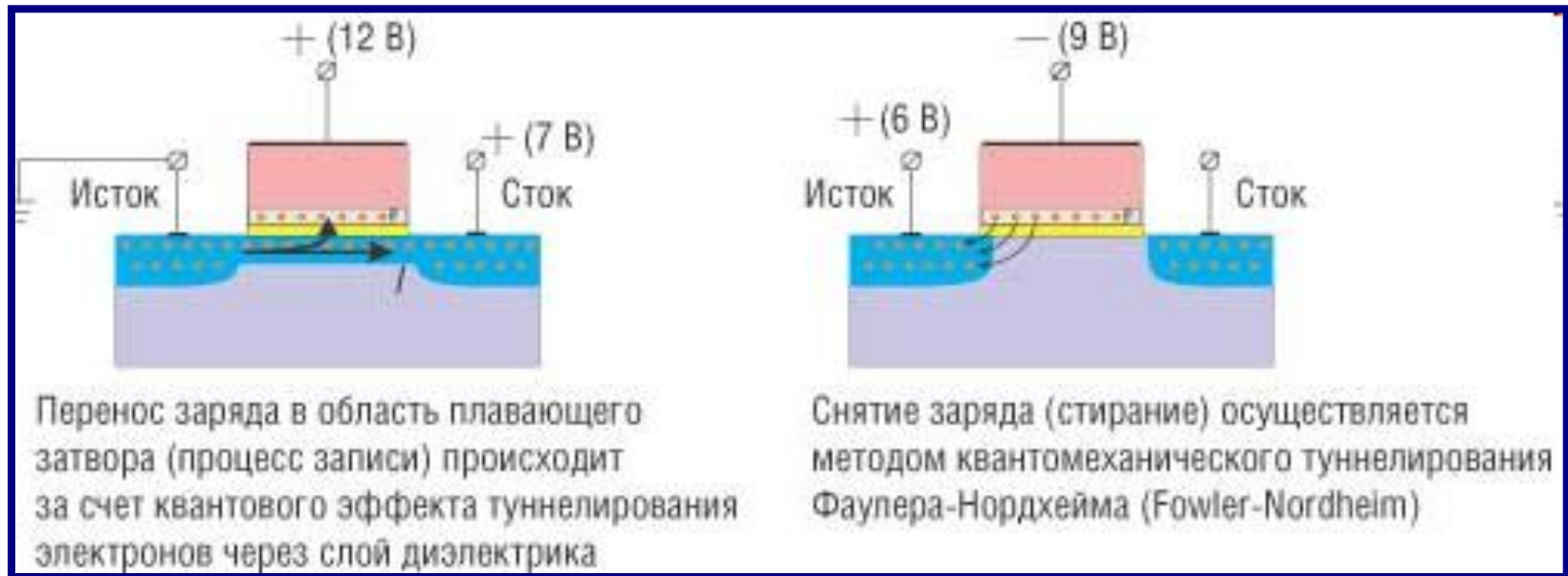


Если подачу напряжения на управляющий затвор трактовать как инициализацию ячейки памяти, то по напряжению между истоком и стоком можно судить о наличии или отсутствии заряда на плавающем затворе.

Получается своеобразная элементарная ячейка памяти, способная сохранять один информационный бит.

При этом важно, чтобы заряд на плавающем затворе (если он там имеется) мог сохраняться там как угодно долго как при инициализации ячейки памяти, так и при отсутствии напряжения на управляющем затворе.

В этом случае ячейка памяти будет энергонезависимой. Осталось лишь придумать, каким образом на плавающий затвор помещать заряд (записывать содержимое ячейки памяти) и удалять его оттуда (стирать содержимое ячейки памяти) в случае необходимости.

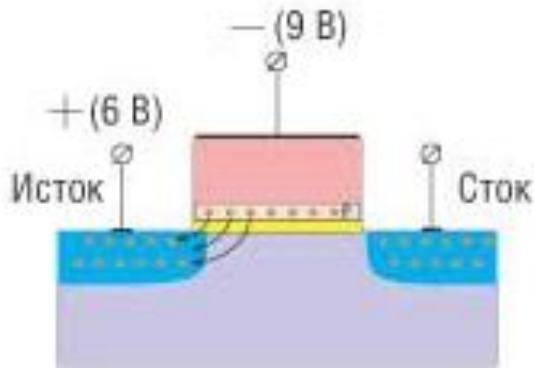


Помещение заряда на плавающий затвор (процесс записи) реализуется либо методом инжекции горячих электронов (CHE-Channel Hot Electrons), либо методом туннелирования Фаулера-Нордхейма (аналогично тому, как это делается при удалении заряда)

$$i = aE^2 \exp \frac{-b\varphi^{3/2}}{E},$$

где i — плотность тока эмиссии, E — напряжённость электрического поля — напряжённость электрического поля, φ — работа выхода, функции a и b зависят от геометрии и работы выхода.

Туннельная эмиссия металлов характеризуется высокими предельными плотностями тока до величин $j \sim 10^{10} \text{ A/cm}^2$

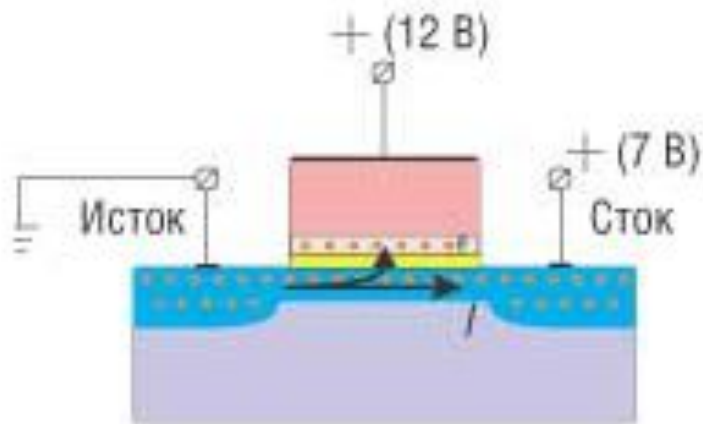


С ростом температуры и понижением E так называемая термоавтоэлектронная эмиссия смыкается с термоэлектронной эмиссией, усиленной полем (Шотки эффектом).

Снятие заряда (стирание) осуществляется методом квантомеханического туннелирования Фаулера-Нордхейма (Fowler-Nordheim)

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

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 вольтамперные характеристики транзистора.



Перенос заряда в область плавающего затвора (процесс записи) происходит за счет квантового эффекта туннелирования электронов через слой диэлектрика

Такие электроны называют "горячими" за то, что обладают высокой энергией, достаточной для преодоления потенциального барьера, создаваемого тонкой плёнкой диэлектрика.

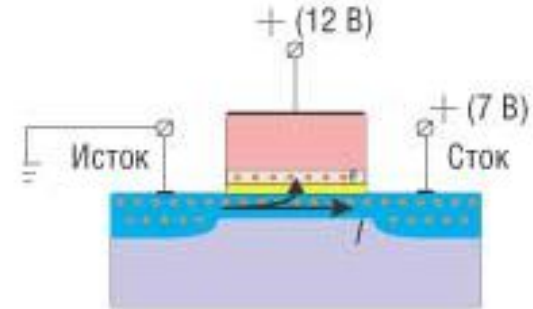
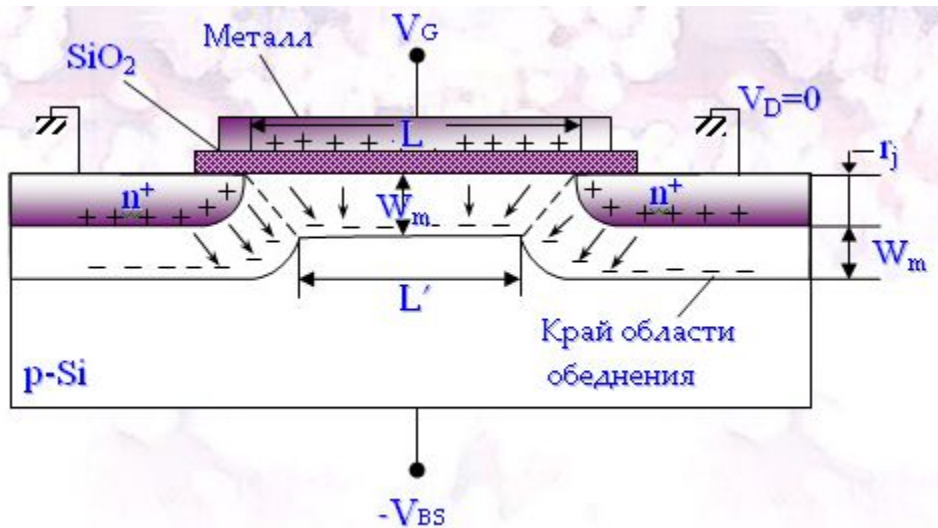
В этом случае электроны из истока будут инжектироваться непосредственно в объем обедненной области канала, где они подхватываются электрическим полем и сразу же коллектируются стоком.

Напряжение на стоке, требуемое для такого смыкания, равно:

$$V_{pt} \cong \frac{q \cdot N_A \cdot (L - y_s)^2}{2 \cdot \epsilon_s} - V_{bi}$$

$$V_{pt} \cong \frac{q \cdot N_A \cdot (L - y_s)^2}{2 \cdot \epsilon_s} - V_{bi}$$

$V_{bi} = \Delta\phi_{ms}$ - контактная разность перехода,
 L - длина трапеции у поверхности,
 N_A - концентрация примеси



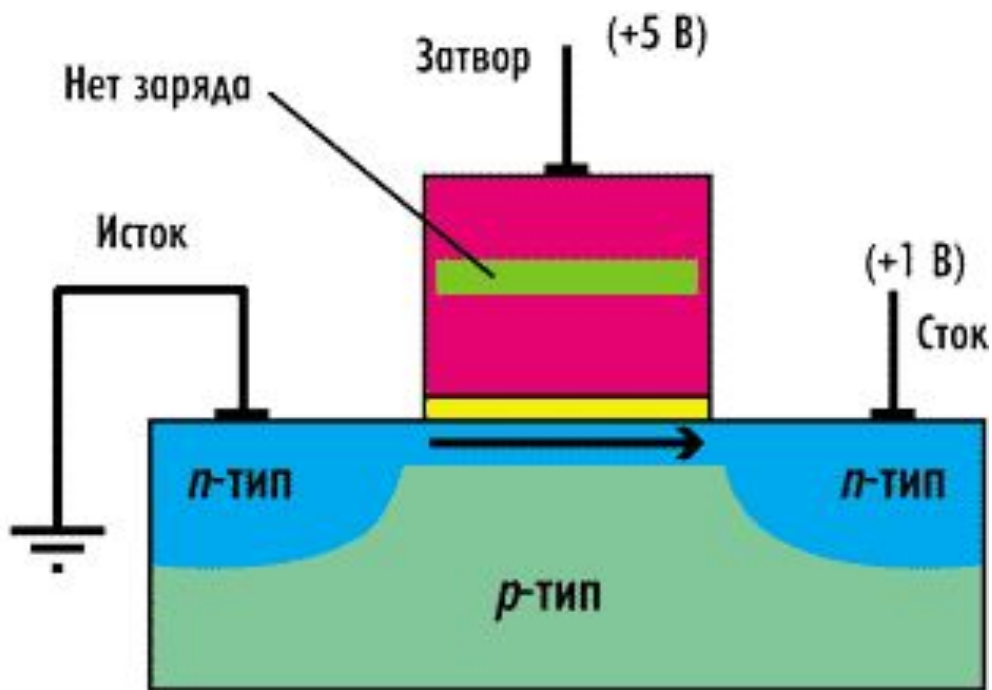
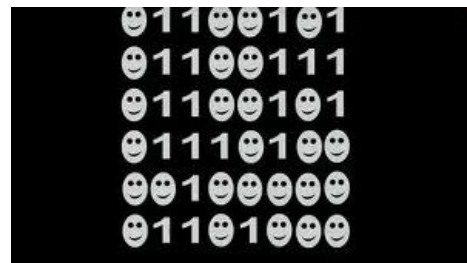
Перенос заряда в область плавающего затвора (процесс записи) происходит за счет квантового эффекта туннелирования электронов через слой диэлектрика

При использовании метода инжекции горячих электронов на сток и управляющий затвор подается высокое напряжение, чтобы придать электронам в канале энергию, достаточную для преодоления потенциального барьера, создаваемого тонким слоем диэлектрика, и туннелировать в область плавающего затвора (при чтении на управляющий затвор подается меньшее напряжение и эффекта туннелирования не наблюдается).



Чтение при отсутствии заряда

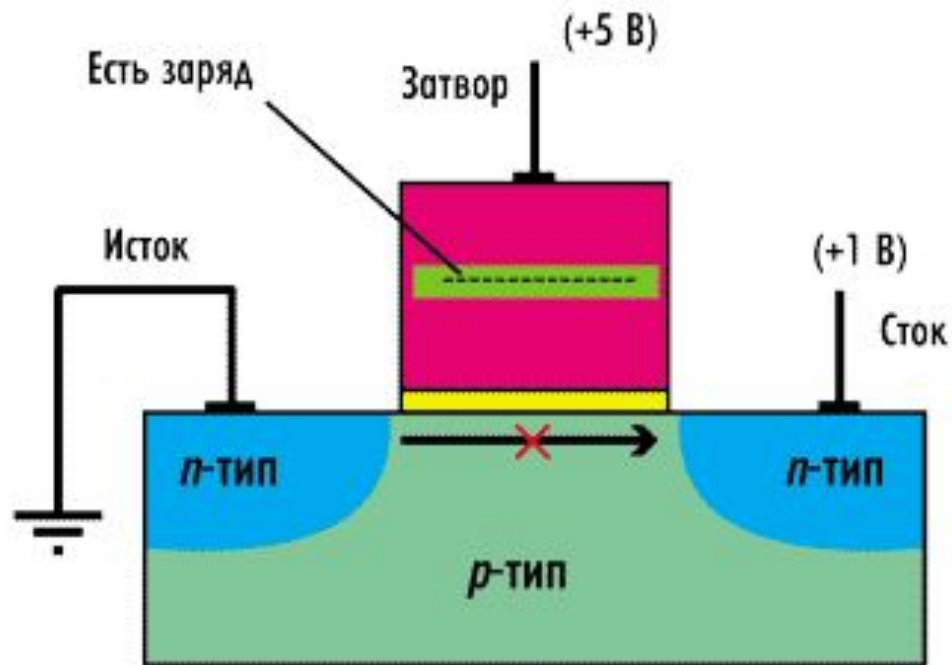
При чтении, в отсутствие заряда на "плавающем" затворе, под воздействием положительного поля на управляющем затворе, образуется n-канал в подложке между истоком и стоком, и возникает ток.



При отсутствии заряда на плавающем затворе ведет себя как обычный MOSFET-транзистор

Чтение при наличии заряда

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



При наличии заряда на плавающем затворе нет канала проводимости даже при подаче напряжения на управляющий затвор



<http://hengooru.blogspot.com/2010/05/flash-1.html>

http://kit-e.ru/articles/memory/2009_10_33.php

<http://www.gliffer.ru/articles/elektronika-dlya-nachinayushchih--vzglyad-iznutri-flash-pamyat-i-ram/>

<http://www.ixbt.com/storage/flash-tech.shtml>

<http://www.compress.ru/article.aspx?id=12401&iid=472>

<http://hardwareguide.ru/%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%86%D0%B5%D1%81%D1%81%D0%BE%D1%80/process-ori-2012/>

<http://www.ixbt.com/storage/faq-flash-p0.shtml>

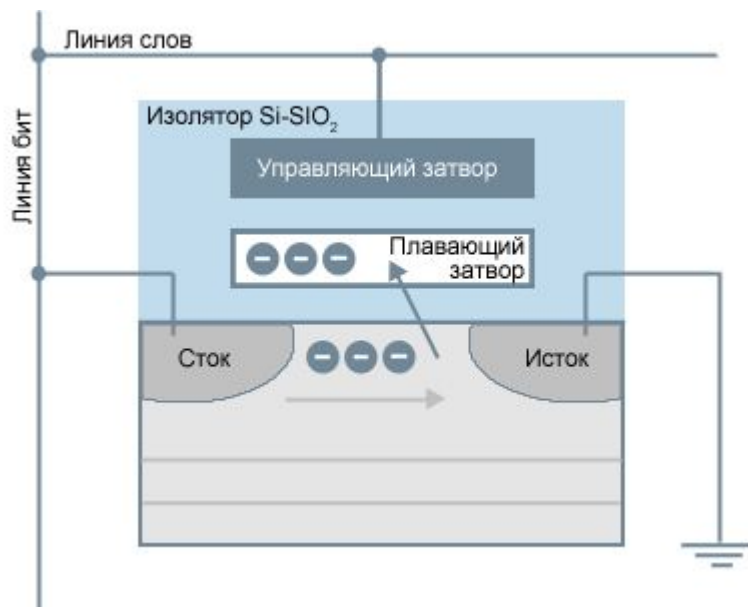
<http://www.ixbt.com/news/hard/index.shtml?06/08/52>

<http://www.ixbt.com/mainboard/flash.html>

Поскольку память с такой организацией считается первой представительницей семейства Flash, с нее и начнем.

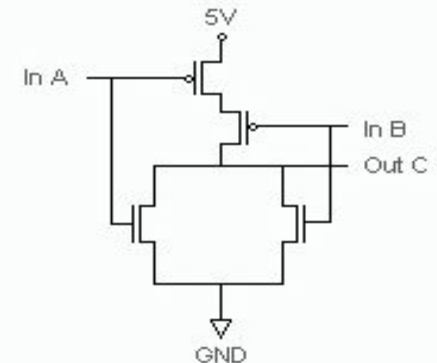
Схема логического элемента, собственно давшего ей название (NOR — Not OR — в булевой математике обозначает отрицание «ИЛИ»)

С помощью нее осуществляется преобразование входных напряжений в выходные, соответствующие «0» и «1». Они необходимы, потому что для чтения/записи данных в ячейке памяти используются различные напряжения.



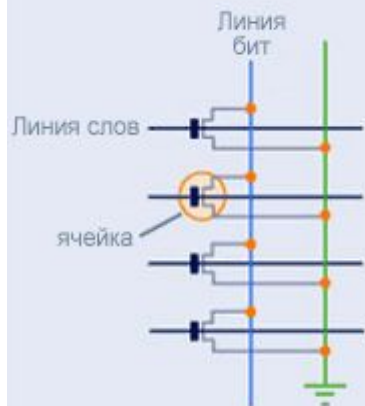
Она характерна для большинства флэш-чипов и представляет из себя транзистор с двумя изолированными затворами: управляющим (control) и плавающим (floating).

Важной особенностью последнего является способность удерживать электроны, то есть заряд. Также в ячейке имеются так называемые «сток» и «исток». При программировании между ними, вследствие воздействия положительного поля на управляющем затворе, создается канал — поток электронов.



A	B	C(or)	C(nor)
0	0	0	1
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	1	0

архитектура NOR



Некоторые из электронов, благодаря наличию **большой энергии**, преодолевают слой изолятора и попадают на **плавающий затвор**, где могут храниться в течение нескольких лет.

Определенный диапазон количества электронов (заряда) на **плавающем затворе** соответствует **логической единице**, а все, что больше его, — **нулю**.

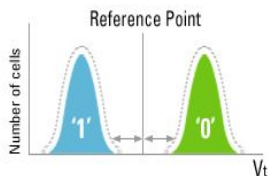
При чтении эти состояния распознаются путем измерения порогового напряжения транзистора.

Для стирания информации на управляющий затвор подается высокое отрицательное напряжение, и электроны с плавающего затвора переходят (туннелируют) на исток.

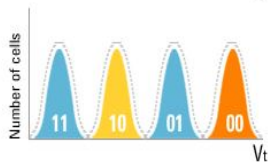
В технологиях различных производителей этот принцип работы может отличаться по способу подачи тока и чтению данных из ячейки.

Для хранения 1 бита информации задействуется только один элемент (транзистор), в то время как в энергозависимых типах памяти для этого требуется несколько транзисторов и конденсатор.

SLC
One bit per cell



MLC
Two bits per cell



Но и один бит далеко не предел: **Intel** уже выпускает память **StrataFlash**, каждая ячейка которой может хранить **по 2 бита** информации. Кроме того, существуют пробные образцы, с **4-х** и даже **9-и** битными ячейками!

В такой памяти используются технология **многоуровневых ячеек**. Они имеют обычную структуру, а отличие заключается в том, что заряд их делится на несколько уровней, каждому из которых в соответствии ставится определенная комбинация бит.

NAND — Not AND — в той же булевой математике обозначает отрицание «И». Отличается такая память от предыдущей разве что логической схемой.

Устройство и принцип работы ячеек у нее такой же, как и у NOR.

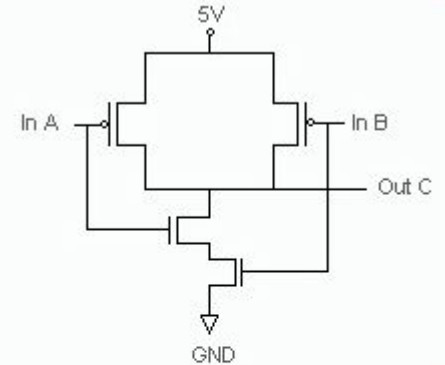
Хотя, кроме логики, все-таки есть еще одно важное отличие — архитектура размещения ячеек и их контактов.

В отличие от вышеописанного случая, здесь имеется *контактная матрица, в пересечениях строк и столбцов которой располагаются транзисторы.*

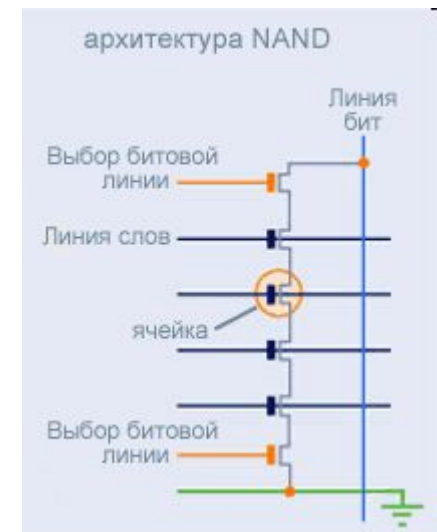
Это сравнимо с пассивной матрицей в дисплеях (а NOR — с активной TFT).

В случае с памятью такая организация несколько лучше — площадь микросхемы можно значительно уменьшить за счет размеров ячеек.

Недостатки заключаются в более низкой по сравнению с NOR скорости работы в операциях побайтового произвольного доступа.



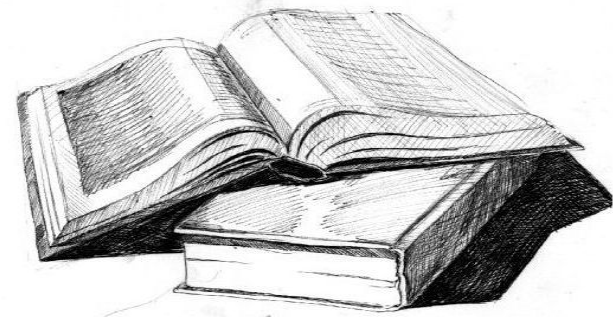
A	B	C(and)	C(nand)
0	0	0	1
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0





Используемые Интернет-ресурсы:

- <http://ru.wikipedia.org/wiki/Флеш-память>
- http://www.ak-cent.ru/?parent_id=9962
- <http://www.ixbt.com/storage/flash-tech.shtml>
- http://www.storagereview.com/ssd_architecture
- http://www.easycom.com.ua/storag/diski_ssd_na_osnove_nand-pamyati_tehnologii_prinzip_rabotye_raznoovidnosti/?lang=ru



Используемая литература



- Скотт Мюллер. Модернизация и ремонт ПК = *Upgrading and Repairing PCs*. — 17-е изд. — М.: Вильямс, 2007. — С. 653—700. — ISBN 0-7897-3404-4
- Книга «Архитектура ЭВМ», автор Мюллер
- Книга «Архитектура ЭВМ», автор Танненбаум
- Книга «Архитектура ЭВМ», автор Гук
- Журнал Технической Физики, том 74, выпуск 7 «Магнитные свойства нанокристаллических пленок», автор Фролов
- *Book of Abstracts: Proceedings of Joint European Magnetic Symposia 13-17 September, 2008. - Dublin, Ireland. - 2008.*
- *Book of Abstracts: International Workshop on Structural and Mechanical Properties of Metallic Glasses IWMG09, 2009: Books of Abstracts 17-19 June 2009. - Barselona, Spain, 2009.*
- *Book of Abstracts: Joint European Magnetic Symposia 2010 (JEMS 2010): 23-28 August 2010 - Krakow, Poland, 2010*

