

# 1 Физические основы

## 1.1 Полупроводники\*

Многие вещества в кристаллическом состоянии не являются такими хорошими проводниками, как металлы, но их нельзя отнести и к диэлектрикам. Эти вещества - полупроводники.

### 1.1.1 Природа электрического тока в полупроводниках

Экспериментально установлено, что электрический ток в полупроводниках не сопровождается переносом вещества - никаких химических изменений с ним не происходит. Отсюда следует, что носителями тока в полупроводниках, как и в металлах, являются электроны. Однако между полупроводниками и металлами имеются и глубокие различия.

Электроны металлов, находящиеся на внешних электронных оболочках (валентные электроны), сравнительно слабо связаны с атомами. Поэтому эти электроны (электроны проводимости) сравнительно легко отделяются от атомов и образуют электронный газ, концентрация которого очень велика. Эти электроны принадлежат всей кристаллической решетке и легко перемещаются по всему проводнику. Именно с этим связана высокая проводимость металлов.

В полупроводниках валентные электроны значительно сильнее связаны с атомами. Поэтому концентрация электронов проводимости при комнатной температуре в полупроводниках незначительна.

### 1.1.2 Донорные и акцепторные примеси

Свойства полупроводников сильно зависят от содержания примесей.

Пусть, например, в кристалле кремния имеется примесь пентавалентных электронов мышьяка, которые замещают в узлах кристаллической решетки атомы кремния. Пентавалентный атом мышьяка вступает в ковалентные связи с четырьмя атомами кремния (у кремния валентность четыре), а его пятый электрон оказывается незанятым в связях.

Энергия, необходимая для отрыва пятого электрона от атома мышьяка в кристалле кремния значительно больше энергии, необходимой для отрыва электрона от атома кремния. Поэтому при комнатной температуре значительная часть атомов мышьяка лишается одного из своих электронов и становится положительными ионами.

Положительный ион мышьяка не может захватить электрон у одного из соседних атомов кремния, т.к там энергия связи больше. Поэтому дырочной проводимости нет. Примеси, поставляющие электроны проводимости без возникновения равного им количества "дырок" называются *донорными*.

Полупроводниковый кристалл, содержащий донорные примеси, называется *электронным* полупроводником или полупроводником *n*-типа.

Логично, что если добавим в кристалл примесь трехвалентного элемента, то получим избыток "дырок". Такие примеси называются *акцепторными*, а полупроводниковые

кристаллы, содержащие такие примеси, называются *дырочными* полупроводниками или полупроводниками *p*-типа.

## 1.2 p-n-переход\*

Электронно-дырочный переход, или, сокращенно *p – n*-переход, является границей, разделяющей области с дырочной(*p*) и электронной(*n*) проводимостями в одном и том же монокристалле.

Пограничная область раздела полупроводников с различным типом проводимости (она называется *запирающим слоем*) в связи с уходом свободных электронов практически превращается в диэлектрик.

Если *p – n*-переход соединить с источником тока так, чтобы с его положительным полюсом была соединена область с электронной проводимостью, то электроны в *n*-проводнике и "дырки" в *p*-проводнике удаляются внешним полем от запирающего слоя в разные стороны, увеличивая его толщину. Сопротивление *p – n*-перехода велико, сила тока мала и почти не зависит от напряжения.

Если *p – n*-переход соединить с источником тока так, чтобы с его положительным полюсом была соединена область с "дырочной" проводимостью, то переходы основных носителей тока через *p – n*-переход облегчаются. Двигаясь навстречу друг-другу, носители входят в запирающий слой, уменьшая его сопротивление.

Такие дела.

## 1.3 Транзисторы

Транзистор - полупроводниковый прибор с двумя *p – n*-переходами и тремя выводами.

### 1.3.1 Биполярный транзистор\*

С помощью соответствующих примесей в кристалле германия или кремния создают три области: между двумя областями *p*-типа создают слой 2 с проводимостью *n*-типа, называемый *базой* (рис. 8.37). Одна из разделенных областей называется *эмиттером*, а вторая *коллектором*. Таким образом, между эмиттером и базой, а также коллектором и базой создаются два *p – n*-перехода 4 и 6, пропускные направления которых противоположны. На рисунке 8.38 показано условное обозначение биполярных транзисторов.

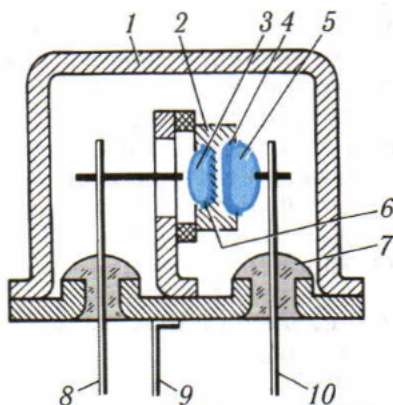


рис. 8.37

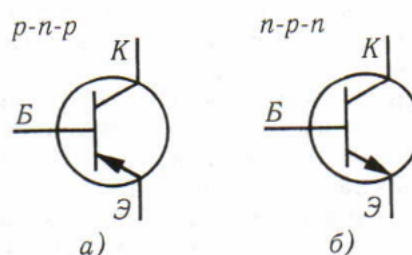
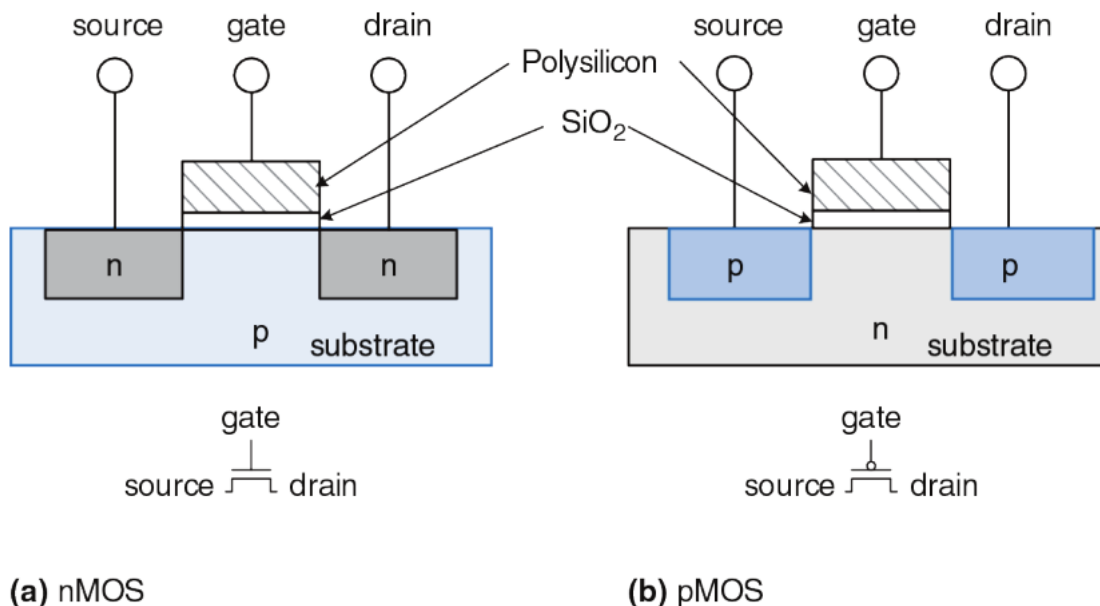


рис. 8.38

### 1.3.2 Полевые транзисторы

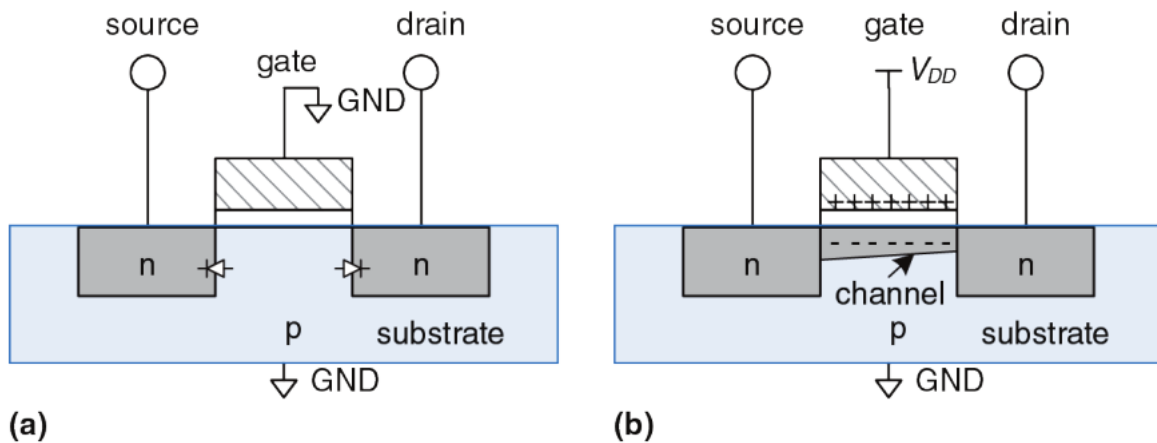
Существуют два вида полевых МОП-транзисторов: n-МОП и p-МОП (по английски n-MOS и p-MOS, что произносится как н-мосс и пи-мосс). На Рис. 1.29 схематически показано сечение каждого из этих двух типов транзисторов так, как будто мы распилили кристалл и теперь смотрим на транзистор сбоку. В транзисторах n-типа, называемых n-МОП, области, где расположены полупроводниковые примеси n-типа – в свою очередь называемые истоком (source) и стоком (drain) – находятся рядом с затвором (gate), причем вся эта структура размещается на подложке p-типа. В транзисторах же p-МОП и исток, и сток – это области p-типа, размещенные на подложке n-типа. Полевой МОП-транзистор ведет себя как переключатель, управляемый приложенным к нему напряжением. В таком транзисторе напряжение перехода создает электрическое поле, включающее или выключающее линию связи между источником и стоком. Термин полевой транзистор (field effect transistor) является прямым отражением принципа работы такого устройства. Знакомство с работой полупроводниковых устройств мы начнем с изучения n-МОП-транзистора.



**Рис. 1.29** n-МОП и p-МОП-транзисторы

Подложка n-МОП транзистора обычно находится под напряжением земли GND, которое является минимальным напряжением в системе. Для начала рассмотрим случай, когда, как показано на Рис. 1.30 (a), напряжение на затворе также равно 0 В. Диоды между истоком или стоком и подложкой находятся в состоянии, называемым обратным смещением (reverse bias), поскольку напряжение на истоке и стоке не является отрицательным. В результате этого канал для движения тока между истоком и стоком остается закрытым, а транзистор выключенным. Теперь рассмотрим ситуацию, когда напряжение на затворе повышается до  $V_{DD}$  – так, как показано на Рис. 1.30 (b). Если приложить положительное напряжение к затвору (верхней пластине конденсатора), то это создаст электрическое поле между затвором и подложкой, в результате в зоне между истоком и стоком под слоем оксисла формируется избыток электронов. При достаточно высоком напряжении на нижней границе затвора накапливается настолько много электронов, что область с полупроводником p-типа превращается в область с по-

лупроводником n-типа. Такая инвертированная область называется каналом (channel). В этот момент в транзисторе образуется область проводимости от источника n-типа, через каналы n-типа к стоку n-типа, и через этот канал электроны могут беспрепятственно перемещаться от истока к стоку. Транзистор включен.



**Рис. 1.30** Работа n-МОП-транзистора

## 2 Логические элементы

### 2.1 Логические вентили

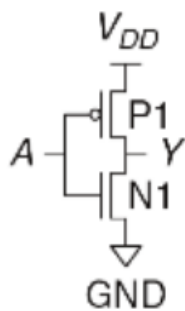
**Логический вентиль** - базовый элемент цифровой схемы, преобразующий входные сигналы в выходные в соответствии с какой-либо булевой функцией. В устройствах реализуется с помощью транзисторов.

<b>NOT</b>	$\neg x$		
<b>AND</b>	$x \wedge y$		
<b>OR</b>	$x \vee y$		
<b>NAND</b>	$\neg(x \wedge y)$		
<b>NOR</b>	$\neg(x \vee y)$		
<b>XOR</b>	$x \oplus y$		
<b>XNOR</b>	$\neg(x \oplus y)$		

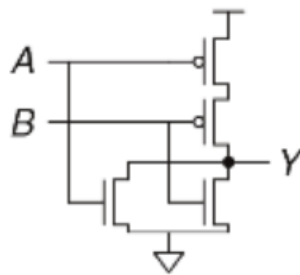
### 2.2 Реализация базовых элементов с помощью транзисторов

## 3 Комбинаторные схемы

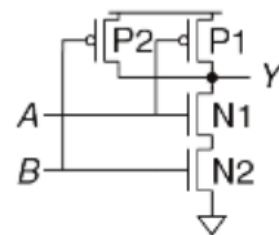
**Комбинаторные схемы** - схемы, зависящие только от своих входов.



**Рис. 1.32** Схема вентиля НЕ



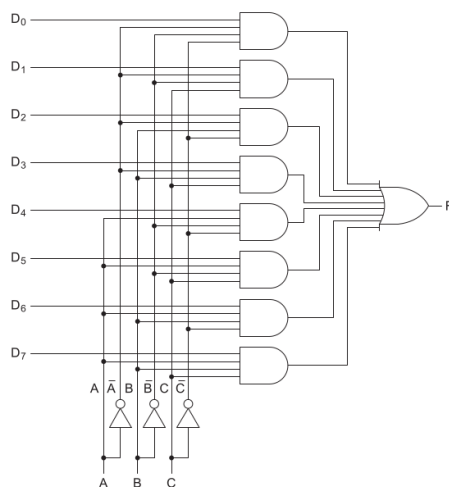
**Рис. 1.36** Схема вентиля ИЛИ-НЕ с двумя входами



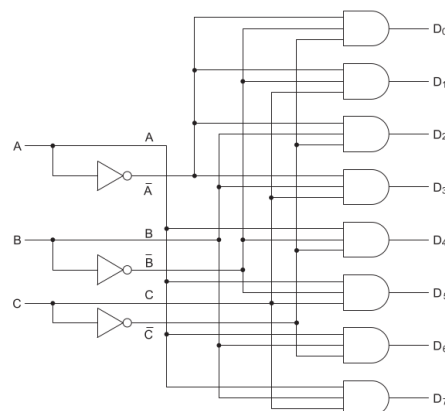
**Рис. 1.33** Схема вентиля И-НЕ с двумя входами

### 3.1 Мультиплексор

**Мультиплексор** - схема с  $2^n$  входами, одним выходом и  $n$  линиями управления, которые позволяют выбрать один из входов. Выбранный вход соединяется с выходом. На рисунке показана схема восьмивходового мультиплексора.



**Рис. 3.10.** Схема восьмивходового мультиплексора



**Рис. 3.12.** Схема декодера, содержащего 3 входа и 8 выходов

### 3.2 Демультимплексор

**Демультимплексор** соединяет единственный входной сигнал с одним из  $2^n$  выходов в зависимости от значений сигналов в  $n$  линиях управления. Если бинарное значение линий управления равно  $k$ , то выбирается выход  $k$ .

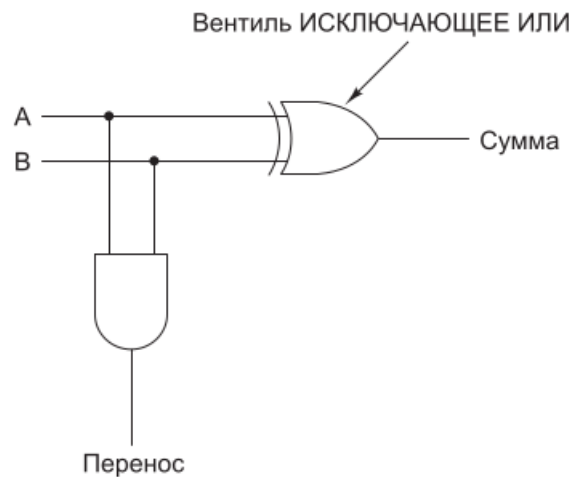
### 3.3 Дешифратор (декодер)

**Дешифратор** - схема, которая получает на входе  $n$ -разрядное число и использует его для того, чтобы выбрать (т.е. установить в значение 1) один из  $2^n$  выходов.

## 4 Арифметические схемы

### 4.1 Полусумматор

A	B	Сумма	Перенос
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

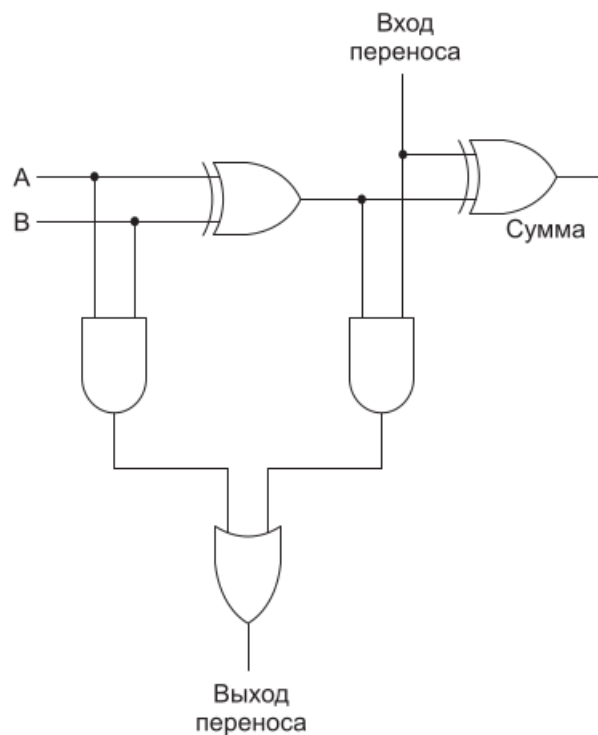


**Рис. 3.15.** Таблица истинности для сложения одnorазрядных чисел (а);  
схема полусумматора (б)

### 4.2 Сумматор

A	B	Вход переноса	Сумма	Выход переноса
0	0	0	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	0	1
1	1	0	0	1
1	1	1	1	1

а



б

**Рис. 3.16.** Таблица истинности для полного сумматора (а);  
схема для полного сумматора (б)

## 5 Последовательные схемы

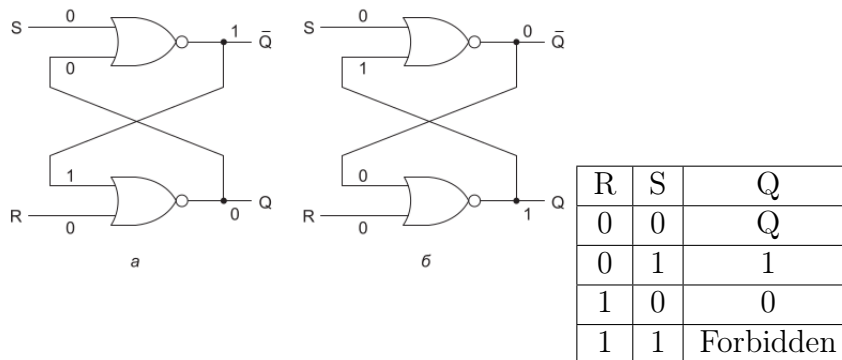
**Последовательная схема** зависит не только от своих текущих входов, но и от своего текущего состояния.

### 5.1 Триггеры

Вообще существуют триггеры (срабатывают по фронту или спаду импульса синхронизации) и защелки (срабатывают по уровню импульса синхронизации), но Скаков в разницу между ними не умеет (а вот Таненбаум умеет). Поэтому в этом конспекте все штуковины называются триггерами, даже когда они на самом деле защелки :(

#### 5.1.1 RS-триггер

Схема, изображенная на рис. 3.20, а, называется **RS-триггером**. У нее есть два входа: S (Setting — установка) и R (Resetting — сброс).



#### 5.1.2 Синхронный RS-триггер

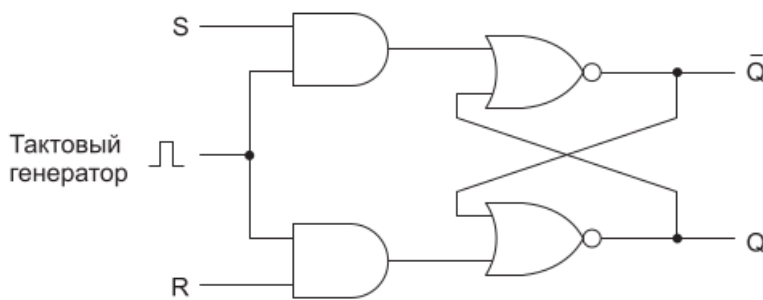


Рис. 3.21. Синхронная SR-защелка

Эта схема имеет дополнительный синхронизирующий вход, который по большей части равен 0. Если этот вход равен 0, то оба выхода вентилей И равны 0, и независимо от значений S и R триггер не меняет свое состояние. Когда значение синхронизирующего входа равно 1, действие вентилей И прекращается, и состояние триггера становится зависимым от S и R.

#### 5.1.3 Синхронный D-триггер

Чтобы разрешить ситуацию с неопределенностью SR-триггера (неопределенность возникает в случае, если  $S = R = 1$ ), нужно предотвратить ее возникновение. Пусть теперь у RS-триггера будет один вход, D.

$D = 0 \rightarrow R = 1, S = 0$

$D = 1 \rightarrow R = 0, S = 1$

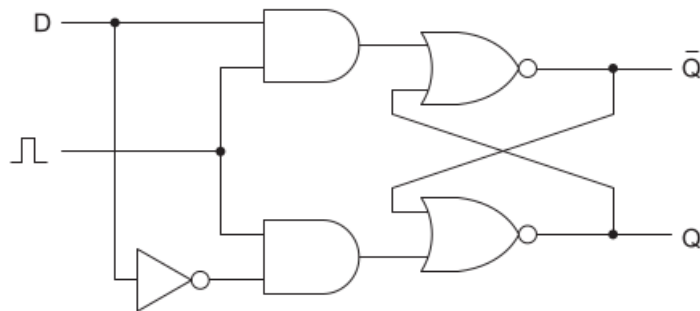
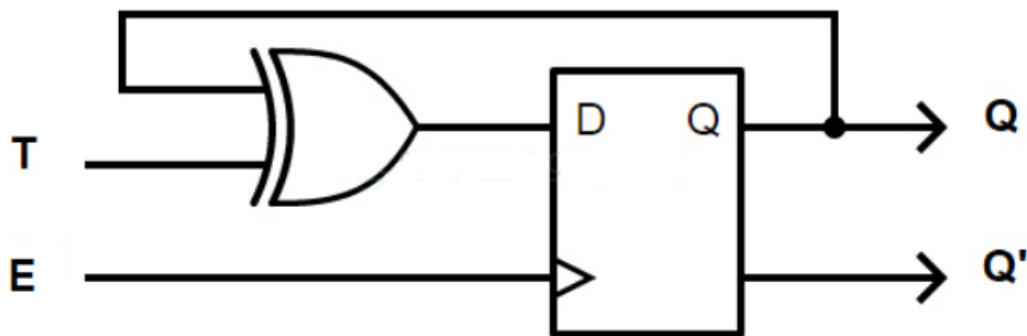


Рис. 3.22. Синхронная D-защелка

#### 5.1.4 Т-триггер

При  $T = 0$  не изменяет значения, при  $T = 1$  меняет значение на противоположное.



Внимание, так как это действительно *триггер*, а не защелка, срабатывает при изменении импульса синхронизации с 0 на 1!

#### 5.1.5 JK-триггер

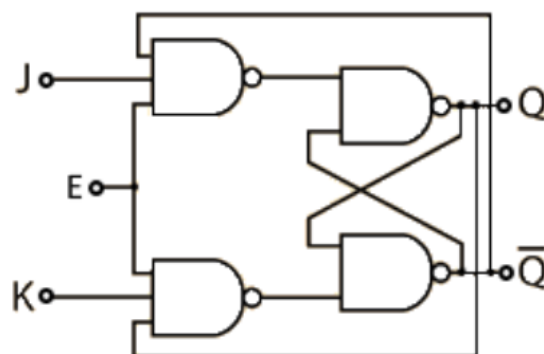


Рис. 1: JK-триггер нормального человека

При  $J = 0, K = 0 \rightarrow$  сохраняет значение

При  $J = 0, K = 1 \rightarrow$  дает на выходе 0



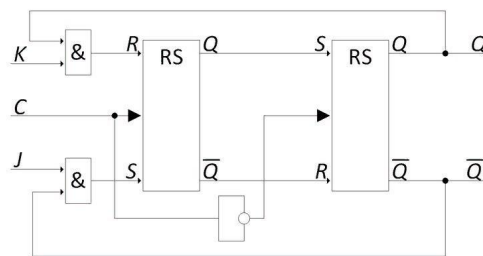


Рис. 2: JK-триггер Скакова (можно прогуглить что-то похожее как Master-Slave JK Flip Flop)

При  $J = 1, K = 0 \rightarrow$  дает на выходе 1

При  $J = 1, K = 1 \rightarrow$  инвертирует значение

**Внимание, так как это действительно *триггер*, а не защелка, срабатывает при изменении импульса синхронизации с 0 на 1!**

J	K	C	$Q_1$	Q
0	1	1	0	0
0	1	0	0	0
1	1	0	1	0
1	1	1	1	1
1	1	0	0	1
0	0	0	0	1
0	0	1	0	0

Таблица 1: Как сломать JK-триггер с перемещенным инвертором?

$Q_1$  - выход первого RS-триггера

## 6 Регистры

Существуют различные конфигурации триггеров. На рис. 3.26 показано, как восемь триггеров объединяются для формирования 8-разрядного регистра. Регистр получает 8-разрядное входное значение ( $I_0 - I_7$ ) при изменении синхронизирующего сигнала СК. Все синхронизирующие линии связаны с одним входным сигналом СК, чтобы при изменении состояния СК регистр получал новое 8-разрядное значение данных с входной шины. Триггеры запускаются при переходе от 0 к 1. Все восемь сигналов очистки тоже объединены, поэтому когда сигнал сброса CLR переходит в состояние 0, все триггеры переходят в состояние 0. Если вам не понятно, почему синхронизирующий сигнал СК инвертируется на входе, а затем инвертируется снова в каждом триггере, то ответ прост: входной сигнал не имеет достаточной мощности, чтобы запустить все восемь триггеров; входной инвертор на самом деле используется в качестве усилителя.

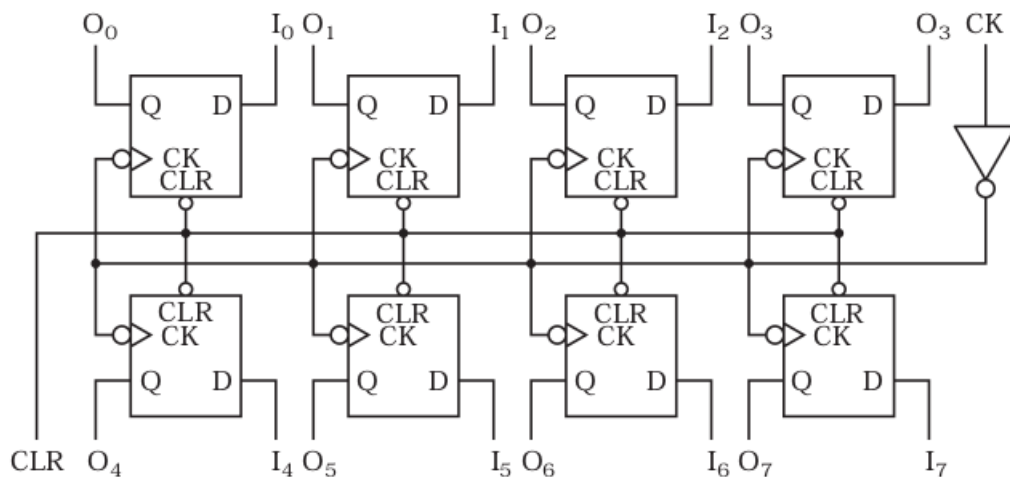
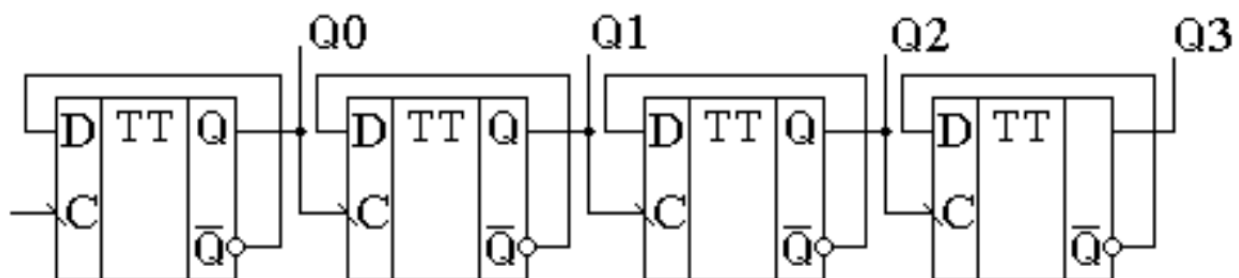


Рис. 3.26. 8-разрядный регистр, построенный из одноразрядных триггеров

## 7 Счетчик

**Счетчик** - устройство, предназначенное для счета количества тактов, используется, например, для деления частоты и в схемах таймеров, а также для выбора инструкций из ПЗУ в микропроцессорах.

Простой двоичный счетчик реализуется на основе Т-триггеров.



Если долго смотреть на картинку, можно даже понять как именно эта штука работает.

## 8 Источники информации

1. Разделы про полупроводники и биполярные транзисторы - учебник физики 10 класс А.А. Пинский, О. Ф. Кабардин
2. Полевые транзисторы, базовые элементы с помощью транзисторов - Д. Харрис, С. Харрис "Цифровая схемотехника и архитектура компьютера"
3. Комбинаторные, арифметические и последовательные схемы - Э. Таненбаум "Архитектура компьютера"
4. Последовательные схемы, регистры, счетчик - конспекты прошлого года + википедия