

# Языки описания схем

(mk.cs.msu.ru → Лекционные курсы → Языки описания схем)

## Блок 3

Как устроена цифровая аппаратура

Лектор:

**Подымов Владислав Васильевич**

Немного физики:

как схемы из функциональных элементов  
связаны с реальным миром

E-mail:

**valdus@yandex.ru**

# Вступление

ФЭ отрицания:

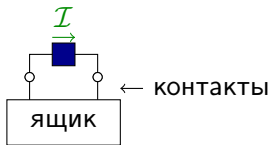


Элемент отрицания — это математическая абстракция реального объекта, в который можно посылать булево значение и получать отрицание этого значения

- ▶ Как выглядит этот объект?
- ▶ Как послать булево значение?
- ▶ Как получить и использовать отрицание значения?

# Как устроена цифровая аппаратура

Как правило, цифровая аппаратура — это “чёрный ящик”, содержащий контакты, к которым можно подсоединить провода

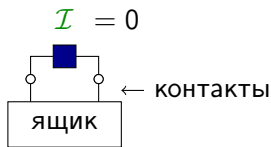


Пару контактов (○ ○) можно соединить **проводником**

Если по **проводнику** потёк желаемый **электрический ток**, значит, на паре (○ ○) **выставлено значение 1**

# Как устроена цифровая аппаратура

Как правило, цифровая аппаратура — это “чёрный ящик”, содержащий контакты, к которым можно подсоединить провода



Пару контактов (○ ○) можно соединить **проводником**

Если же **тока** в **проводнике** нет, значит, на паре (○ ○) выставлено значение **0**

# Немного физики: закон Ома

## Закон Ома:

$$U = IR$$

- ▶  $I$  — **сила тока** в проводнике, то есть то, насколько много электронов протекает через проводник в единицу времени
  - ▶ единица измерения: **ампер, A**
- ▶  $R$  — **сопротивление** проводника, то есть то, сколько усилий нужно приложить, чтобы переместить каждый электрон через проводник в единицу времени
  - ▶ единица измерения: **Ом,  $\Omega$**
- ▶  $U$  — **напряжение** между концами проводника, то есть те самые усилия, которые прикладываются для перемещения электронов через проводник
  - ▶ единица измерения: **вольт, В, V**

# Немного физики: закон Ома

Наиболее “управляемый” параметр в законе Ома — это напряжение:

- ▶ 220В — напряжение в розетках электрической сети квартиры
- ▶ 5В — напряжение в проводах питания USB
- ▶ 12/19/...В — напряжение питания ноутбука
- ▶ 3.3/5/12/...В — напряжения компонентов материнской платы компьютера
- ▶ ...
- ▶ логический ноль и логическая единица, выставленные на паре контактов, — это заданные уровни напряжения

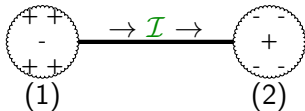
А что такое напряжение?

# Немного физики: напряжение

Напряжение — это работа по перемещению единичного заряда из начальной точки в конечную

Если отбросить многие нюансы: напряжение между двумя точками — это разность **потенциалов** между этими точками

Потенциал — это особое число, которое можно коротко описать так:



(1): много положительных зарядов  $\Rightarrow$  высокий потенциал

(2): много отрицательных зарядов  $\Rightarrow$  низкий потенциал

Отрицательные заряды притягиваются к положительным, и если соединить (1) и (2) проводником, то по нему потечёт **ток**

Чем больше разность зарядов между (1) и (2),

тем выше напряжение между ними,

и тем больший ток будет течь по проводнику

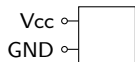
## Vcc и GND, единица и ноль

У электронного прибора обычно есть **вилка**: два контакта, втыкающиеся в розетку (*обычно больше двух, но не будем углубляться в подробности*)



На контакты розетки извне подаётся требуемое напряжение (*например, переменные 220В в домашней розетке*)

У цифровой аппаратуры обычно тоже есть такая “вилка” — два контакта с постоянным потенциалом (напряжением<sup>1</sup>), подаваемым извне:



- ▶  $V_{cc}^2$  (или  $V_{dd}^2$ ): контакт с высоким напряжением и соответствующее напряжение
- ▶  $GND^3$  (или  $V_{ss}^2$ ): контакт с низким напряжением и соответствующее напряжение

---

<sup>1</sup> Схемотехники не любят слово “потенциал”

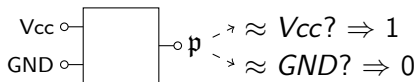
Потенциал точки — это напряжение между ней и нолевым потенциалом

<sup>2</sup> “cc” = “common collector”, “d” = “drain”, “s” = “sink”, но можно об этом не думать

<sup>3</sup> **GROUND**: потенциал земли, часто считается нолевым



## Vcc и GND, единица и ноль



Каждая точка  $p$  аппаратуры также обладает некоторым потенциалом

Если потенциал точки  $p$  (*приблизительно*) равен

- ▶  $GND$ , то в этой точке схемы выставлено значение 0
- ▶  $V_{cc}$ , то в этой точке схемы выставлено значение 1

В современной цифровой схемотехнике основное внимание уделяется **микросхемам**: аппаратуре, содержащей очень много деталей (*транзисторов — о них речь пойдёт дальше*) в очень маленьком ящике — до сотен миллионов деталей на квадратный миллиметр в один слой

И как же запихнуть СФЭ в реальный и очень маленький ящик?

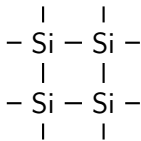
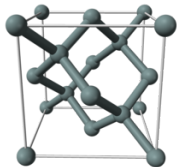
## Немного физики: полупроводники

Современные микросхемы, как правило, основаны на полупроводниках

**Полупроводник** — это материал, в зависимости от внешних условий и уровня подаваемого напряжения способный вести себя и как проводник, и как диэлектрик

Полупроводники, используемые в цифровых схемах, получают добавлением примесей в кристаллы кремния (Si):

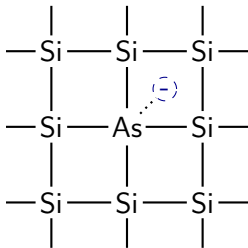
*решётка кристалла Si    схематичное двумерное изображение*



Кристаллический кремний сам по себе не очень удобный полупроводник: он имеет 4 валентных электрона, и все они крепко заняты связями кристаллической решётки

## Немного физики: полупроводники

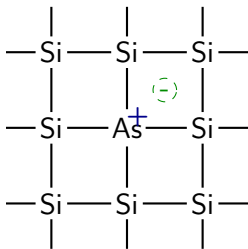
В качестве примеси можно вкратить в решётку кремния мышьяк (As):



Мышьяк имеет 5 валентных электронов, из них 4 связаны кристаллической решёткой

## Немного физики: полупроводники

В качестве примеси можно вкратить в решётку кремния мышьяк (As):



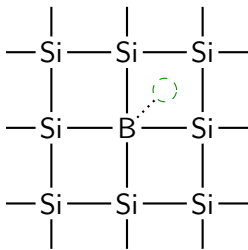
Мышьяк имеет 5 валентных электронов, из них 4 связаны кристаллической решёткой

Оставшийся электрон при небольших усилиях отрывается от атома и передвигается по кристаллической решётке, и так возникает проводимость

Это полупроводник **n-типа** (negative charge)

## Немного физики: полупроводники

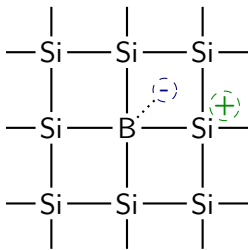
В качестве примеси можно вкратить в решётку кремния бор (B):



Бор имеет 3 валентных электрона, и для связей кристаллической решётки используются они и ещё один электрон бора

## Немного физики: полупроводники

В качестве примеси можно вкратить в решётку кремния бор (B):



Бор имеет 3 валентных электрона, и для связей кристаллической решётки используются они и ещё один электрон бора

На образовавшееся вакантное место при небольших усилиях переходит электрон с соседнего атома, и в этом атоме образуется **дырка** — так возникает дырочная проводимость

Это полупроводник **p-типа** (positive charge)

## Немного физики: диод

Если в цепи расположить рядом полупроводники  $n$ - и  $p$ -типов, то можно получить нетривиальную проводимость:



Это **полупроводниковый диод**, пропускающий ток в одну сторону и не пропускающий обратный ток:



## Немного физики: диод

Если в цепи расположить рядом полупроводники  $n$ - и  $p$ -типов, то можно получить нетривиальную проводимость:



Это **полупроводниковый диод**, пропускающий ток в одну сторону и не пропускающий обратный ток:





## Немного физики: диод

Если в цепи расположить рядом полупроводники n- и p-типов, то можно получить нетривиальную проводимость:



Это **полупроводниковый диод**, пропускающий ток в одну сторону и не пропускающий обратный ток:



## Немного физики: диод

Если в цепи расположить рядом полупроводники n- и p-типов, то можно получить нетривиальную проводимость:



Это **полупроводниковый диод**, пропускающий ток в одну сторону и не пропускающий обратный ток:



## Немного физики: диод

Если в цепи расположить рядом полупроводники n- и p-типов, то можно получить нетривиальную проводимость:



Здесь и дальше:  $\varphi\uparrow$  — высокий потенциал,  
 $\varphi\downarrow$  — низкий потенциал

Это **полупроводниковый диод**, пропускающий ток в одну сторону и не пропускающий обратный ток:



## Немного физики: диод

Если в цепи расположить рядом полупроводники n- и p-типов, то можно получить нетривиальную проводимость:



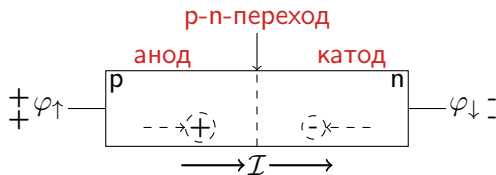
Здесь и дальше:  $\varphi_{\uparrow}$  — высокий потенциал,  
 $\varphi_{\downarrow}$  — низкий потенциал

Это **полупроводниковый диод**, пропускающий ток в одну сторону и не пропускающий обратный ток:



## Немного физики: диод

Если в цепи расположить рядом полупроводники n- и p-типов, то можно получить нетривиальную проводимость:



Здесь и дальше:  $\varphi_{\uparrow}$  — высокий потенциал,  
 $\varphi_{\downarrow}$  — низкий потенциал

Это **полупроводниковый диод**, пропускающий ток в одну сторону и не пропускающий обратный ток:



## Немного физики: диод

Если в цепи расположить рядом полупроводники n- и p-типов, то можно получить нетривиальную проводимость:



Здесь и дальше:  $\varphi_{\uparrow}$  — высокий потенциал,  
 $\varphi_{\downarrow}$  — низкий потенциал

Это **полупроводниковый диод**, пропускающий ток в одну сторону и не пропускающий обратный ток:



## Немного физики: диод

Если в цепи расположить рядом полупроводники n- и p-типов, то можно получить нетривиальную проводимость:



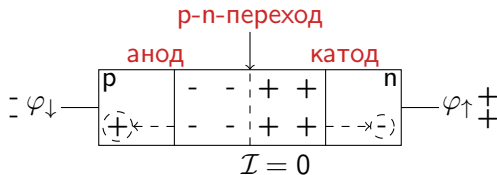
Здесь и дальше:  $\varphi_{\uparrow}$  — высокий потенциал,  
 $\varphi_{\downarrow}$  — низкий потенциал

Это **полупроводниковый диод**, пропускающий ток в одну сторону и не пропускающий обратный ток:



## Немного физики: диод

Если в цепи расположить рядом полупроводники n- и p-типов, то можно получить нетривиальную проводимость:



Здесь и дальше:  $\varphi_{\uparrow}$  — высокий потенциал,  
 $\varphi_{\downarrow}$  — низкий потенциал

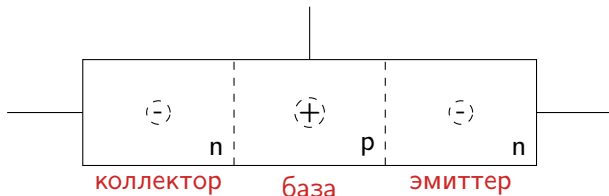
Это **полупроводниковый диод**, пропускающий ток в одну сторону и не пропускающий обратный ток:





# Немного физики: биполярный транзистор

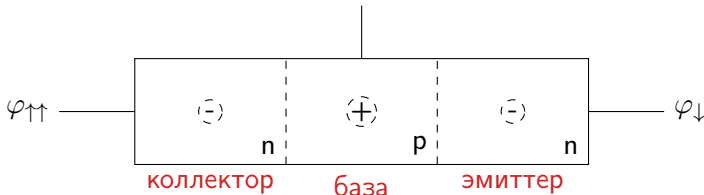
Ещё более нетривиальная проводимость получается, если расположить последовательно полупроводники n-, p- и снова n-типов:



Это биполярный pnp-транзистор: 

# Немного физики: биполярный транзистор

Ещё более нетривиальная проводимость получается, если расположить последовательно полупроводники n-, p- и снова n-типов:

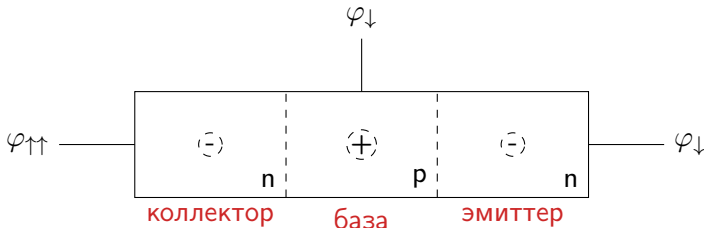


$\varphi_{\uparrow\uparrow}$  — очень высокий потенциал

Это биполярный pnp-транзистор:

# Немного физики: биполярный транзистор

Ещё более нетривиальная проводимость получается, если расположить последовательно полупроводники n-, p- и снова n-типов:

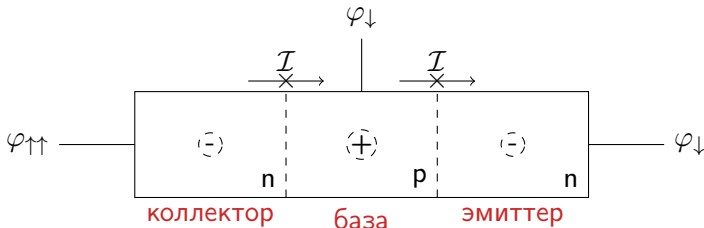


$\varphi \uparrow$  — очень высокий потенциал

Это биполярный pnp-транзистор: 

# Немного физики: биполярный транзистор

Ещё более нетривиальная проводимость получается, если расположить последовательно полупроводники n-, p- и снова n-типов:

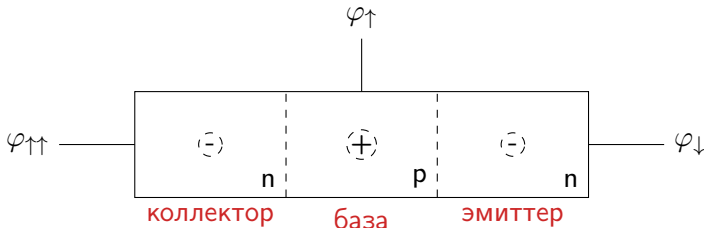


$\varphi_{\uparrow\uparrow}$  — очень высокий потенциал

Это биполярный pnp-транзистор:

# Немного физики: биполярный транзистор

Ещё более нетривиальная проводимость получается, если расположить последовательно полупроводники n-, p- и снова n-типов:

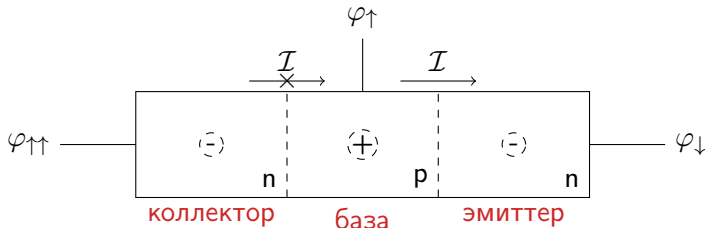


$\varphi_{\uparrow\uparrow}$  — очень высокий потенциал

Это биполярный pnp-транзистор: 

# Немного физики: биполярный транзистор

Ещё более нетривиальная проводимость получается, если расположить последовательно полупроводники n-, p- и снова n-типов:

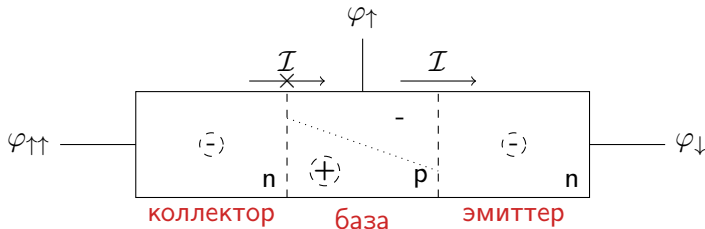


$\varphi_{\uparrow\uparrow}$  — очень высокий потенциал

Это биполярный pnp-транзистор:

# Немного физики: биполярный транзистор

Ещё более нетривиальная проводимость получается, если расположить последовательно полупроводники n-, p- и снова n-типов:

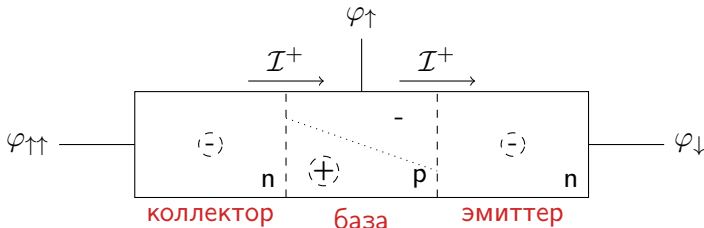


$\varphi_{\uparrow\uparrow}$  — очень высокий потенциал

Это биполярный pnp-транзистор:

# Немного физики: биполярный транзистор

Ещё более нетривиальная проводимость получается, если расположить последовательно полупроводники n-, p- и снова n-типов:



$\varphi_{\uparrow\uparrow}$  — очень высокий потенциал

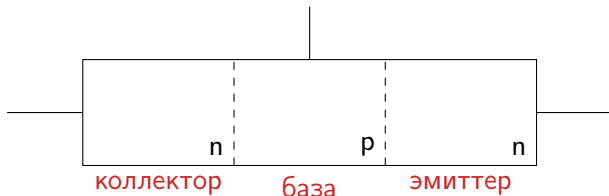
$I^+$  — очень сильный ток

Это биполярный pnp-транзистор:



# Немного физики: биполярный транзистор

Ещё более нетривиальная проводимость получается, если расположить последовательно полупроводники n-, p- и снова n-типов:



$\varphi \uparrow \uparrow$  — очень высокий потенциал

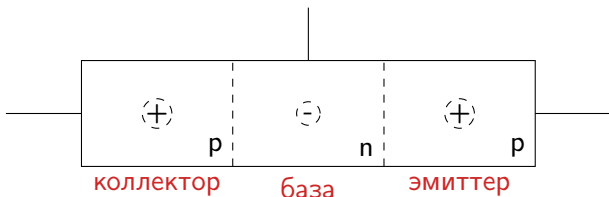
$I^+$  — очень сильный ток

Грубый итог: эмиттер и коллектор соединены проводящим каналом  $\Leftrightarrow$  к базе подведён достаточно высокий потенциал

Это **биполярный pnp-транзистор**:

# Немного физики: биполярный транзистор

Аналогичные свойства проводимости можно получить, последовательно соединив полупроводники p-, n- и снова p-типов:

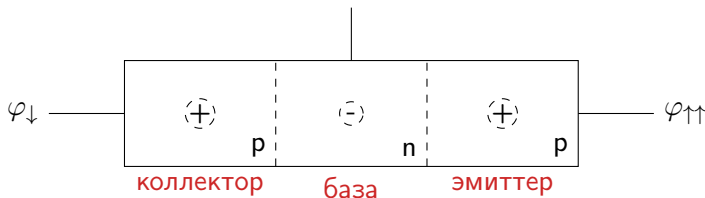


Это биполярный pnp-транзистор:



# Немного физики: биполярный транзистор

Аналогичные свойства проводимости можно получить, последовательно соединив полупроводники p-, n- и снова p-типов:

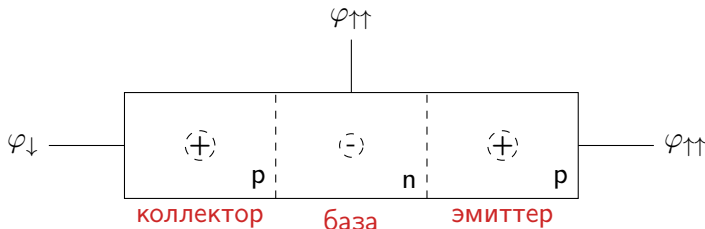


Это биполярный pnp-транзистор:



# Немного физики: биполярный транзистор

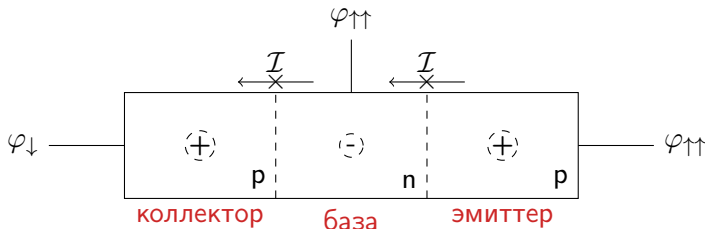
Аналогичные свойства проводимости можно получить, последовательно соединив полупроводники p-, n- и снова p-типов:



Это биполярный pnp-транзистор: 

# Немного физики: биполярный транзистор

Аналогичные свойства проводимости можно получить, последовательно соединив полупроводники р-, n- и снова р-типов:

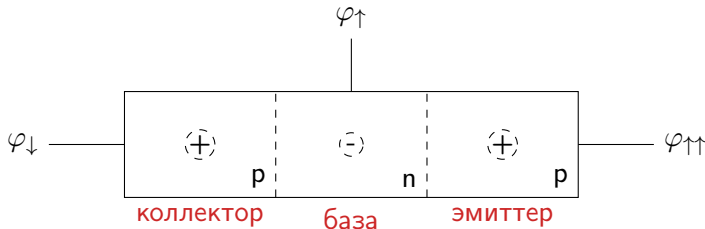


Это биполярный pnp-транзистор:



# Немного физики: биполярный транзистор

Аналогичные свойства проводимости можно получить, последовательно соединив полупроводники р-, n- и снова р-типов:

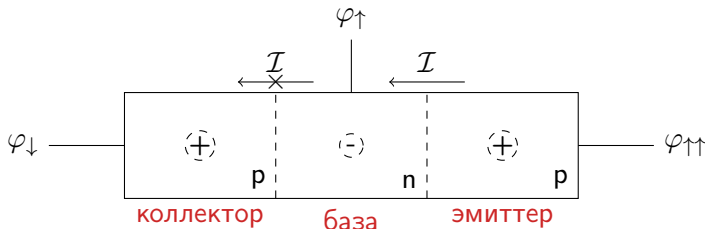


Это биполярный pnp-транзистор:



# Немного физики: биполярный транзистор

Аналогичные свойства проводимости можно получить, последовательно соединив полупроводники р-, n- и снова р-типов:

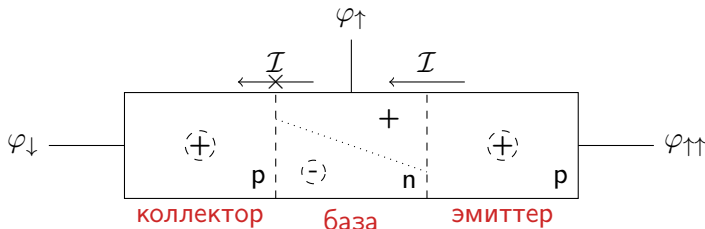


Это биполярный pnp-транзистор:



# Немного физики: биполярный транзистор

Аналогичные свойства проводимости можно получить, последовательно соединив полупроводники р-, n- и снова р-типов:



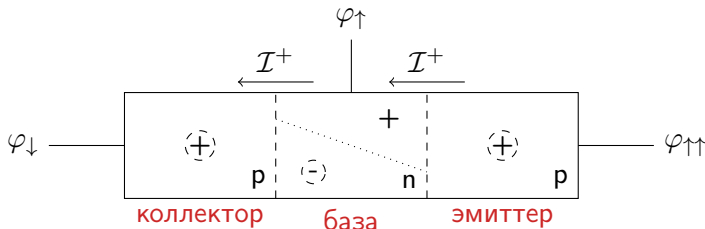
Это биполярный pnp-транзистор:





# Немного физики: биполярный транзистор

Аналогичные свойства проводимости можно получить, последовательно соединив полупроводники р-, n- и снова р-типов:

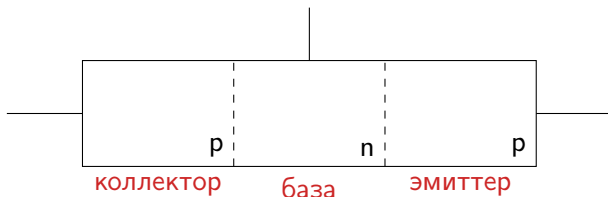


Это биполярный pnp-транзистор:



# Немного физики: биполярный транзистор

Аналогичные свойства проводимости можно получить, последовательно соединив полупроводники p-, n- и снова p-типов:



Грубый итог: коллектор и эмиттер соединены проводящим каналом  $\Leftrightarrow$  к базе подведён достаточно низкий потенциал

Это биполярный pnp-транзистор: 

# Немного физики: МОП-транзистор

**МОП**-транзисторы (с индуцированным каналом) — это полевые транзисторы, из которых обычно строятся цифровые микросхемы

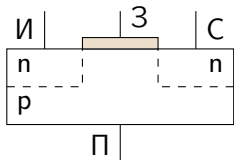
МОП-транзистор имеет несколько слоёв:

1. проводящий **затвор**
  - ▶ **М**еталл, хотя сейчас вместо металлического напыления используются более хитрые технологии
2. диэлектрик, отделяющий затвор от подложки
  - ▶ (ди)**О**ксид кремния, то есть стекло, хотя могут использоваться и другие изоляторы
3. Полупроводники, образующие **исток** (эмиттер), **сток** (коллектор) и **подложку** (базу)

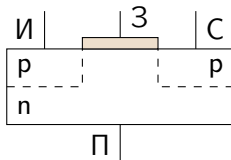
В отличие от биполярного транзистора, в котором канал проводимости открывается протекающим **током**, в полевом транзисторе канал открывается электрическим **полем**, создаваемым напряжением между затвором и подложкой

# Немного физики: МОП-транзистор

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор

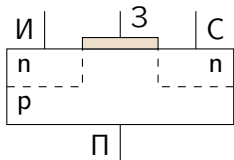


Если не принимать во внимание затвор, то МОП-транзисторы очень похожи на биполярные транзисторы, но всё же они применяются совсем по-другому:

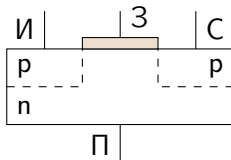
- ▶ на контакты МОП-транзистора не подводится “очень большой потенциал”: МОП-транзистор в цифровой схеме обычно оперирует только потенциалами  $\varphi_{\downarrow} = GND$  и  $\varphi_{\uparrow} = V_{cc}$

# Немного физики: МОП-транзистор

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор

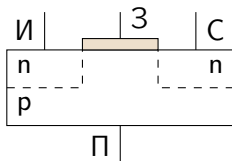


Если не принимать во внимание затвор, то МОП-транзисторы очень похожи на биполярные транзисторы, но всё же они применяются совсем по-другому:

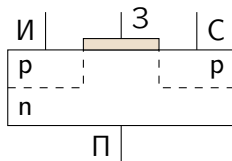
- ▶ основное назначение МОП-транзистора — передача потенциалов с контактов  $V_{cc}$  и  $GND$  во внутренние части схемы и на внешние контакты, с которых уровни напряжения будут считываться другими электрическими схемами

# Немного физики: МОП-транзистор

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор



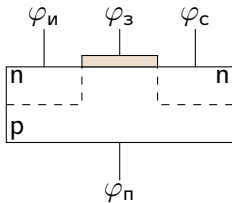
Если не принимать во внимание затвор, то МОП-транзисторы очень похожи на биполярные транзисторы, но всё же они применяются совсем по-другому:

- ▶ слишком сильный ток через МОП-транзистор, как правило, означает короткое замыкание в схеме, и потому нежелателен

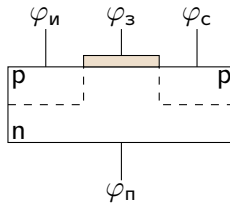
# Немного физики: МОП-транзистор

## МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор

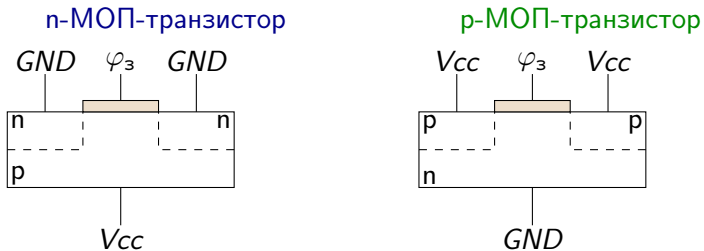


p-МОП-транзистор



# Немного физики: МОП-транзистор

## МОП-транзистор в цифровых схемах



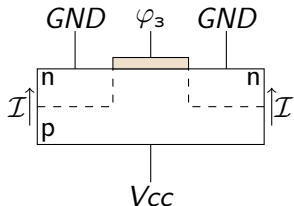
Если  $\varphi_n = V_{cc}/GND$  и на сток или исток подан потенциал  $GND/V_{cc}$ , то между стоком/истоком и подложкой возникает немалый ток



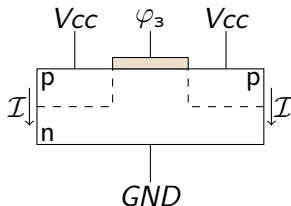
# Немного физики: МОП-транзистор

## МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



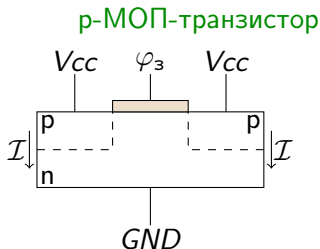
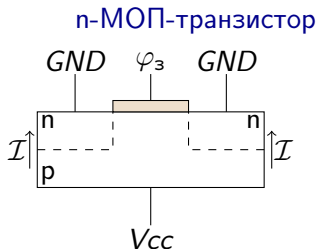
p-МОП-транзистор



Если  $\varphi_n = V_{cc}/GND$  и на сток или исток подан потенциал  $GND/V_{cc}$ , то между стоком/истоком и подложкой возникает немалый ток

# Немного физики: МОП-транзистор

## МОП-транзистор в цифровых схемах



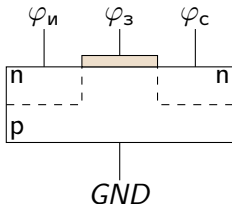
Если  $\varphi_n = V_{cc}/GND$  и на сток или исток подан потенциал  $GND/V_{cc}$ , то между стоком/истоком и подложкой возникает немалый ток

Такое поведение нежелательно, так как назначение МОП-транзистора — передача потенциала, а не поддержание тока

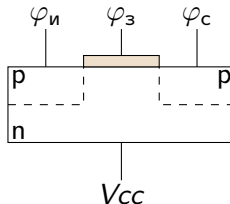
# Немного физики: МОП-транзистор

## МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор



Если  $\varphi_n = V_{cc}/GND$  и на сток или исток подан потенциал  $GND/V_{cc}$ , то между стоком/истоком и подложкой возникает немалый ток

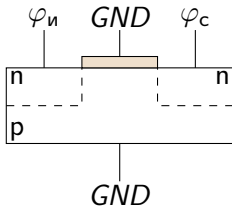
Такое поведение нежелательно, так как назначение МОП-транзистора — передача потенциала, а не поддержание тока

Поэтому  $\varphi_n = GND/V_{cc}$

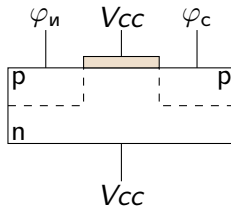
# Немного физики: МОП-транзистор

## МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор

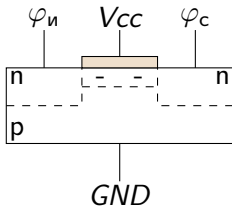


Если  $\varphi_3 = \text{GND}/V_{cc}$ , то исток и сток изолированы

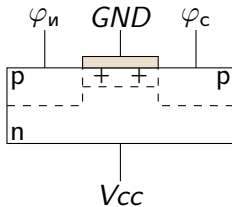
# Немного физики: МОП-транзистор

## МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор

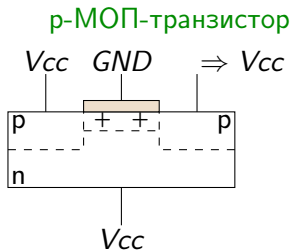
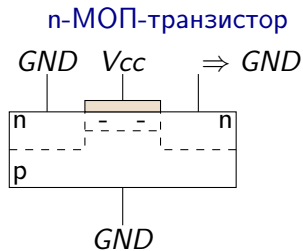


Если  $\varphi_3 = GND/V_{cc}$ , то исток и сток изолированы

Если  $\varphi_3 = V_{cc}/GND$ , то основные носители заряда подложки отталкиваются от затвора, а неосновные — притягиваются, и область между стоком и истоком, насыщенная неосновными носителями заряда, ведёт себя как полупроводник того же типа, что и исток-сток: образует **канал проводимости**

# Немного физики: МОП-транзистор

## МОП-транзистор в цифровых схемах

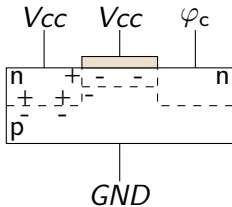


Если  $\varphi_{и} = GND/V_{cc}$ , а в стоке созданы условия *полной изоляции*, при которых потенциал может легко изменяться небольшим кратковременным током, то потенциалы стока и истока при открытом канале *примерно выравниваются*

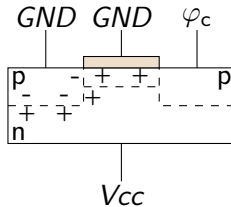
# Немного физики: МОП-транзистор

## МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



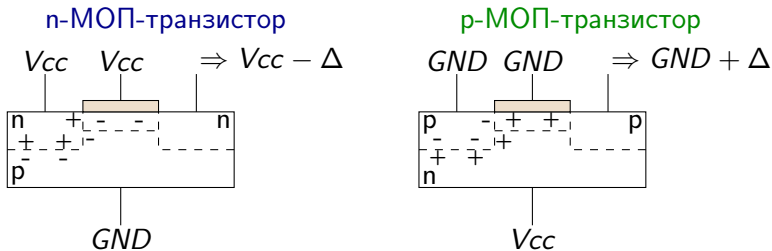
p-МОП-транзистор



Если  $\varphi_{in} = V_{cc}/GND$ , то между истоком и подложкой образуется широкий p-n-переход

# Немного физики: МОП-транзистор

## МОП-транзистор в цифровых схемах



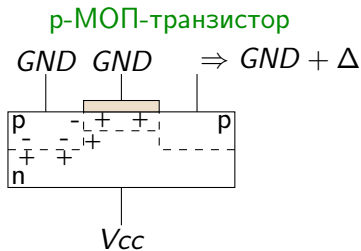
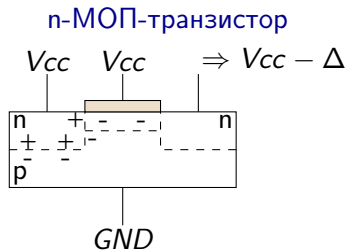
Если  $\varphi_{in} = V_{cc}/GND$ , то между истоком и подложкой образуется широкий p-n-переход

На преодоление перехода носителями заряда тратится заметно немалая энергия, то есть на нём заметно падает напряжение, и потенциалы  $\varphi_{in}$ ,  $\varphi_c$  будут заметно различаться после “выравнивания”



# Немного физики: МОП-транзистор

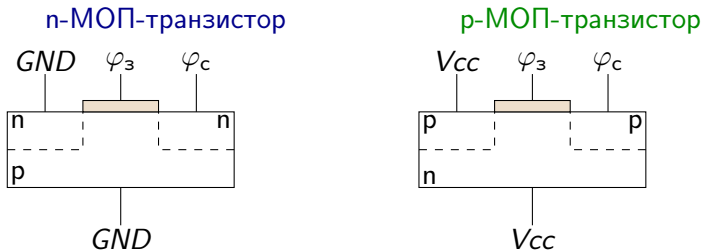
## МОП-транзистор в цифровых схемах



Такое поведение нежелательно, так как назначение МОП-транзистора в цифровой схеме — как можно более точная передача потенциалов  $V_{cc}$  и  $GND$

# Немного физики: МОП-транзистор

## МОП-транзистор в цифровых схемах



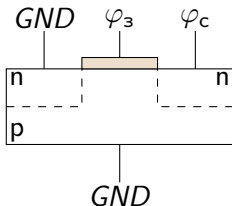
Такое поведение нежелательно, так как назначение МОП-транзистора в цифровой схеме — как можно более точная передача потенциалов  $V_{cc}$  и  $GND$

Поэтому  $\varphi_{и} = GND/V_{cc}$

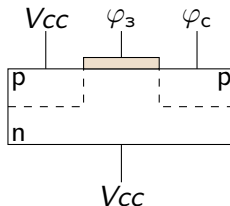
# Немного физики: МОП-транзистор

## МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



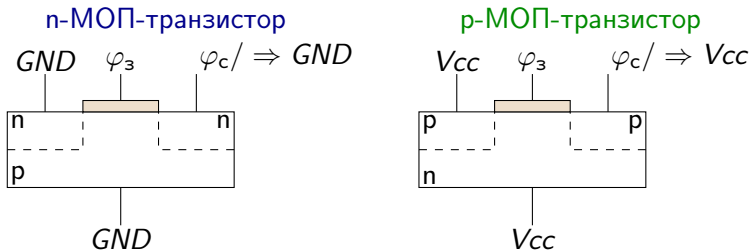
p-МОП-транзистор



*Итог.* При “правильном” использовании МОП-транзистора  $\varphi_n = \varphi_p = GND/V_{cc}$ , и возможны ровно два состояния: канал закрыт и сток изолирован от истока, либо канал открыт и сток связан с истоком почти идеальным проводником

# Немного физики: МОП-транзистор

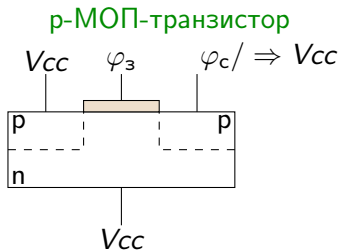
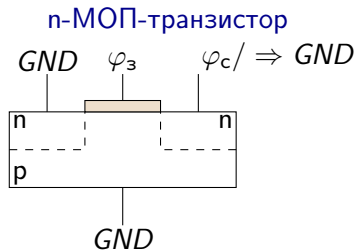
## МОП-транзистор в цифровых схемах



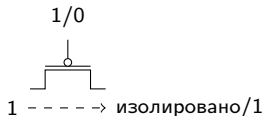
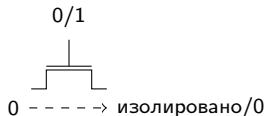
**Итог.** При “правильном” использовании МОП-транзистора  $\varphi_{и} = \varphi_{п} = GND/Vcc$ , и возможны ровно два состояния: канал закрыт и сток изолирован от истока, либо канал открыт и сток связан с истоком *почти* идеальным проводником

# Немного физики: МОП-транзистор

## МОП-транзистор в цифровых схемах



Так как потенциалы стока и подложки при “правильном” использовании равны, их обычно замыкают проводником, и контакт подложки в схематичном изображении опускается:



# КМОП

Для полноценной передачи обоих значений 0 и 1 в цифровых схемах используется технология **КМОП**:<sup>1</sup>

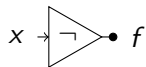
- ▶ Создаётся общая подложка p-типа
- ▶ В эту подложку вкрапляются области n-типа: стоки и истоки n-МОП-транзисторов
- ▶ В основную подложку вставляются **колодцы**: области n-типа, подложки p-МОП-транзисторов
- ▶ В колодцы вкрапляются области p-типа: стоки и истоки p-МОП-транзисторов
- ▶ Контакты транзисторов и внешние контакты схемы соединяются проводниками
  - ▶ согласно логике схемы, и при этом
  - ▶ так, чтобы через каналы n-транзисторов передавалась только единица, а через каналы p-транзисторов — только ноль

---

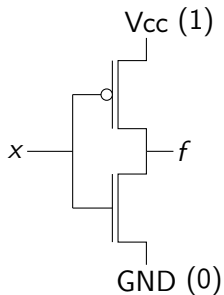
<sup>1</sup> Комплементарные **МОП**-транзисторы

# КМОП и СФЭ

СФЭ:

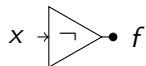


То же самое в КМОП:

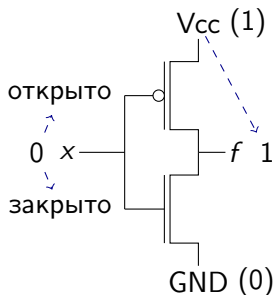


# КМОП и СФЭ

СФЭ:



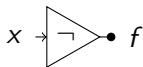
То же самое в КМОП:



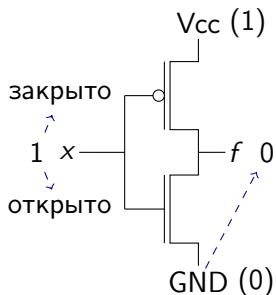


# КМОП и СФЭ

СФЭ:

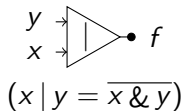


То же самое в КМОП:

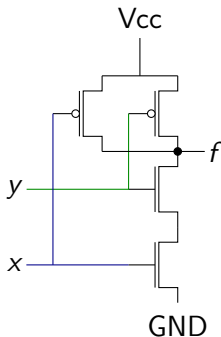


# КМОП и СФЭ

СФЭ:



То же самое в КМОП:

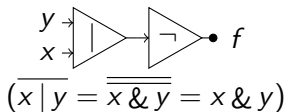


— разветвление провода

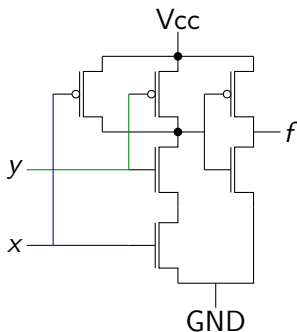
— непересекающиеся вертикальный и горизонтальный провод

# КМОП и СФЭ

СФЭ:



То же самое в КМОП:



Любую СФЭ можно легко реализовать как КМОП-схему: достаточно реализовать каждый ФЭ и соединить проводниками выбранные точки схемы так, как они соединены в СФЭ