

# Языки описания схем

[mk.cs.msu.ru](http://mk.cs.msu.ru) → Лекционные курсы → Языки описания схем

## Блок 3

Как устроена цифровая аппаратура

Немного физики:  
как схемы из функциональных элементов  
связаны с реальным миром

Лектор:

Подымов Владислав Васильевич

E-mail:

[valdus@yandex.ru](mailto:valdus@yandex.ru)

ВМК МГУ, 2024/2025, осенний семестр

# Вступление

ФЭ отрицания:

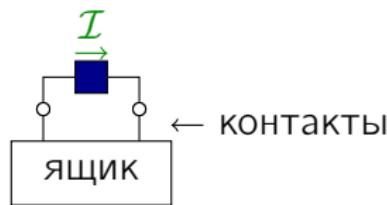


Элемент отрицания — это математическая абстракция реального объекта, в который можно посыпать булево значение и получать отрицание этого значения

- ▶ 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

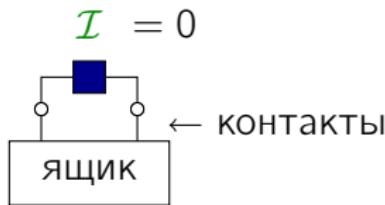


Пару контактов ( $\circ \circ$ ) можно соединить [проводником](#)

Если по [проводнику](#) потёк желаемый [электрический ток](#), значит, на паре ( $\circ \circ$ ) **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:

$$\mathcal{U} = \mathcal{I}\mathcal{R}$$

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

## 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**

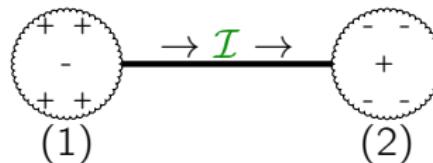
А что такое напряжение?

## 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**

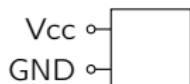
Чем больше разность зарядов между (1) и (2),  
тем выше напряжение между ними,  
и тем больший ток будет течь по проводнику

# V<sub>cc</sub> 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<sub>cc</sub>**<sup>2</sup> (или **Vd**<sup>2</sup>): контакт с высоким напряжением и соответствующее напряжение
- ▶ **GND**<sup>3</sup> (или **Vss**<sup>2</sup>): контакт с низким напряжением и соответствующее напряжение

---

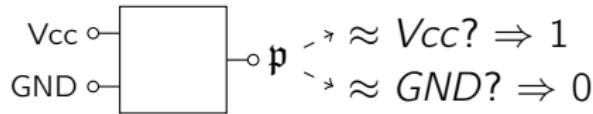
1 Схемотехники не любят слово «потенциал»

Потенциал точки — это напряжение между ней и нолевым потенциалом

2 «cc» = «common collector», «d» = «drain», «s» = «sink», но можно об этом не думать

3 **GROUND**: потенциал земли, часто считается нолевым

# $V_{CC}$ 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 ящики —

до сотен миллионов деталей на квадратный миллиметр в один слой

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

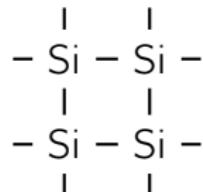
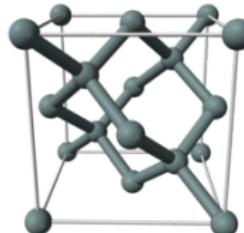
# Немного физики: полупроводники

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, получаются добавлением примесей в кристаллы кремния (Si):

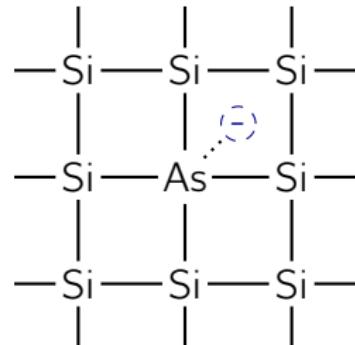
*решётка кристалла Si    схематичное двумерное изображение*



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

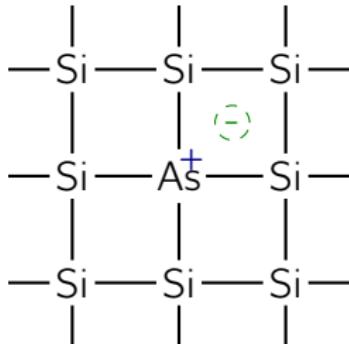
В качестве примеси можно вкрапить в решётку кремния мышьяк (As):



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

# Немного физики: полупроводники

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



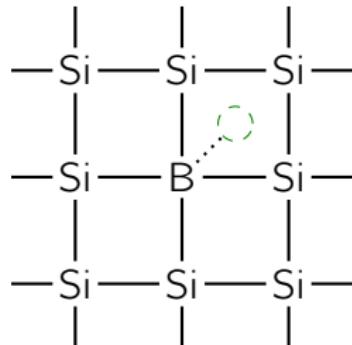
Мышьяк имеет 5 валентных электронов, из них 4 связаны кристаллической решёткой

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

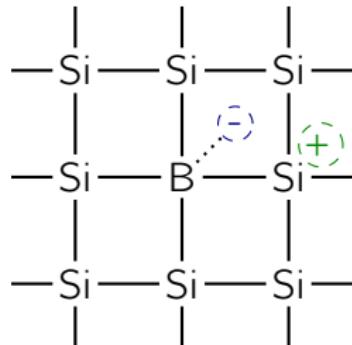
В качестве примеси можно вкрапить в решётку кремния бор (B):



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

## Немного физики: полупроводники

В качестве примеси можно вкрапить 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

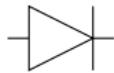
Это полупроводник **p-типа** (positive charge)

# Немного физики: диод

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



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

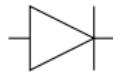


# Немного физики: диод

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

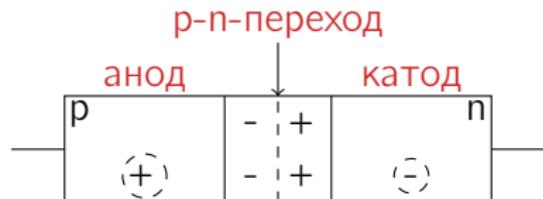


Это **полупроводниковый диод**, пропускающий ток в одну сторону и не пропускающий обратный ток:

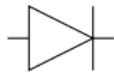


# Немного физики: диод

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



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

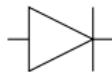


# Немного физики: диод

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

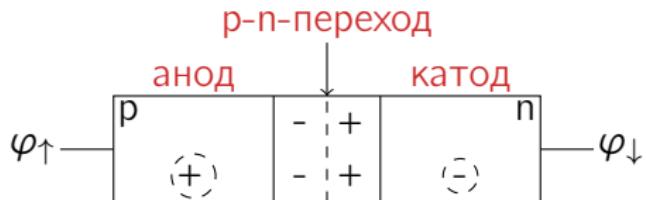


Это **полупроводниковый диод**, пропускающий ток в одну сторону и не пропускающий обратный ток:



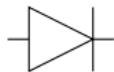
# Немного физики: диод

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



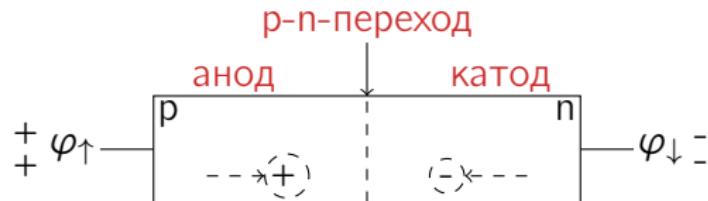
Здесь и дальше:  $\varphi_{\uparrow}$  — высокий потенциал,  
 $\varphi_{\downarrow}$  — низкий потенциал

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



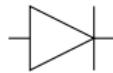
# Немного физики: диод

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



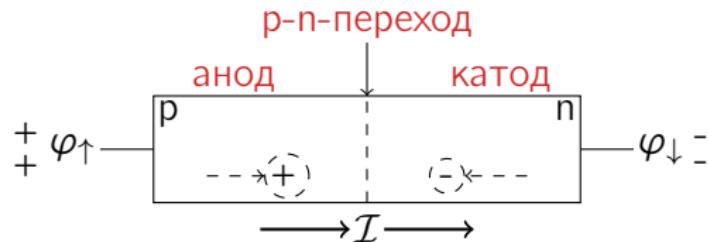
Здесь и дальше:  
 $\varphi_{\uparrow}$  — высокий потенциал,  
 $\varphi_{\downarrow}$  — низкий потенциал

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



# Немного физики: диод

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



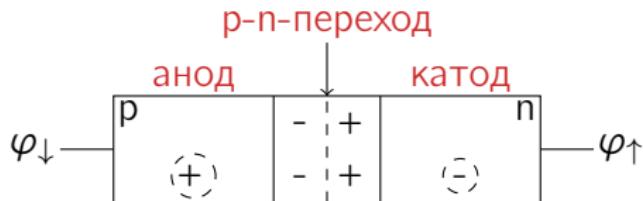
Здесь и дальше:  $\varphi_{\uparrow}$  — высокий потенциал,  
 $\varphi_{\downarrow}$  — низкий потенциал

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



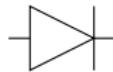
# Немного физики: диод

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



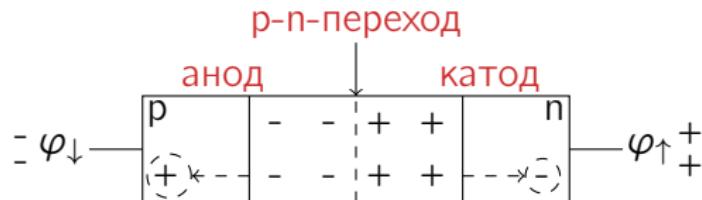
Здесь и дальше:  $\varphi_{\uparrow}$  — высокий потенциал,  
 $\varphi_{\downarrow}$  — низкий потенциал

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



# Немного физики: диод

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



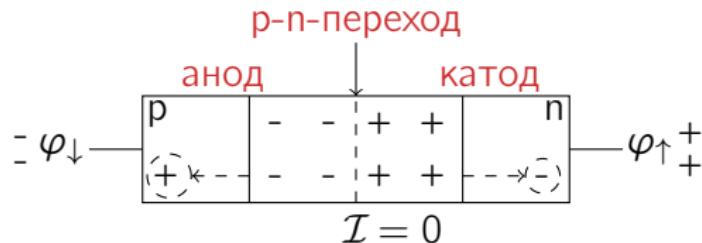
Здесь и дальше:  $\varphi \uparrow$  — высокий потенциал,  
 $\varphi \downarrow$  — низкий потенциал

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



# Немного физики: диод

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



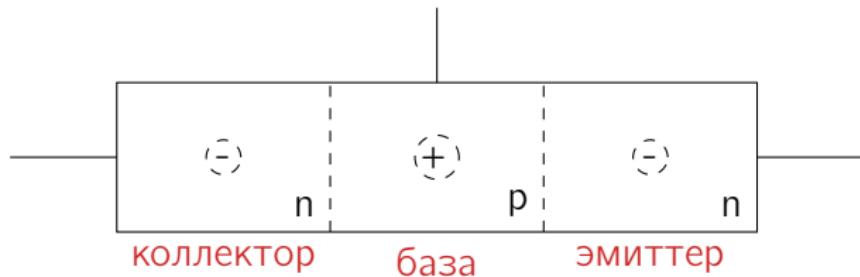
Здесь и дальше:  $\varphi \uparrow$  — высокий потенциал,  
 $\varphi \downarrow$  — низкий потенциал

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:

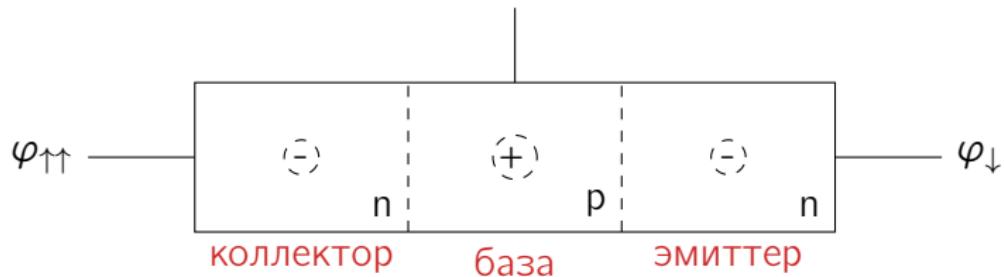


Это **биполярный прп-транзистор**:



# Немного физики: биполярный транзистор

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

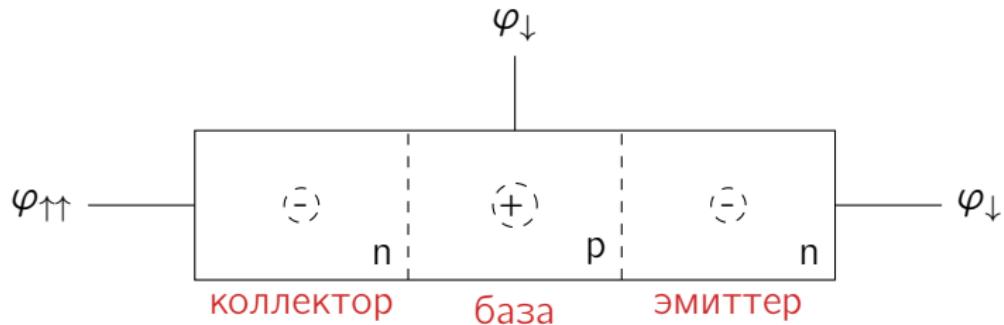


$\varphi_{\uparrow\uparrow}$  — очень высокий потенциал

Это **биполярный прп-транзистор**:

# Немного физики: биполярный транзистор

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

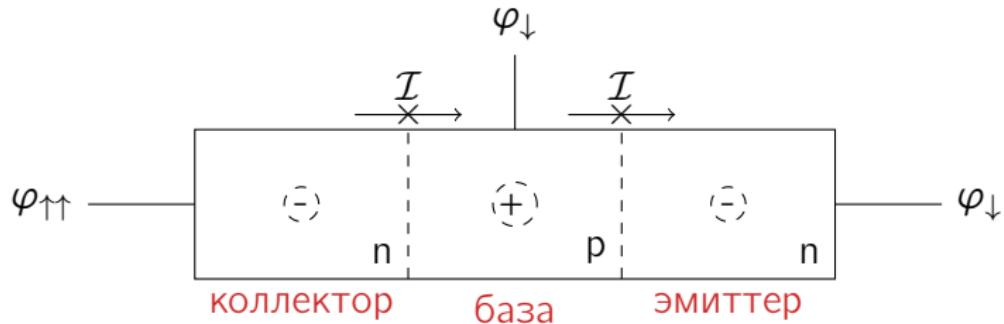


$\varphi \uparrow\uparrow$  — очень высокий потенциал

Это **биполярный прп-транзистор**:

# Немного физики: биполярный транзистор

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

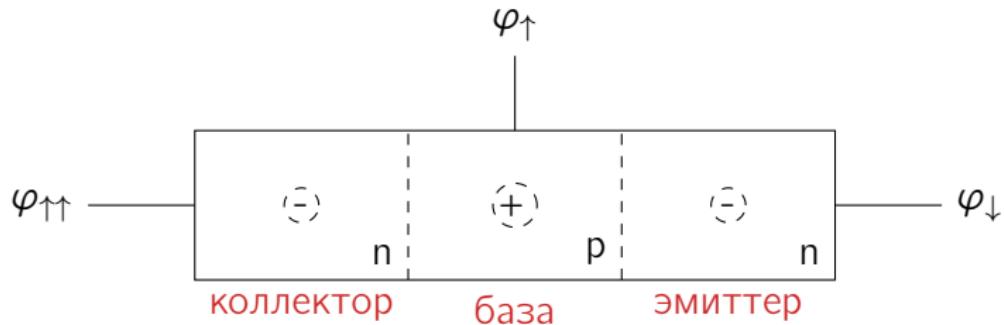


$\varphi_{\uparrow\uparrow}$  — очень высокий потенциал

Это **биполярный прп-транзистор**:

# Немного физики: биполярный транзистор

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



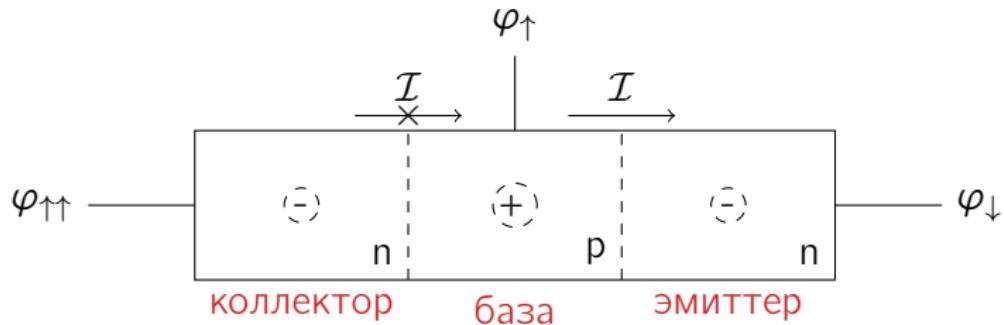
$\varphi_{\uparrow}$  — очень высокий потенциал

Это **биполярный прп-транзистор**:



# Немного физики: биполярный транзистор

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

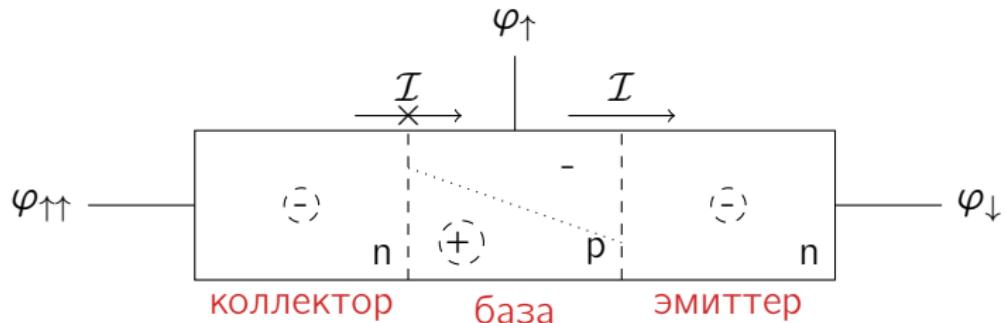


$\varphi_{\uparrow\uparrow}$  — очень высокий потенциал

Это **биполярный прп-транзистор**:

# Немного физики: биполярный транзистор

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

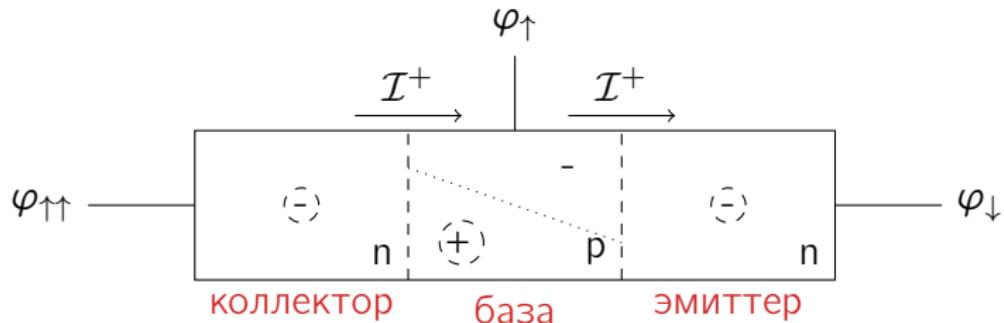


$\varphi_{\uparrow\uparrow}$  — очень высокий потенциал

Это **биполярный прп-транзистор**:

# Немного физики: биполярный транзистор

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



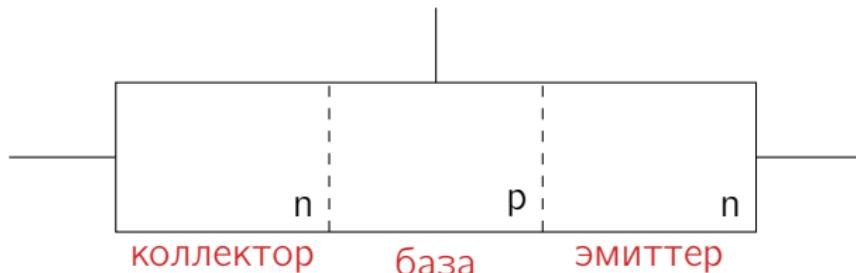
$\varphi_{\uparrow\uparrow}$  — очень высокий потенциал

$I^+$  — очень сильный ток

Это **биполярный прп-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

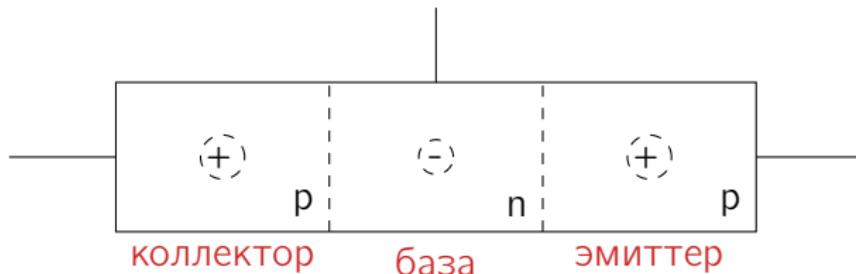
Грубый итог: эмиттер и коллектор соединены проводящим каналом  $\Leftrightarrow$  к базе подведён достаточно высокий потенциал

Это **биполярный прп-транзистор**:



# Немного физики: биполярный транзистор

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

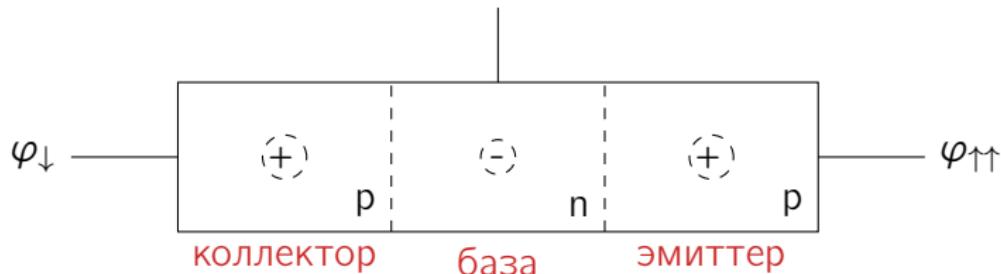


Это **биполярный pnp-транзистор**:



# Немного физики: биполярный транзистор

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

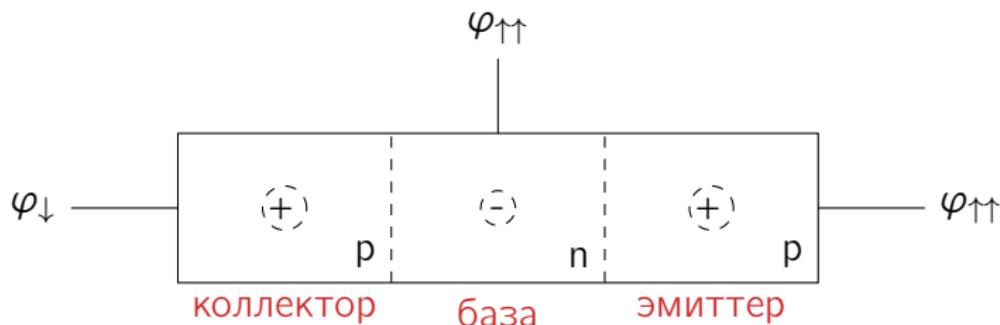


Это **биполярный pnp-транзистор**:



# Немного физики: биполярный транзистор

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

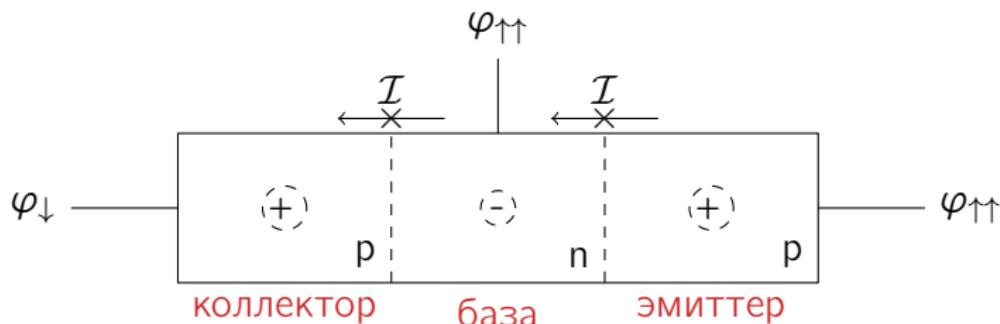


Это **биполярный ррр-транзистор**:



# Немного физики: биполярный транзистор

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

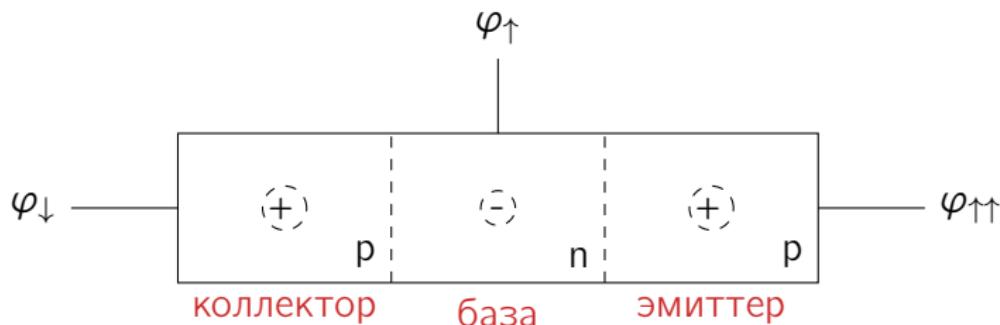


Это **биполярный pnp-транзистор**:



# Немного физики: биполярный транзистор

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

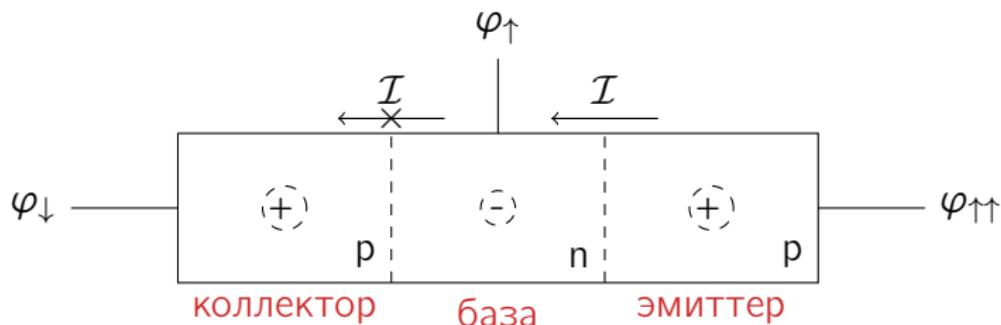


Это **биполярный pnp-транзистор**:



# Немного физики: биполярный транзистор

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

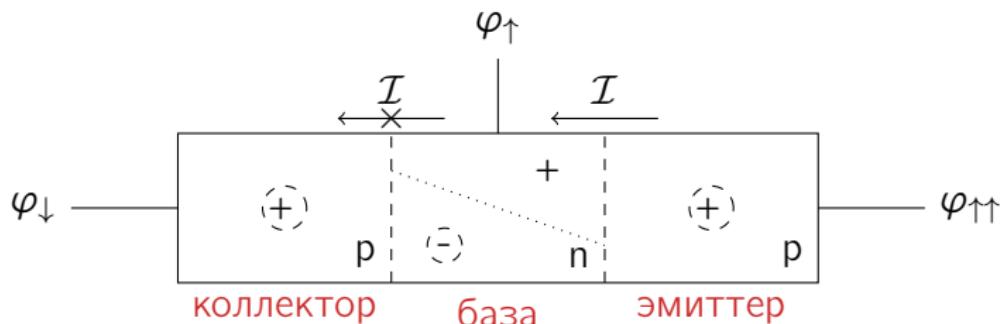


Это **биполярный pnp-транзистор**:



# Немного физики: биполярный транзистор

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

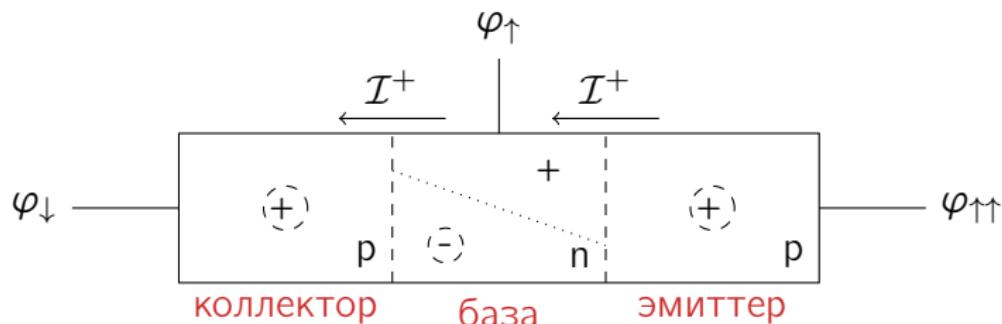


Это **биполярный ррр-транзистор**:



# Немного физики: биполярный транзистор

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

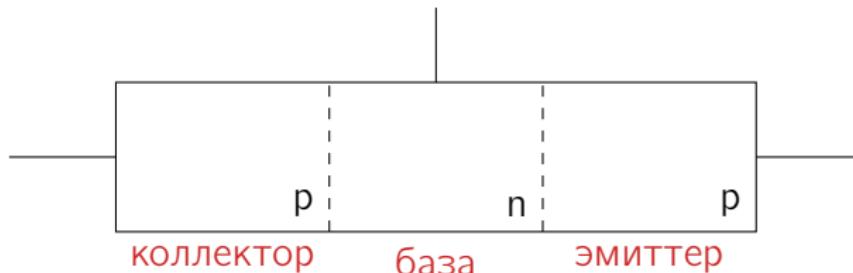


Это **биполярный pnp-транзистор**:



# Немного физики: биполярный транзистор

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



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

Это **биполярный рпр-транзистор**:



# Немного физики: МОП-транзистор

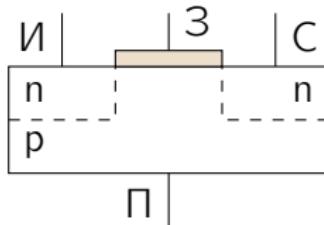
МОП-транзисторы (с индуцированным каналом) — это полевые транзисторы, из которых обычно строятся цифровые микросхемы. МОП-транзистор имеет несколько слоёв:

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

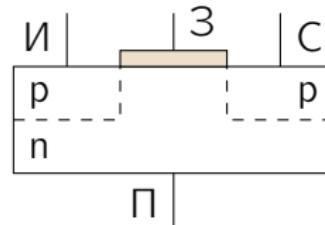
В отличие от биполярного транзистора, в котором канал проводимости открывается протекающим током, в полевом транзисторе канал открывается электрическим полем, создаваемым напряжением между затвором и подложкой.

# Немного физики: МОП-транзистор

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор

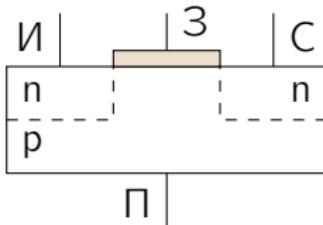


Если не принимать во внимание затвор, то МОП-транзисторы очень похожи на биполярные транзисторы, но всё же они применяются совсем по-другому:

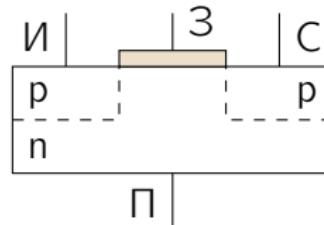
- ▶ на контакты МОП-транзистора не подводится «очень большой потенциал»: МОП-транзистор в цифровой схеме обычно оперирует только потенциалами  $\varphi_{\downarrow} = GND$  и  $\varphi_{\uparrow} = V_{cc}$

# Немного физики: МОП-транзистор

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор

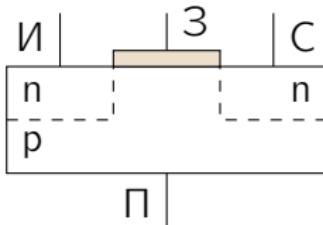


Если не принимать во внимание затвор, то МОП-транзисторы очень похожи на биполярные транзисторы, но всё же они применяются совсем по-другому:

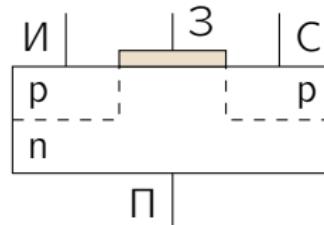
- ▶ основное назначение МОП-транзистора — передача потенциалов с контактов  $V_{cc}$  и GND во внутренние части схемы и на внешние контакты, с которых уровни напряжения будут считываться другими электрическими схемами

# Немного физики: МОП-транзистор

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор



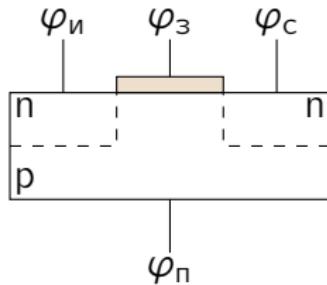
Если не принимать во внимание затвор, то МОП-транзисторы очень похожи на биполярные транзисторы, но всё же они применяются совсем по-другому:

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

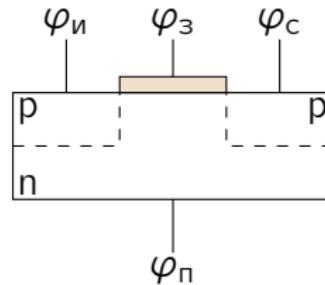
# Немного физики: МОП-транзистор

## МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



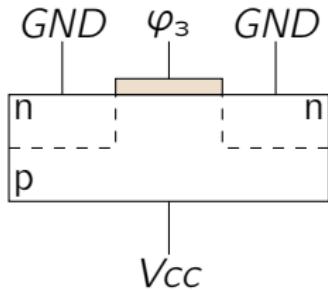
p-МОП-транзистор



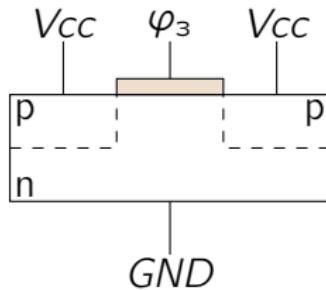
# Немного физики: МОП-транзистор

## МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор

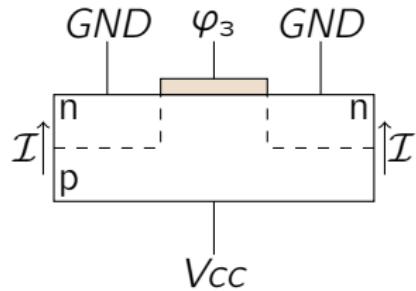


Если  $\varphi_n = V_{CC}/GND$  и на сток или исток подан потенциал  $GND/V_{CC}$ , то между стоком/истоком и подложкой возникает немалый ток

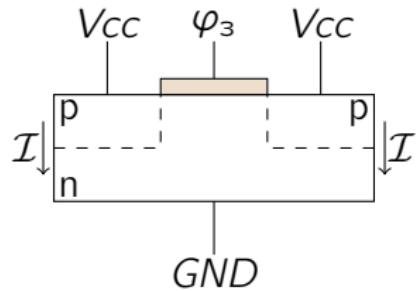
# Немного физики: МОП-транзистор

## МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор

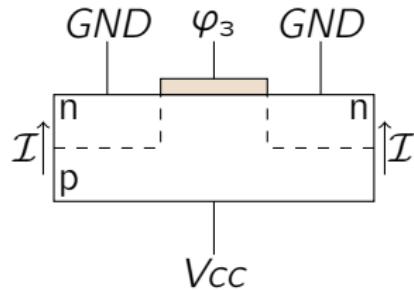


Если  $\varphi_p = V_{CC}/GND$  и на сток или исток подан потенциал  $GND/V_{CC}$ , то между стоком/истоком и подложкой возникает немалый ток

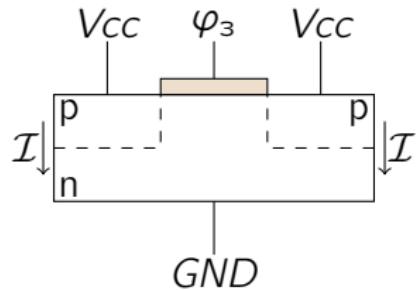
# Немного физики: МОП-транзистор

## МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор



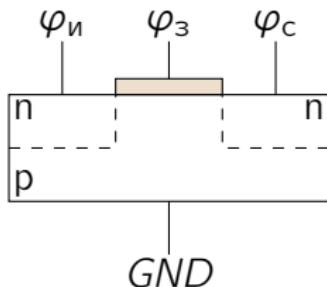
Если  $\varphi_n = V_{CC}/GND$  и на сток или исток подан потенциал  $GND/V_{CC}$ , то между стоком/истоком и подложкой возникает немалый ток

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

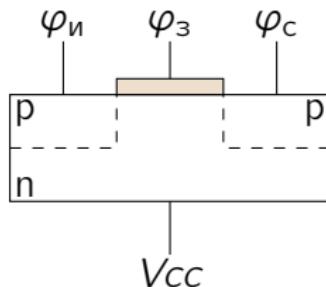
# Немного физики: МОП-транзистор

## 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

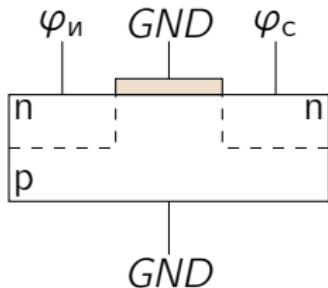
Такое поведение нежелательно, так как назначение МОП-транзистора — передача потенциала, а не поддержание тока

Поэтому  $\varphi_n = GND/V_{cc}$

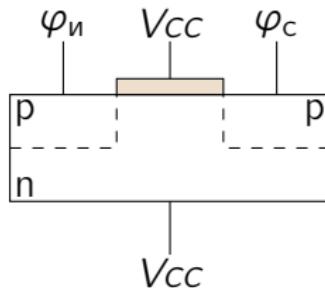
# Немного физики: МОП-транзистор

## МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор

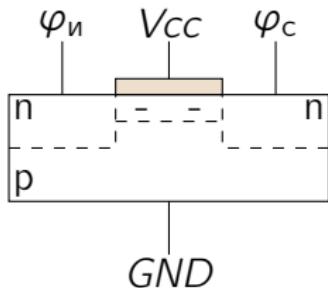


Если  $\varphi_3 = GND/V_{CC}$ , то исток и сток изолированы

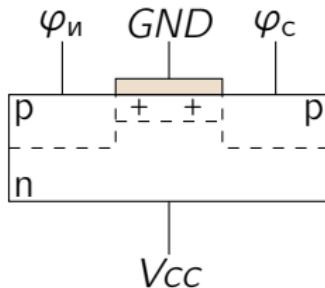
# Немного физики: МОП-транзистор

## МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор

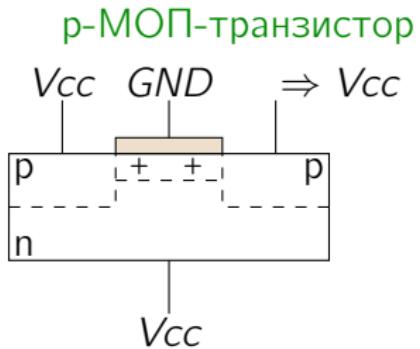
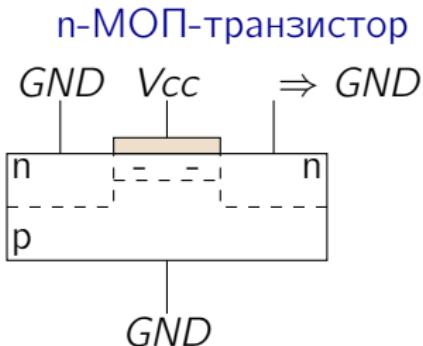


Если  $\varphi_3 = GND/V_{CC}$ , то исток и сток изолированы

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

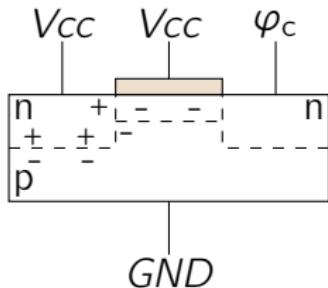


Если  $\varphi_i = GND/V_{cc}$ , а в стоке созданы условия *полной изоляции*, при которых потенциал может легко изменяться небольшим кратковременным током, то потенциалы стока и истока при открытом канале *примерно* выравниваются

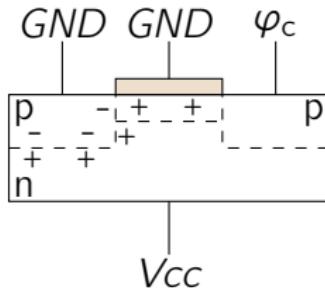
# Немного физики: МОП-транзистор

## МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



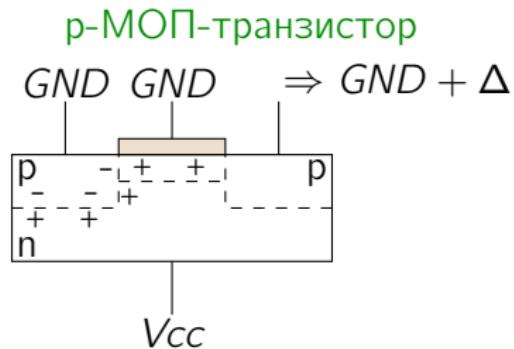
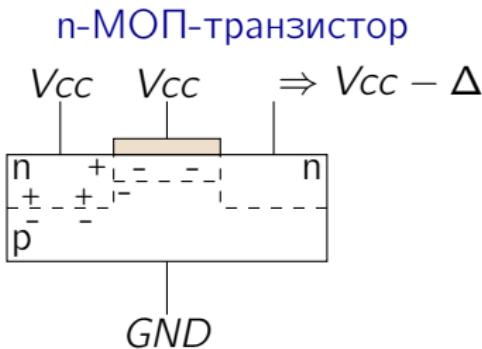
p-МОП-транзистор



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

# Немного физики: МОП-транзистор

## МОП-транзистор в цифровых схемах



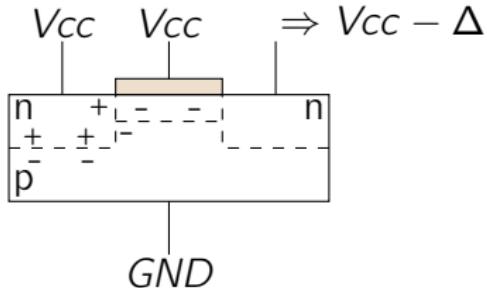
Если  $\varphi_i = V_{cc}/GND$ , то между истоком и подложкой образуется широкий p-n-переход

На преодоление перехода носителями заряда тратится заметно немалая энергия, то есть на нём заметно падает напряжение, и потенциалы  $\varphi_i$ ,  $\varphi_c$  будут заметно различаться после «выравнивания»

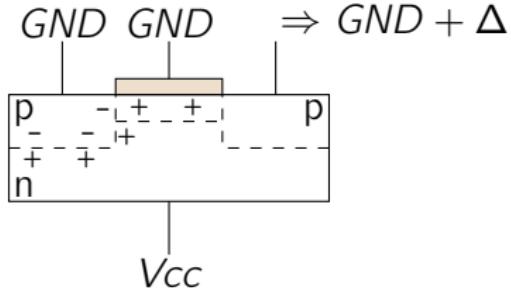
# Немного физики: МОП-транзистор

## МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор

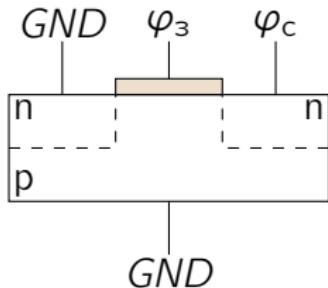


Такое поведение нежелательно, так как назначение МОП-транзистора в цифровой схеме — как можно более точная передача потенциалов  $V_{cc}$  и  $GND$

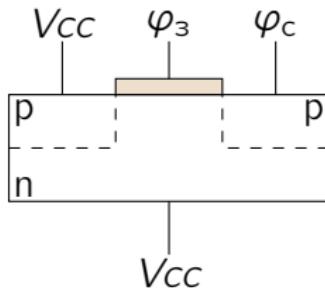
# Немного физики: МОП-транзистор

## МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор



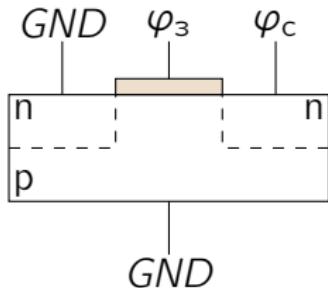
Такое поведение нежелательно, так как назначение МОП-транзистора в цифровой схеме — как можно более точная передача потенциалов  $V_{CC}$  и  $GND$

Поэтому  $\varphi_i = GND / V_{CC}$

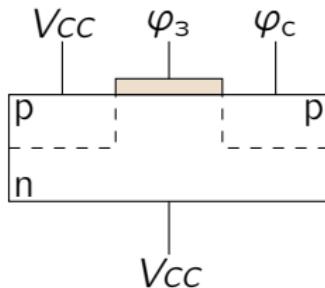
# Немного физики: МОП-транзистор

## МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



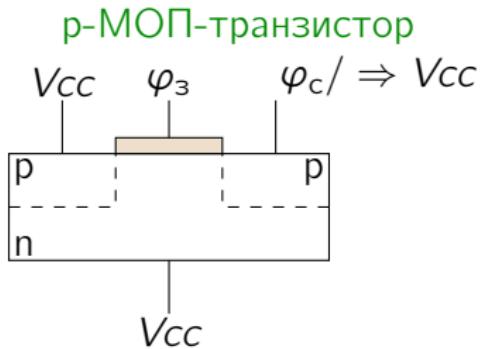
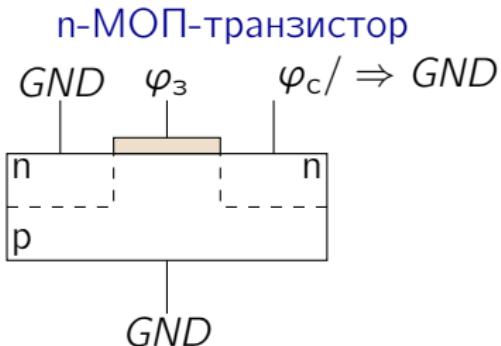
p-МОП-транзистор



*Итог.* При «правильном» использовании МОП-транзистора  $\varphi_i = \varphi_n = GND/V_{CC}$ , 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

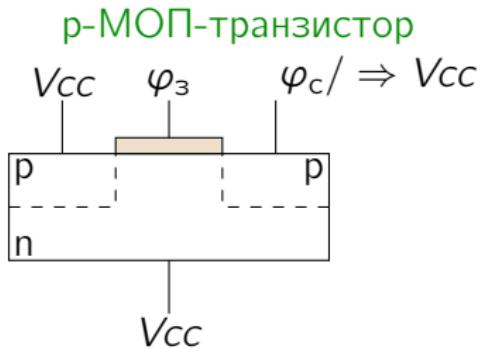
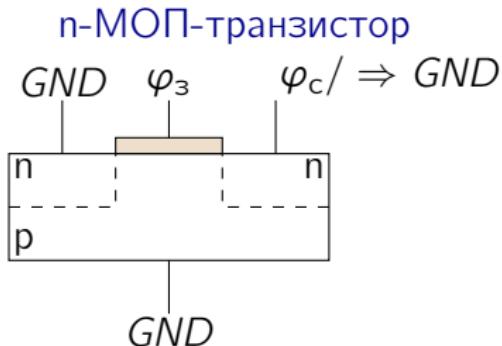
## МОП-транзистор в цифровых схемах



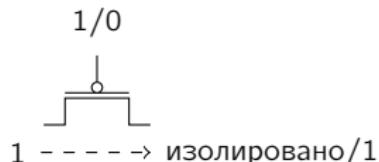
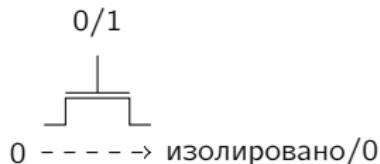
*Итог.* При «правильном» использовании МОП-транзистора  $\varphi_i = \varphi_n = GND / V_{CC}$ , и возможны ровно два состояния: канал закрыт и сток изолирован от истока, либо канал открыт и сток связан с истоком почти идеальным проводником

# Немного физики: МОП-транзистор

## МОП-транзистор в цифровых схемах



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>

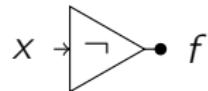
- ▶ Создаётся общая подложка р-типа
- ▶ В эту подложку вкрапляются области n-типа:  
стоки и истоки n-МОП-транзисторов
- ▶ В основную подложку вставляются **колодцы**:  
области n-типа, подложки p-МОП-транзисторов
- ▶ В колодцы вкрапляются области p-типа:  
стоки и истоки p-МОП-транзисторов
- ▶ Контакты 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

---

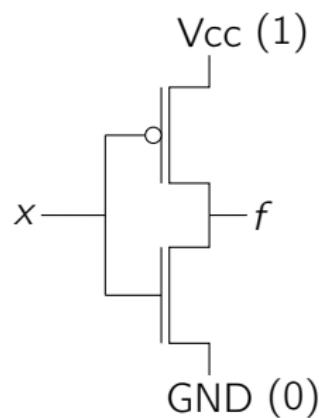
<sup>1</sup> Комплементарные МОП-транзисторы

# КМОП и СФЭ

СФЭ:

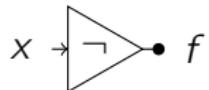


То же самое в КМОП:

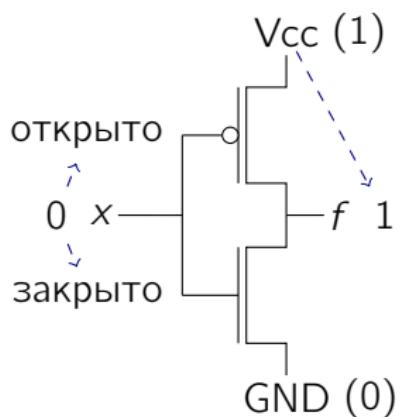


# КМОП и СФЭ

СФЭ:

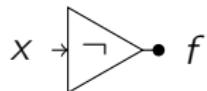


То же самое в КМОП:

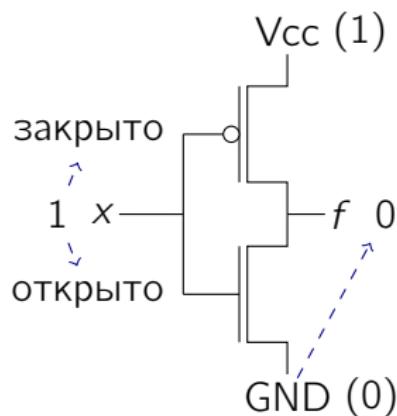


# КМОП и СФЭ

СФЭ:

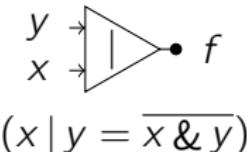


То же самое в КМОП:

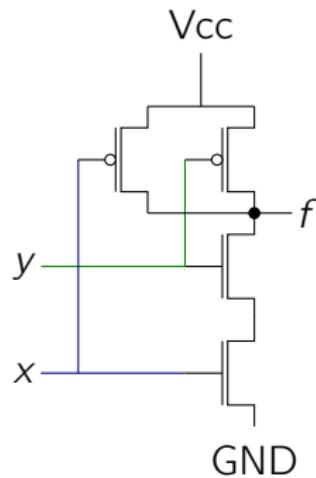


# КМОП и СФЭ

СФЭ:



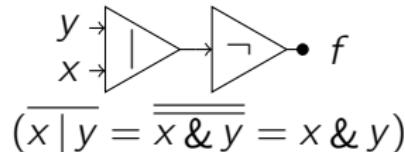
То же самое в КМОП:



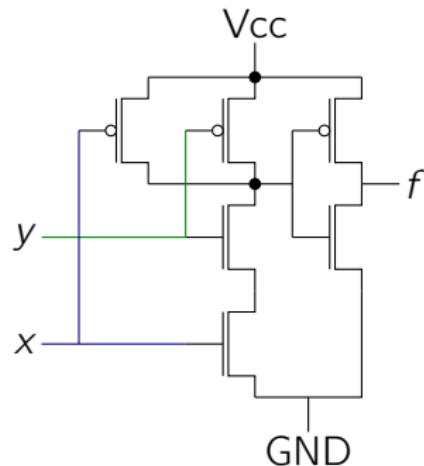
- разветвление провода
- непересекающиеся вертикальный и горизонтальный проводá

# 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