Языки описания схем

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

Блок 2
Немного физики,
или как СФЭ связаны с реальным миром

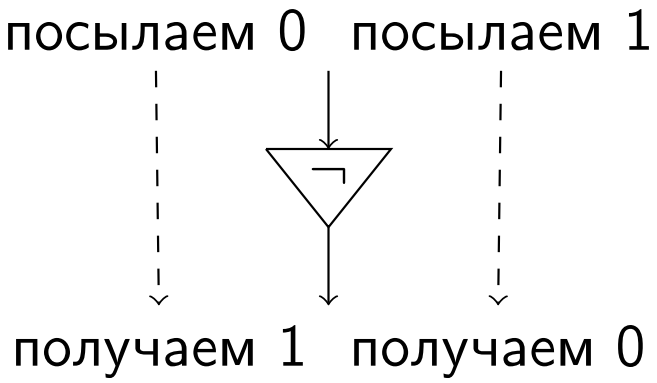
лектор:
Подымов Владислав Васильевич

e-mail:
valdus@yandex.ru

Осень 2018

Где в аппаратуре 0 и 1

Функциональный элемент, реализующий отрицание:

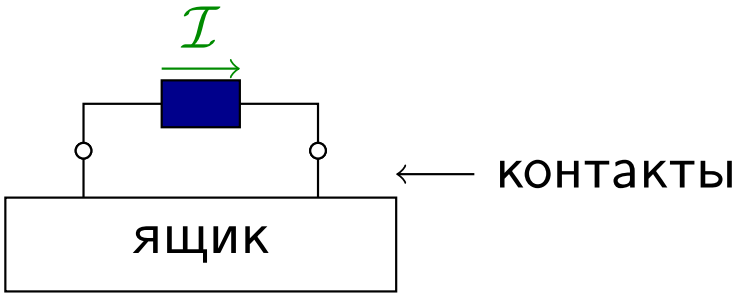


Элемент отрицания — это математическая абстракция реального объекта, в который можно посылать значения 0 и 1, и из которого можно считывать значения 0 и 1

- Как выглядит этот объект?
- Как послать в объект логическое значение?
- Как считать из объекта логическое значение?

Где в аппаратуре 0 и 1

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



Пару контактов (∘ ∘) можно соединить проводником

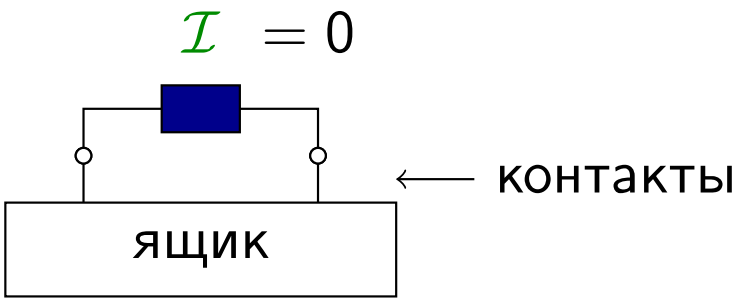
На паре (∘ ∘)

- выставлен сигнал (значение 1), если по проводнику течёт электрический ток[1]

[1] И не произвольный ток, а некоторый специфицированный

Где в аппаратуре 0 и 1

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



Пару контактов (∘ ∘) можно соединить проводником

На паре (∘ ∘)

- не выставлен сигнал (выставлено значение 0), если ток по проводнику не течёт

Где в аппаратуре 0 и 1

Закон Ома:

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

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

Где в аппаратуре 0 и 1

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
- ...
- логический ноль и логическая единица, выставленные на паре контактов, — это **заданные уровни напряжения**

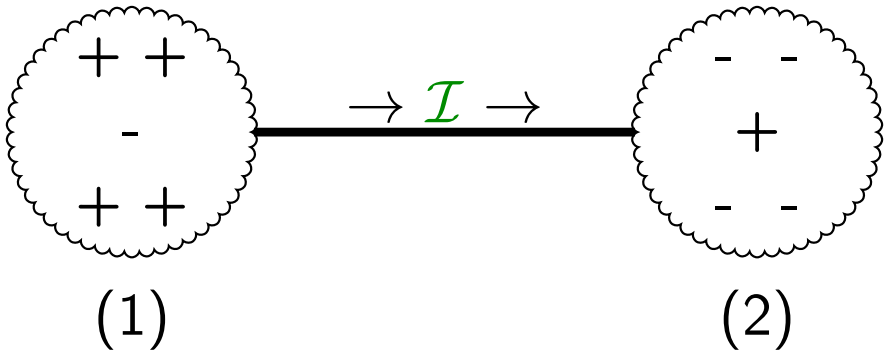
А что такое напряжение?

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

Коротко и грубо понятие потенциала можно описать так:



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

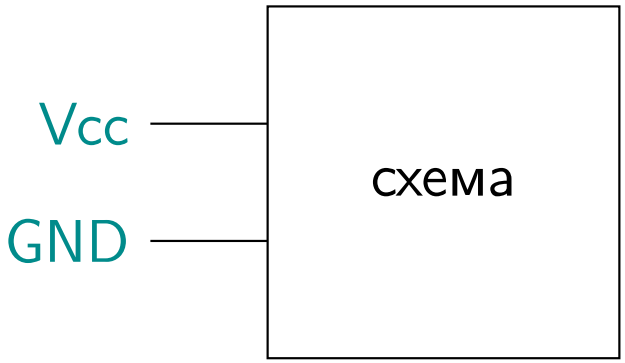
Если соединить (1) и (2) проводником, то по нему потечёт ток

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

Vcc и GND

Чтобы электрическая схема заработала, нужно сторонними средствами создать условия, при которых в схеме и в проводниках, подключённых к схеме, способен течь ток

Для этого достаточно иметь два контакта в схеме, на которые извне подводится заданное фиксированное напряжение:



Vcc и GND

Vcc[1] — это контакт с высоким потенциалом, или высоким напряжением[2]

GND[3] — это контакт с низким потенциалом, или низким напряжением, или напряжением земли

Также символами Vcc и GND обозначают соответствующие напряжения

Если в качестве нолевого потенциала взять потенциал на контакте GND, то

- GND = 0В
- Vcc = Vcc - GND; обычно для небольших цифровых устройств Vcc $\in \{3.3В, 5В\}$

---

[1] Voltage on common collector:
напряжение на общей линии коллекторов транзисторов схемы

[2] Схемотехники не очень любят слово “потенциал”.
Потенциал точки — это напряжение между этой точкой и точкой с заданным нолевым потенциалом

[3] GrouND: заземление, земля

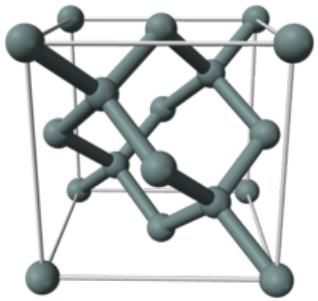
Немного физики: полупроводники

Современные миниатюрные цифровые схемы, 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



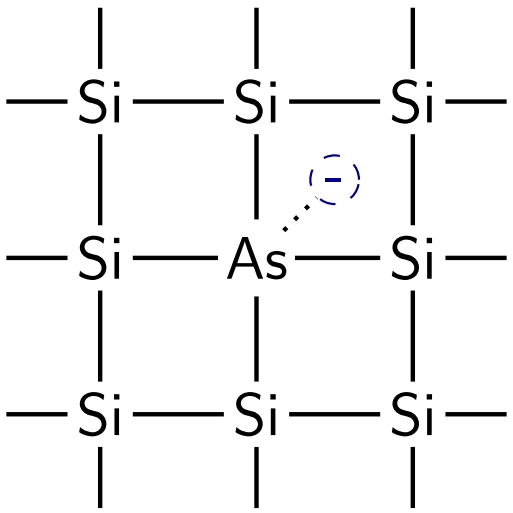
схематичное двумерное изображение

```
   |     |
– Si – Si –
   |     |
– Si – Si –
   |     |
```

Кристаллический кремний сам по себе не очень удобный полупроводник: он (*как правило*) имеет 4 валентных электрона, и все они закреплены в связях кристаллической решётки

Немного физики: полупроводники

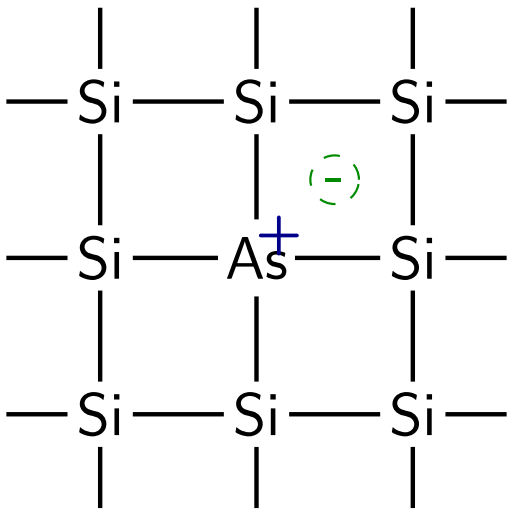
В качестве примеси можно вкрапить в решётку кремния мышьяк (As):



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

Немного физики: полупроводники

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



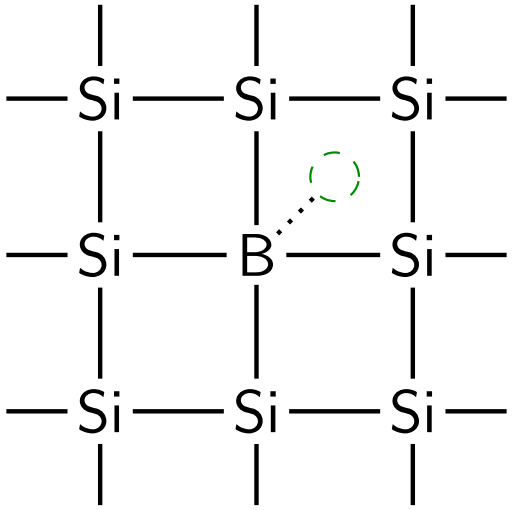
Мышьяк имеет 5 валентных электронов, из них 4 связаны кристаллической решёткой

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

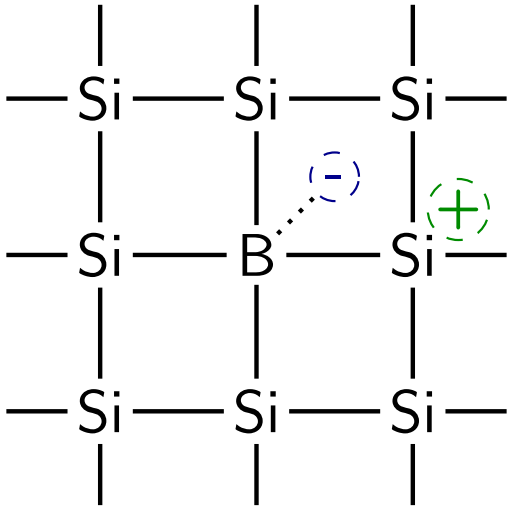
В качестве примеси можно вкрапить в решётку кремния бор (B):



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):



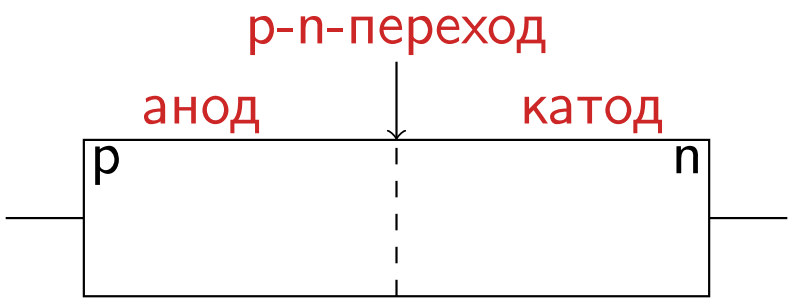
Бор имеет 3 валентных электрона, и для связей кристаллической решётки используются они и ещё один электрон бора

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

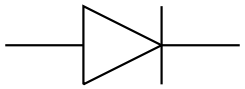
Это полупроводник p-типа (positive charge)

Немного физики: диод

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

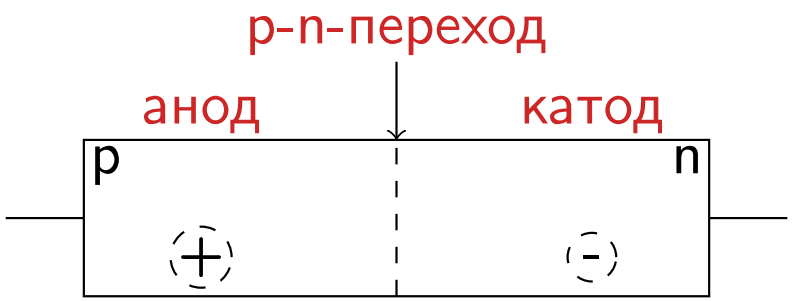


Это полупроводниковый диод, пропускающий ток в одну сторону и не пропускающий обратный ток:

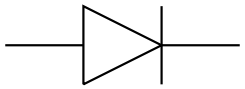


Немного физики: диод

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

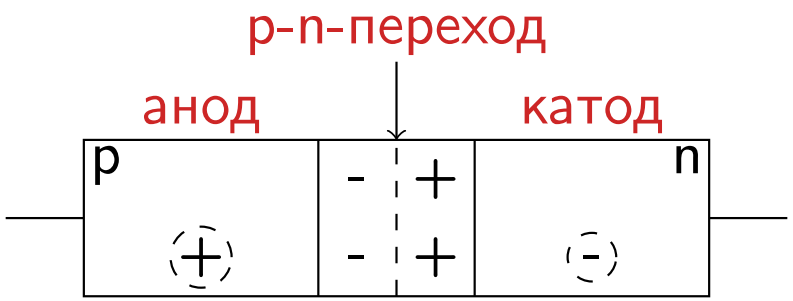


Это полупроводниковый диод, пропускающий ток в одну сторону и не пропускающий обратный ток:

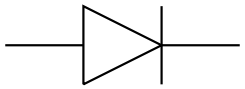


Немного физики: диод

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

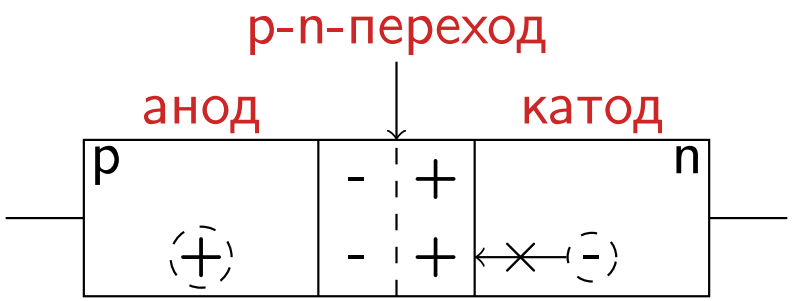


Это полупроводниковый диод, пропускающий ток в одну сторону и не пропускающий обратный ток:

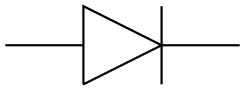


Немного физики: диод

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

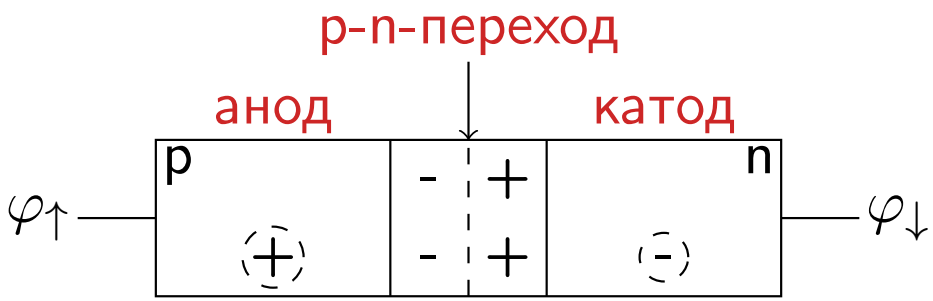


Это полупроводниковый диод, пропускающий ток в одну сторону и не пропускающий обратный ток:



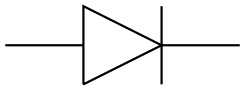
Немного физики: диод

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



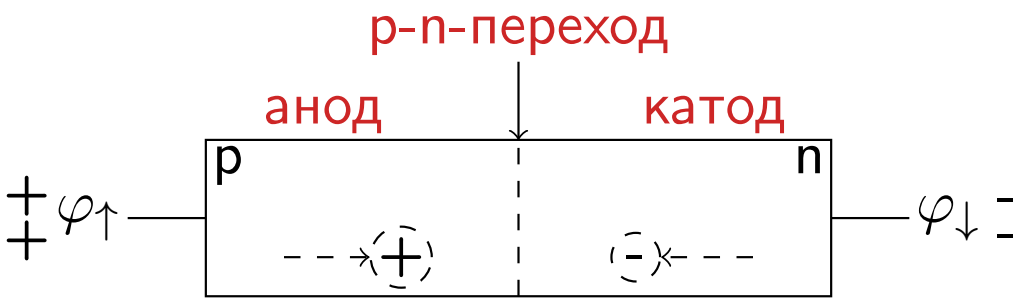
Здесь и дальше: $\varphi_\uparrow$ — *высокий потенциал,*
$\varphi_\downarrow$ — *низкий потенциал*

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



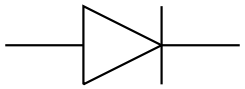
Немного физики: диод

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



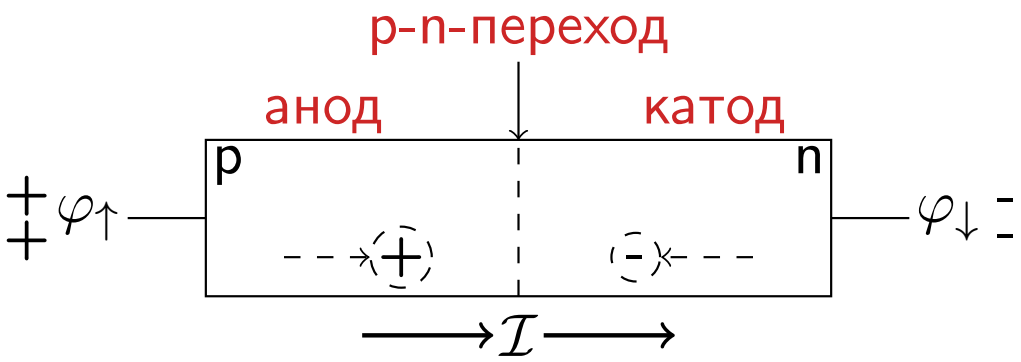
Здесь и дальше: $\varphi_\uparrow$ *— высокий потенциал,*
$\varphi_\downarrow$ *— низкий потенциал*

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



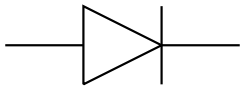
Немного физики: диод

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



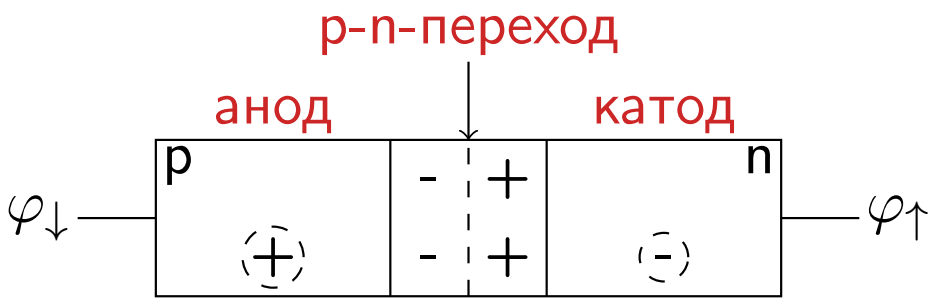
Здесь и дальше: $\varphi_\uparrow$ — *высокий потенциал,*
$\varphi_\downarrow$ — *низкий потенциал*

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



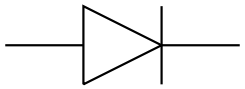
Немного физики: диод

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



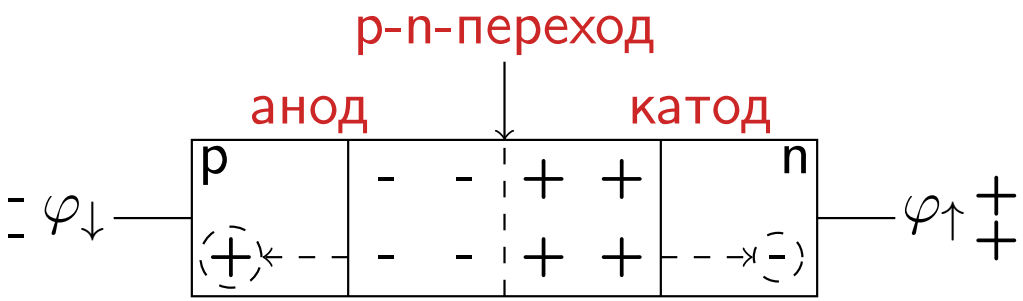
Здесь и дальше: $\varphi_\uparrow$ — *высокий потенциал,*
$\varphi_\downarrow$ — *низкий потенциал*

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



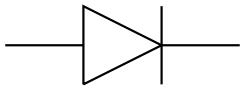
Немного физики: диод

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



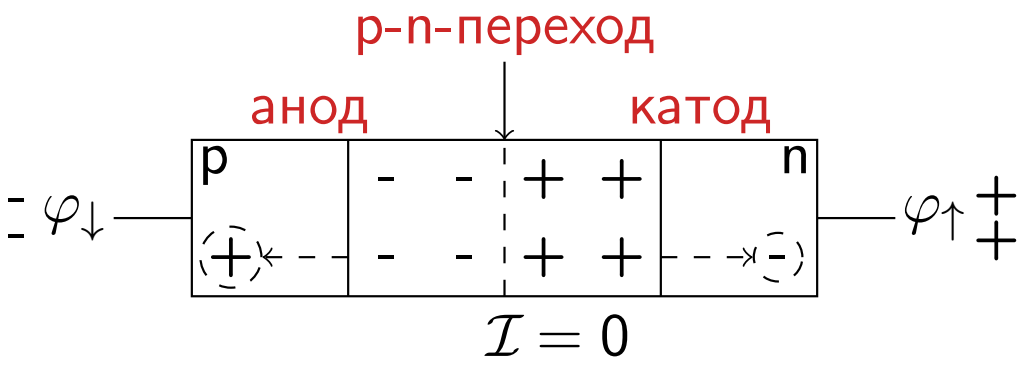
Здесь и дальше: $\varphi_\uparrow$ — *высокий потенциал,*
$\varphi_\downarrow$ — *низкий потенциал*

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



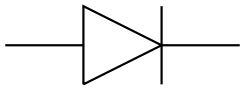
Немного физики: диод

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



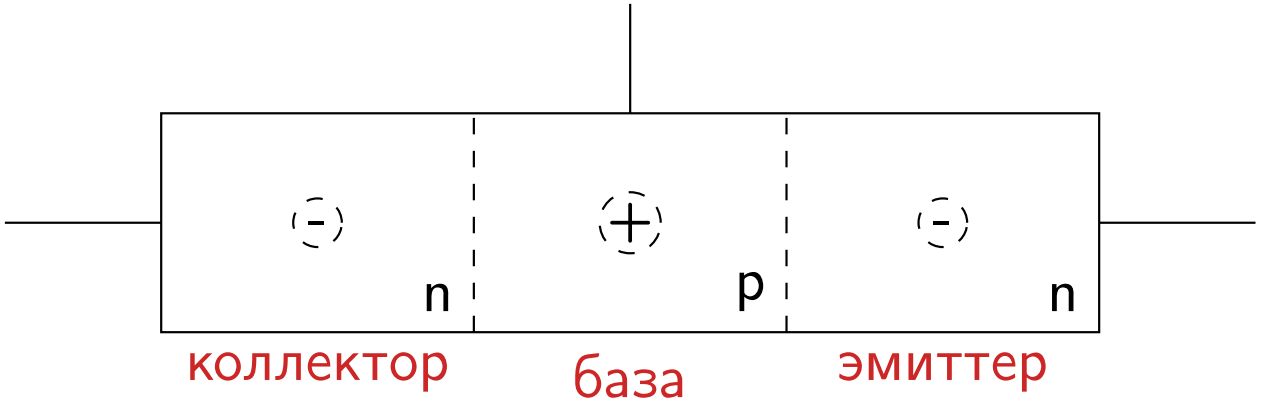
Здесь и дальше: $\varphi_\uparrow$ — *высокий потенциал,*
$\varphi_\downarrow$ — *низкий потенциал*

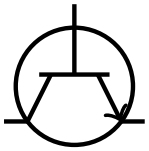
Это полупроводниковый диод, пропускающий ток в одну сторону и не пропускающий обратный ток:



Немного физики: биполярный транзистор

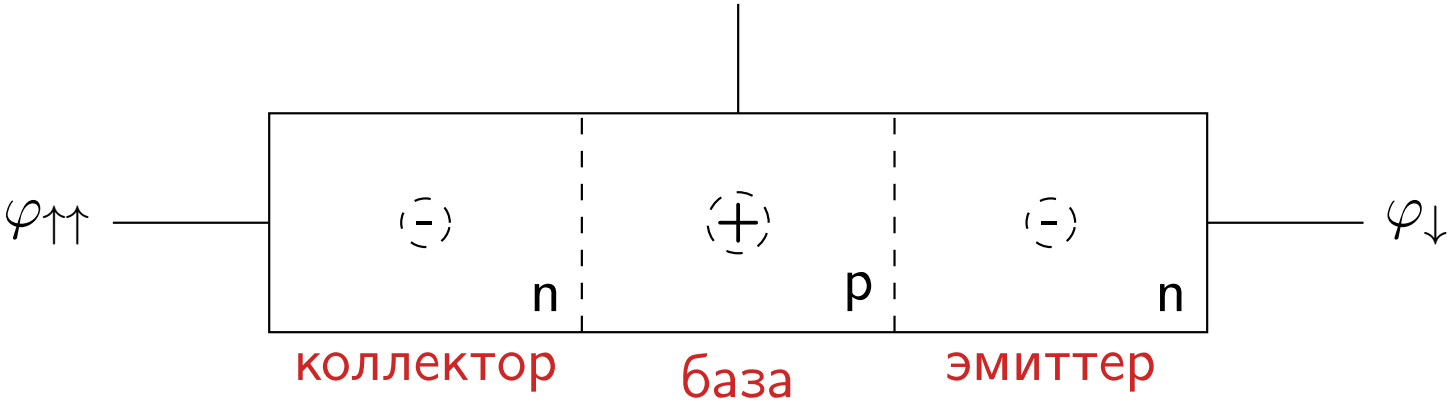
Ещё более нетривиальная проводимость получается, если расположить последовательно полупроводники n-, p- и снова n-типов:



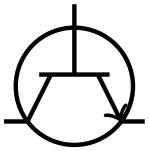
Это биполярный npn-транзистор: 

Немного физики: биполярный транзистор

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

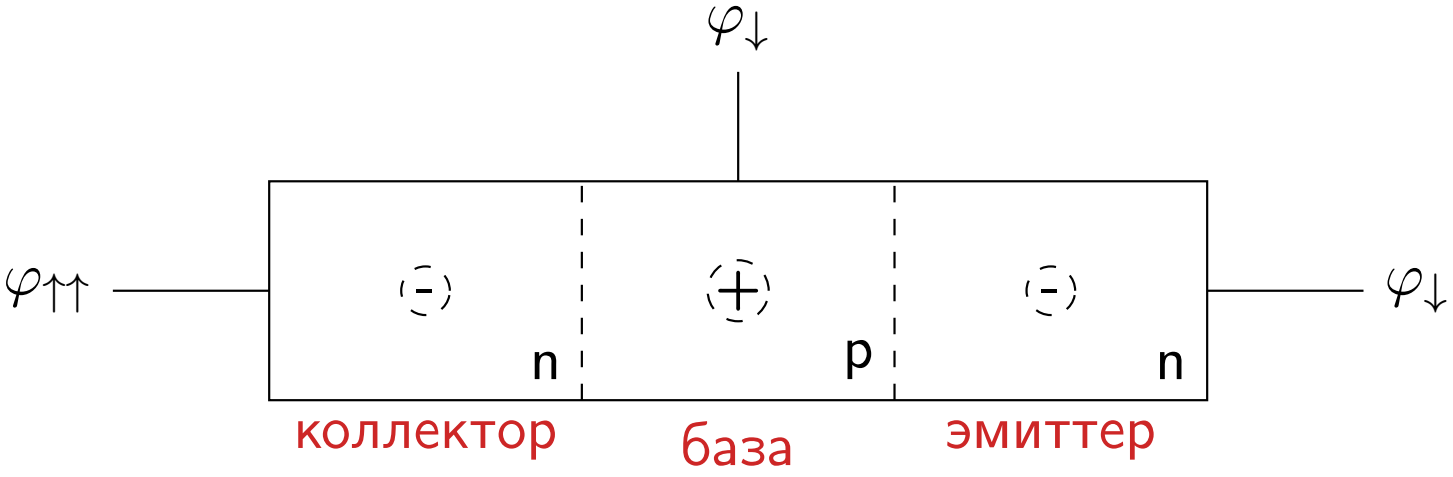


$\varphi\uparrow\uparrow$ — очень высокий потенциал

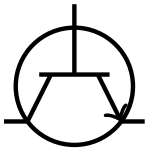
Это биполярный npn-транзистор: 

Немного физики: биполярный транзистор

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

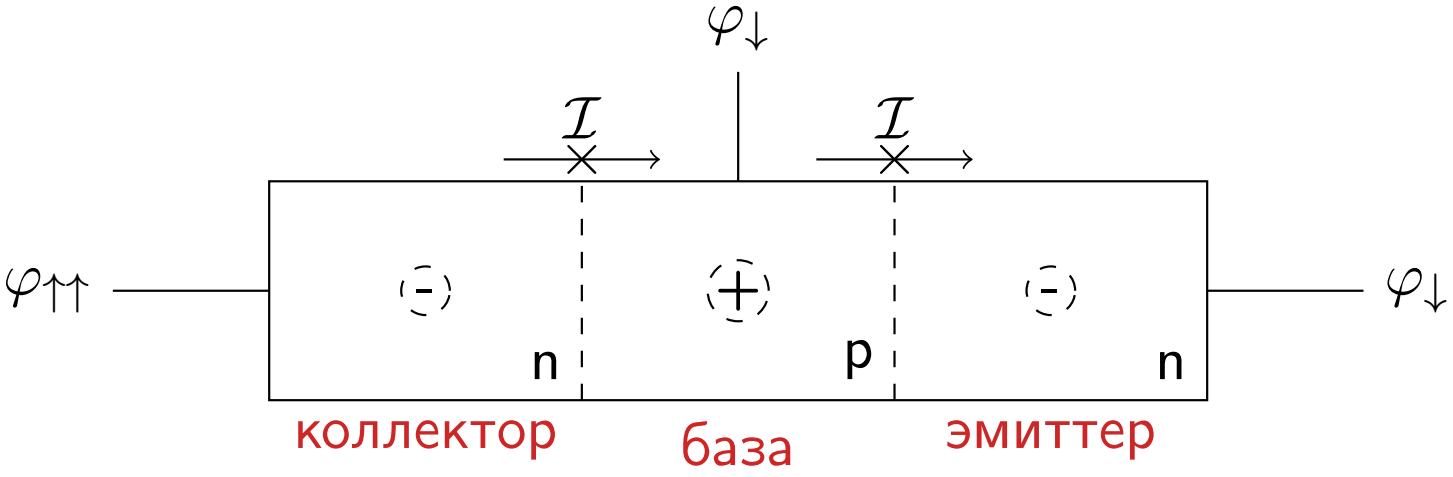


$\varphi_{\uparrow\uparrow}$ — очень высокий потенциал

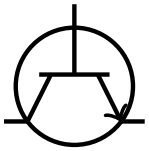
Это биполярный npn-транзистор: 

Немного физики: биполярный транзистор

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

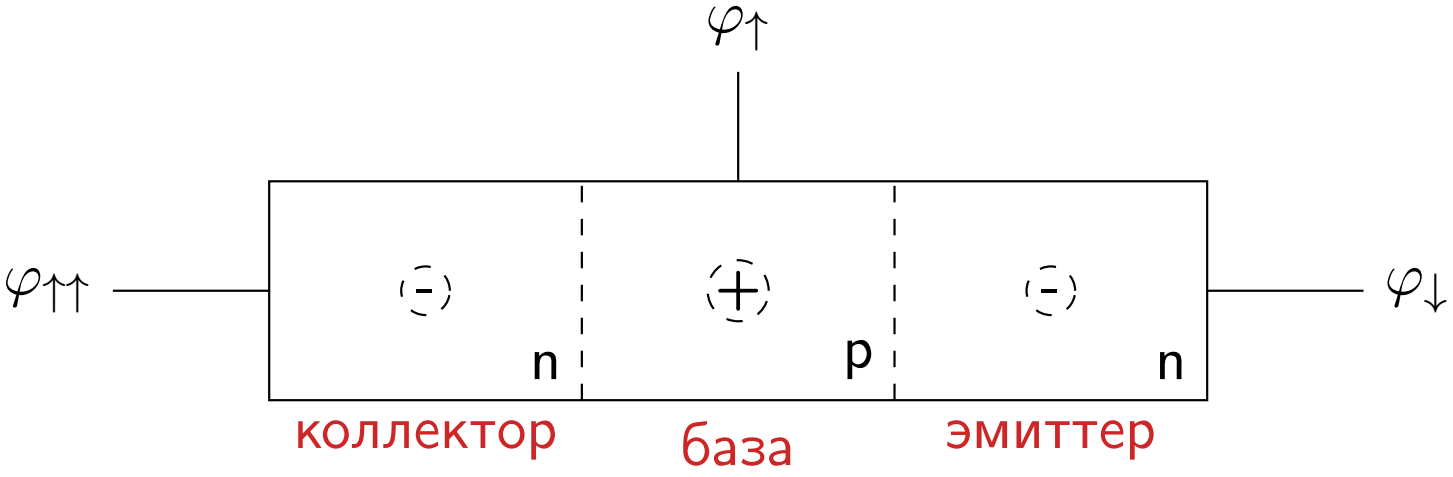


$\varphi_{\uparrow\uparrow}$ — очень высокий потенциал

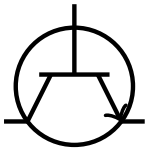
Это биполярный npn-транзистор: 

Немного физики: биполярный транзистор

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

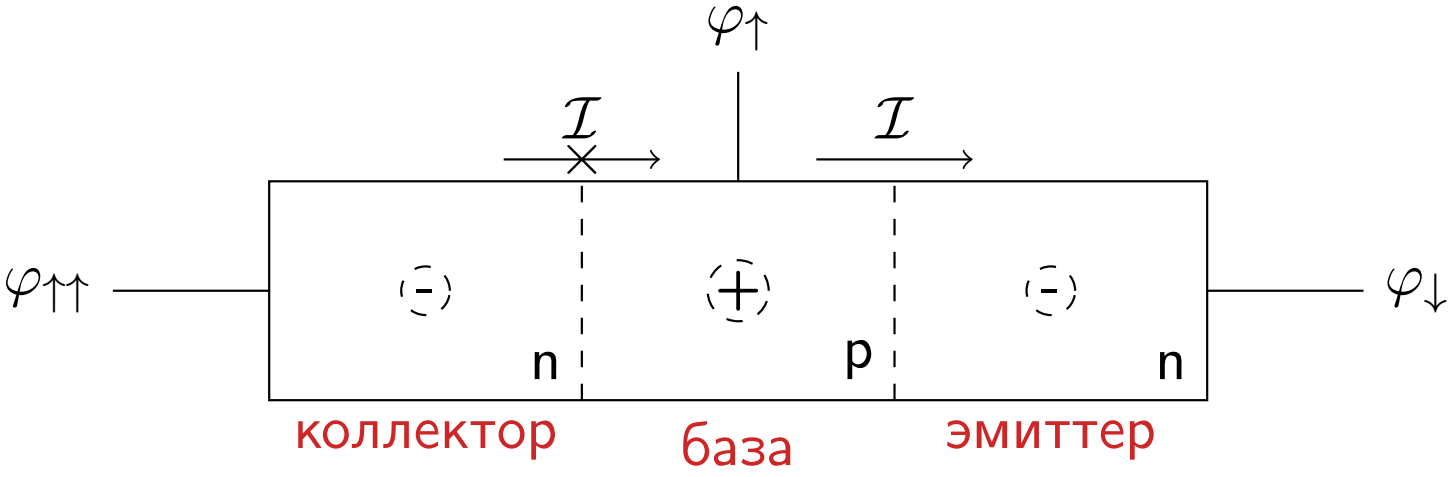


$\varphi_{\uparrow\uparrow}$ — очень высокий потенциал

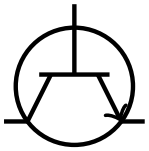
Это биполярный npn-транзистор: 

Немного физики: биполярный транзистор

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

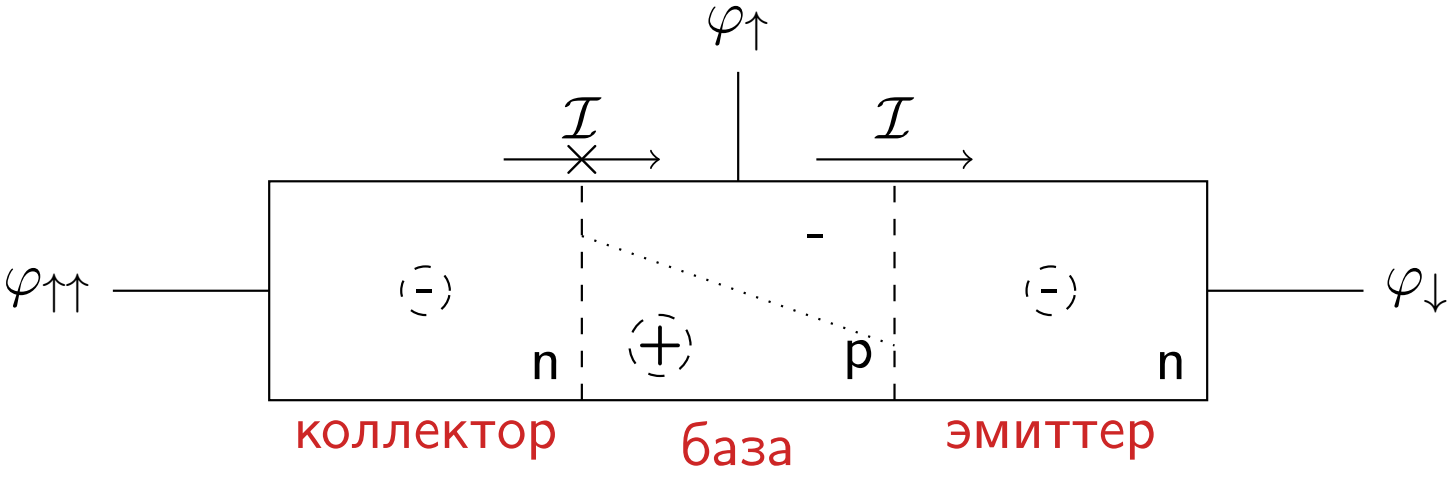


$\varphi_{\uparrow\uparrow}$ — очень высокий потенциал

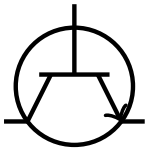
Это биполярный npn-транзистор: 

Немного физики: биполярный транзистор

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

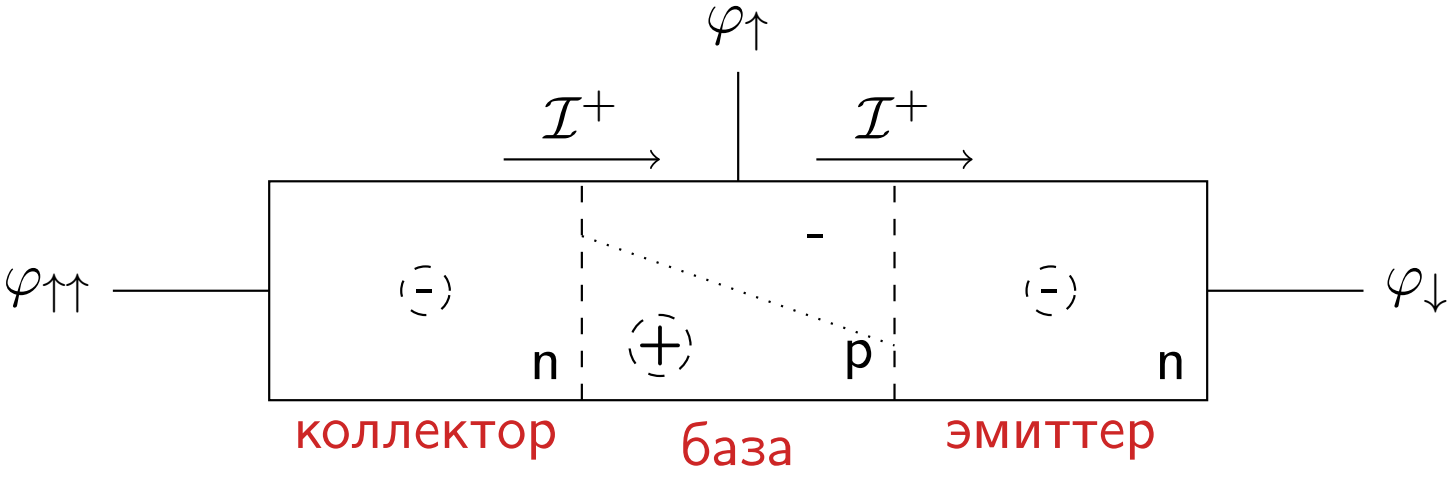


$\varphi_{\uparrow\uparrow}$ — очень высокий потенциал

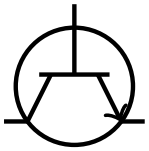
Это биполярный npn-транзистор: 

Немного физики: биполярный транзистор

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

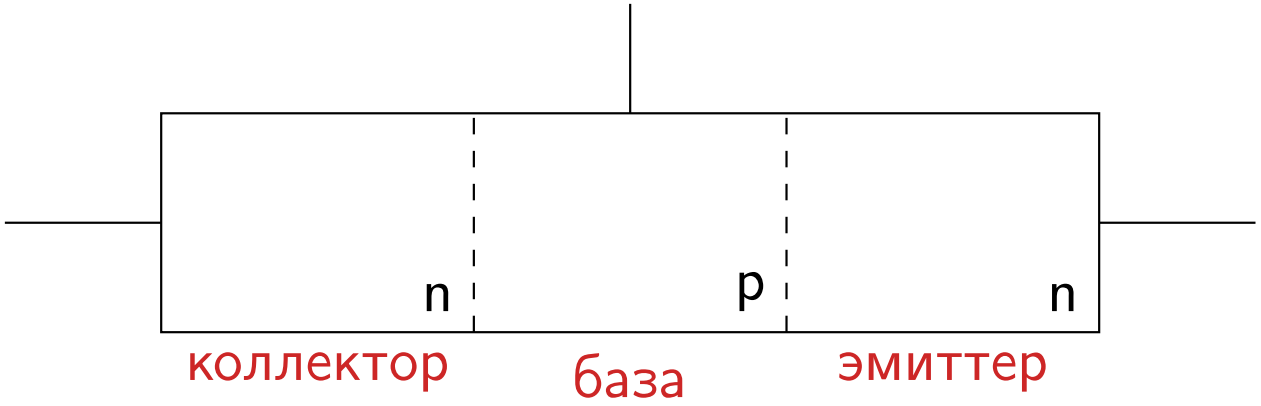


$\varphi_{\uparrow\uparrow}$ — очень высокий потенциал
$\mathcal{I}^+$ — очень сильный ток

Это биполярный npn-транзистор: 

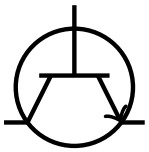
Немного физики: биполярный транзистор

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



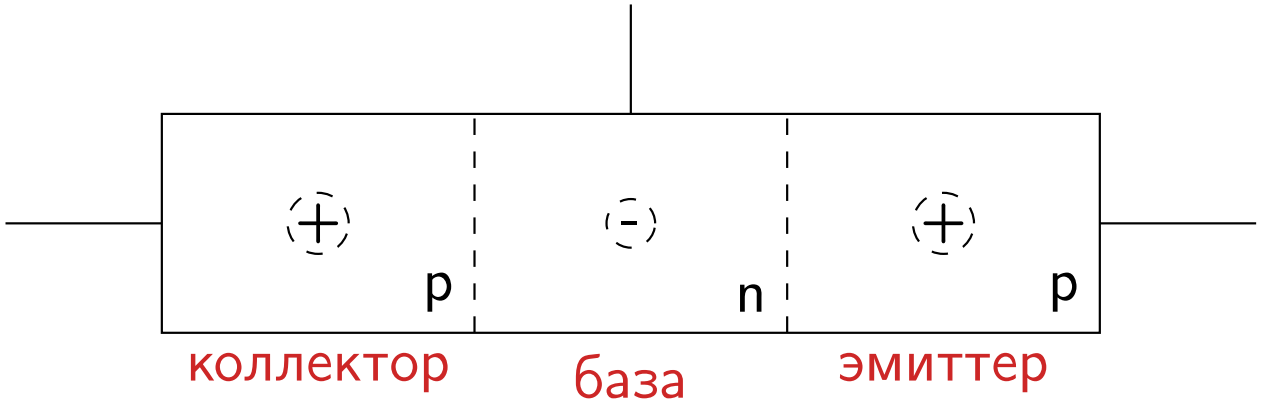
$\varphi_{\uparrow\uparrow}$ — очень высокий потенциал
$\mathcal{I}^{+}$ — очень сильный ток

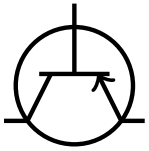
Грубый итог: эмиттер и коллектор соединены проводящим каналом $\Leftrightarrow$ к базе подведён достаточно высокий потенциал

Это биполярный npn-транзистор: 

Немного физики: биполярный транзистор

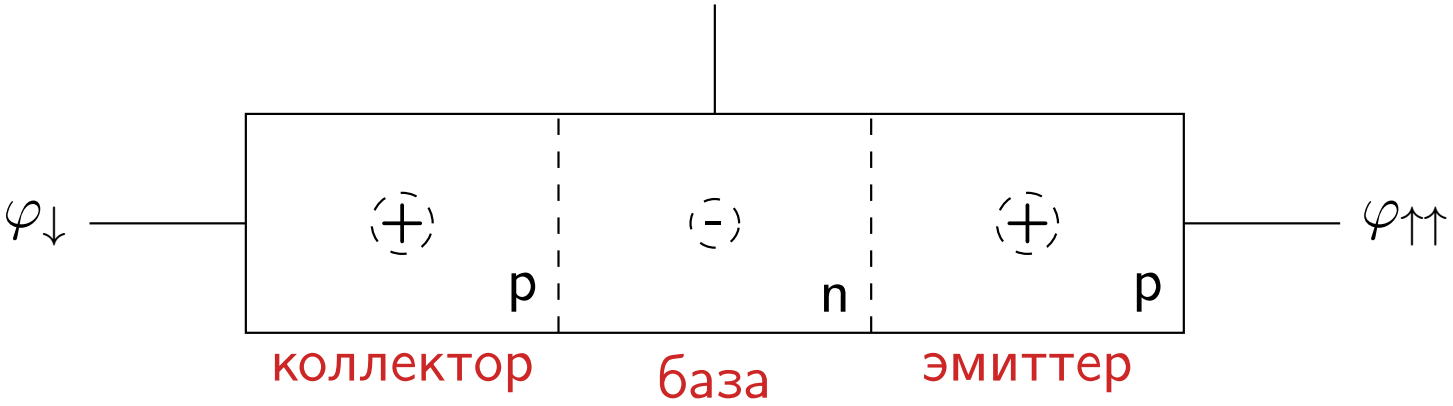
Аналогичные свойства проводимости можно получить, последовательно соединив полупроводники p-, n- и снова p-типов:

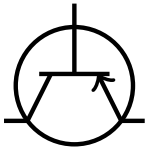


Это биполярный pnp-транзистор: 

Немного физики: биполярный транзистор

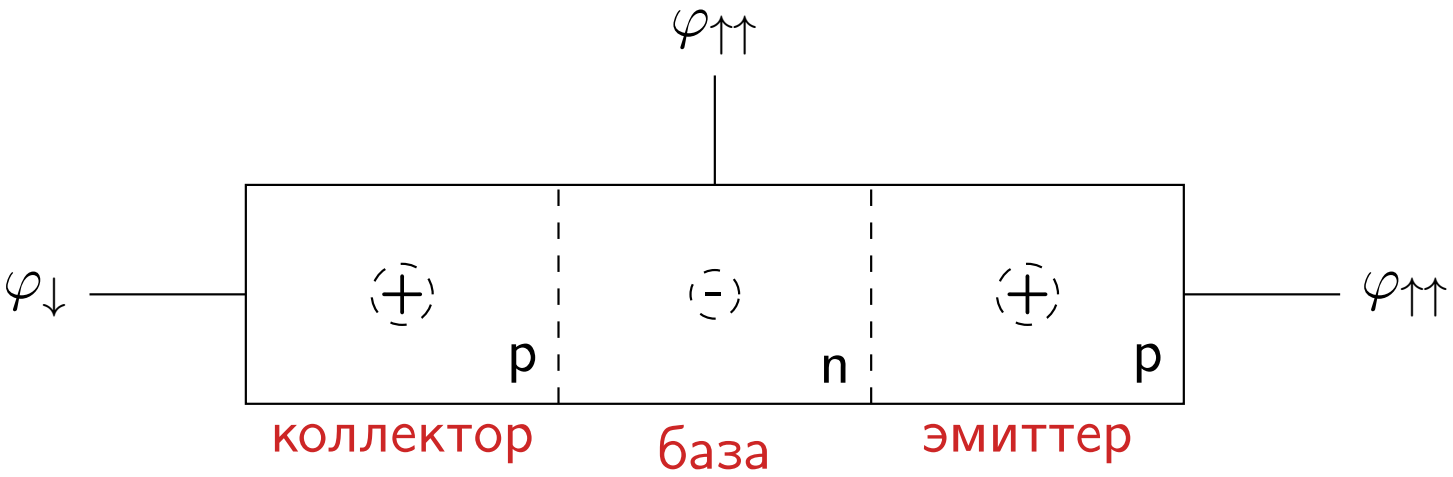
Аналогичные свойства проводимости можно получить, последовательно соединив полупроводники p-, n- и снова p-типов:

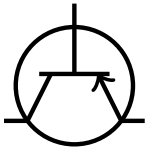


Это биполярный pnp-транзистор: 

Немного физики: биполярный транзистор

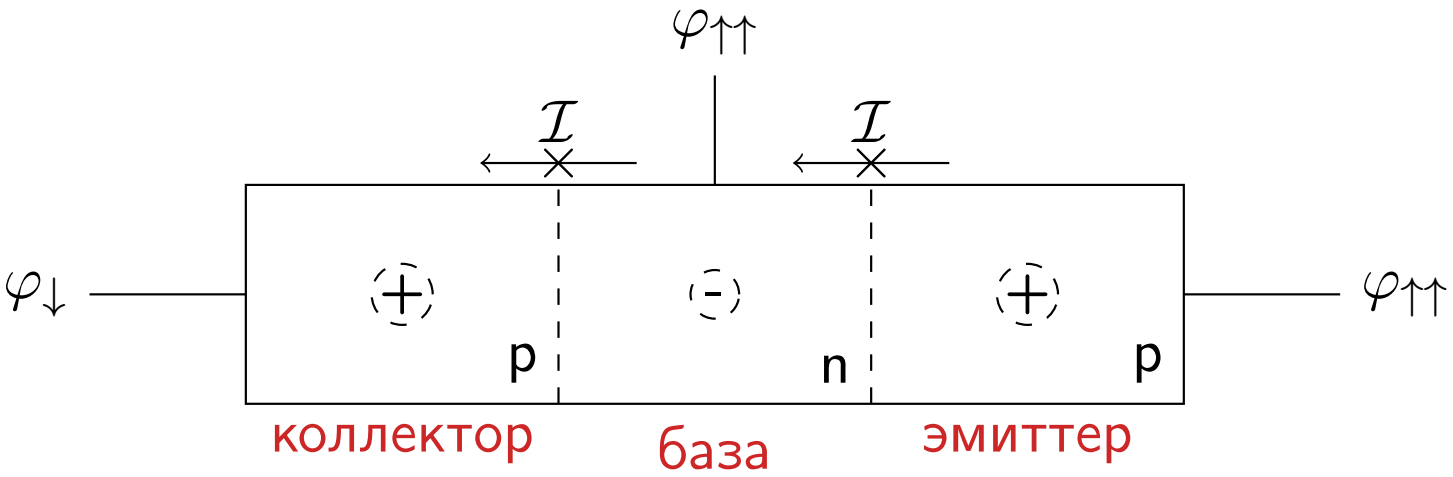
Аналогичные свойства проводимости можно получить, последовательно соединив полупроводники p-, n- и снова p-типов:

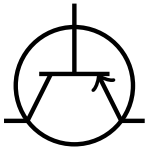


Это биполярный pnp-транзистор: 

Немного физики: биполярный транзистор

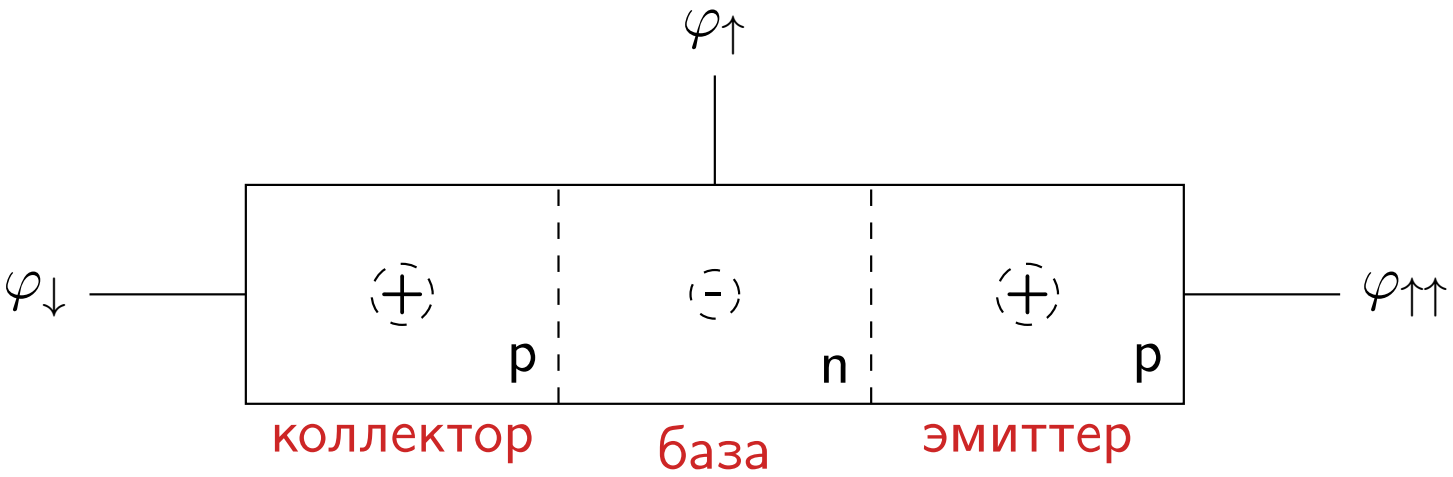
Аналогичные свойства проводимости можно получить, последовательно соединив полупроводники p-, n- и снова p-типов:

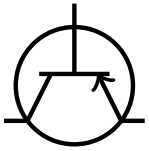


Это биполярный pnp-транзистор: 

Немного физики: биполярный транзистор

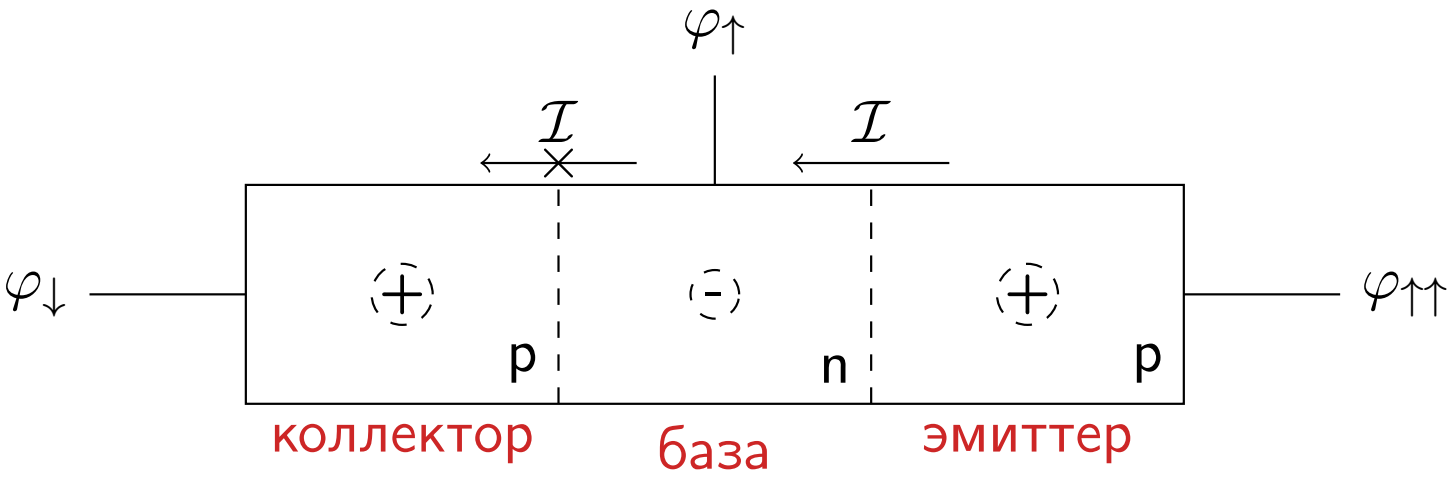
Аналогичные свойства проводимости можно получить, последовательно соединив полупроводники p-, n- и снова p-типов:

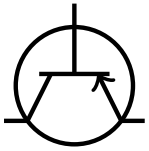


Это биполярный pnp-транзистор: 

Немного физики: биполярный транзистор

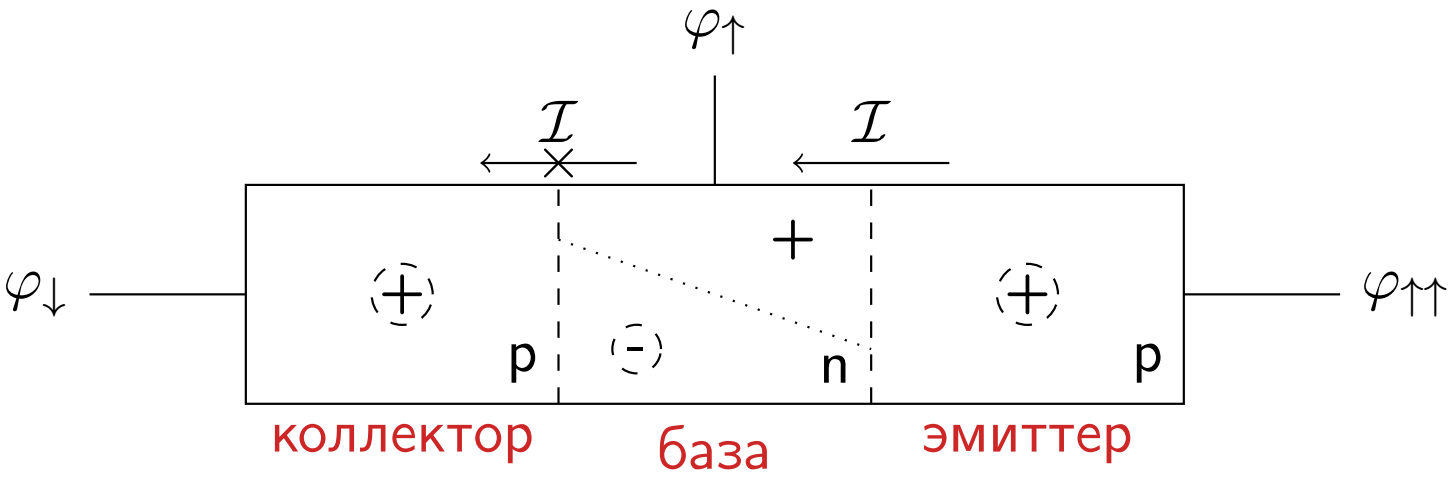
Аналогичные свойства проводимости можно получить, последовательно соединив полупроводники p-, n- и снова p-типов:

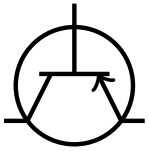


Это биполярный pnp-транзистор: 

Немного физики: биполярный транзистор

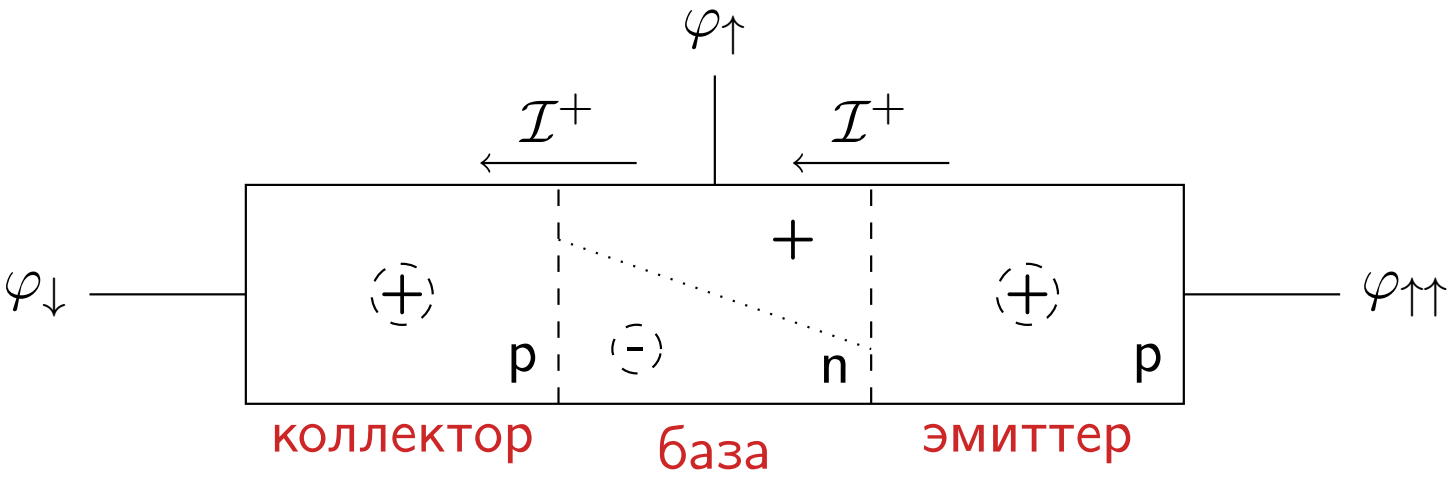
Аналогичные свойства проводимости можно получить, последовательно соединив полупроводники p-, n- и снова p-типов:

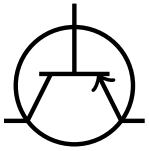


Это биполярный pnp-транзистор: 

Немного физики: биполярный транзистор

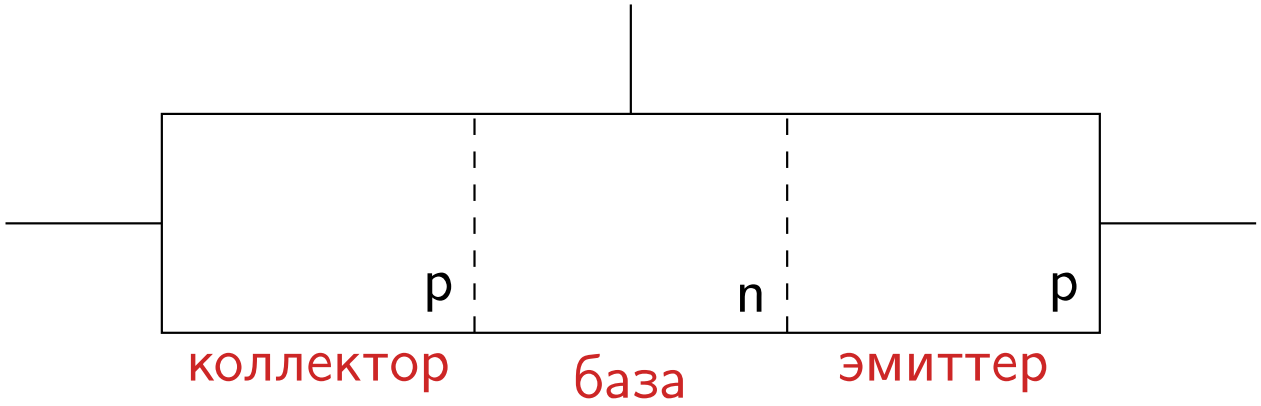
Аналогичные свойства проводимости можно получить, последовательно соединив полупроводники p-, n- и снова p-типов:



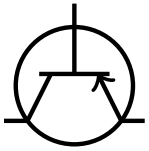
Это биполярный pnp-транзистор: 

Немного физики: биполярный транзистор

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



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

Это биполярный pnp-транзистор: 

Немного физики: МОП-транзистор

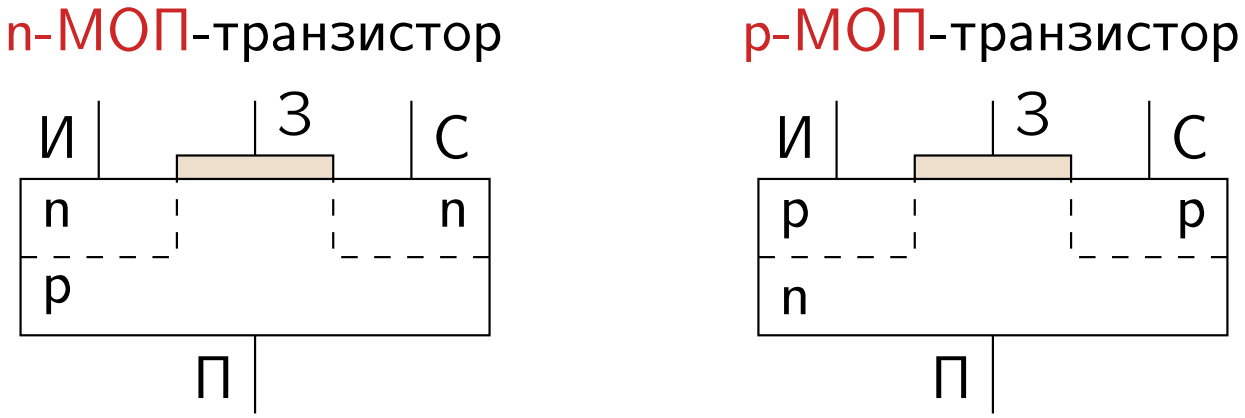
МОП-транзисторы (*с индуцированным каналом*) — это полевые транзисторы, из которых обычно строятся сверхбольшие интегральные схемы

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. **П**олупроводники, 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

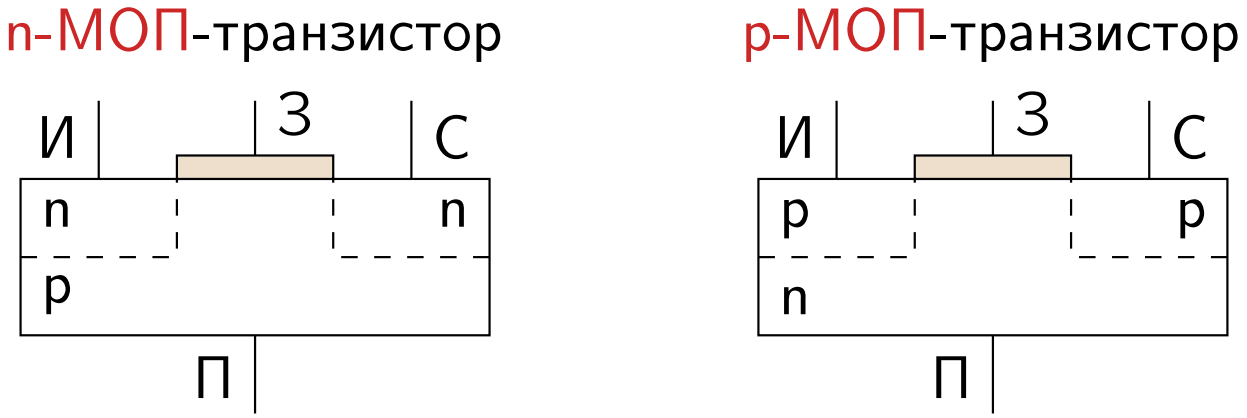
Немного физики: МОП-транзистор



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 $\varphi_{\uparrow} = Vcc$

Немного физики: МОП-транзистор

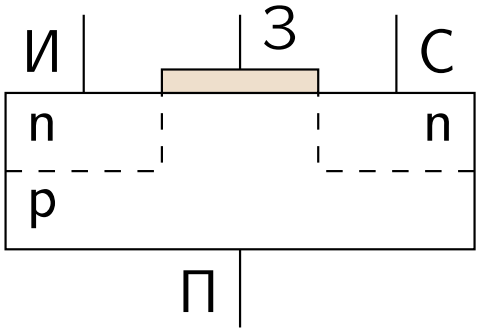


Если не принимать во внимание затвор, то МОП-транзисторы очень похожи на биполярные транзисторы, но всё же они применяются совсем по-другому:

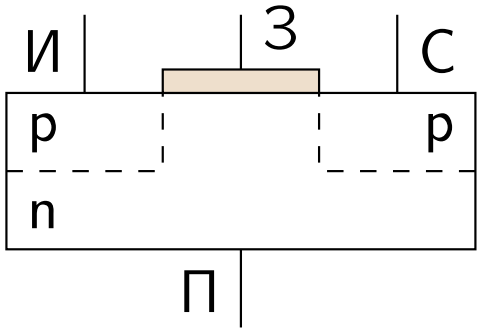
- основное назначение МОП-транзистора — передача потенциалов с контактов Vcc и GND во внутренние части схемы и на внешние контакты, с которых уровни напряжения будут считываться другими электрическими схемами

Немного физики: МОП-транзистор

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор



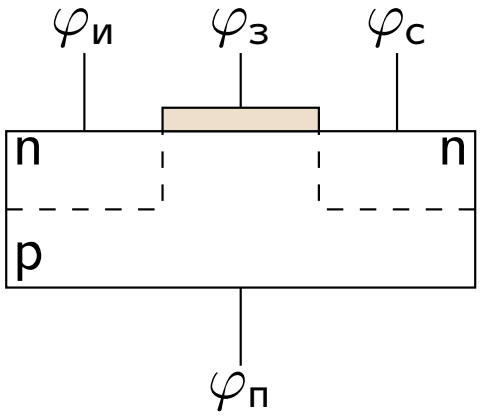
Если не принимать во внимание затвор, то МОП-транзисторы очень похожи на биполярные транзисторы, но всё же они применяются совсем по-другому:

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

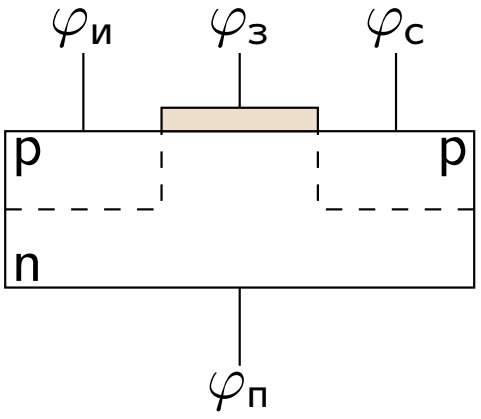
Немного физики: МОП-транзистор

МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



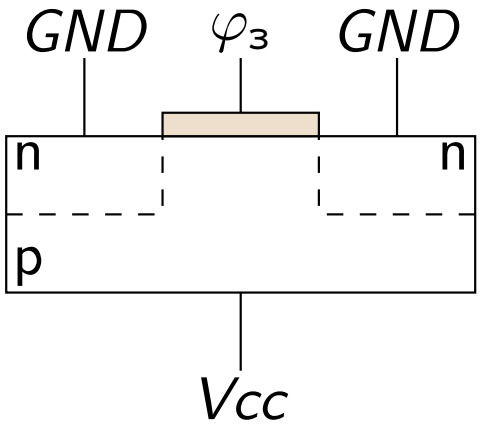
p-МОП-транзистор



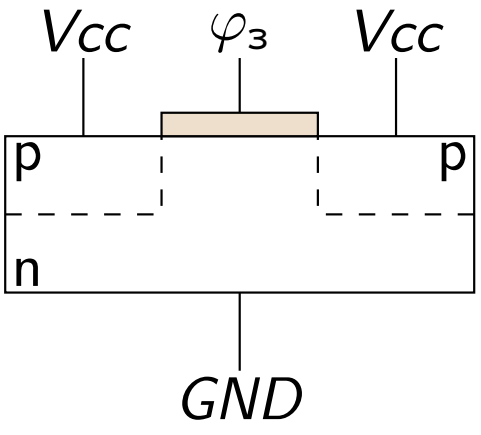
Немного физики: МОП-транзистор

МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор

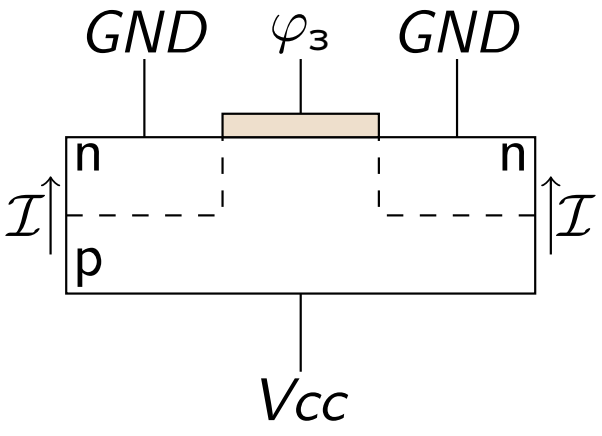


Если $\varphi_п$ = Vcc/GND и на сток или исток подан потенциал GND/Vcc, то между стоком/истоком и подложкой возникает немалый ток

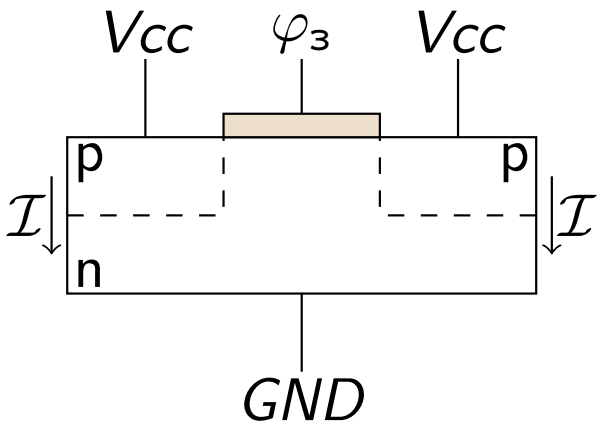
Немного физики: МОП-транзистор

МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор

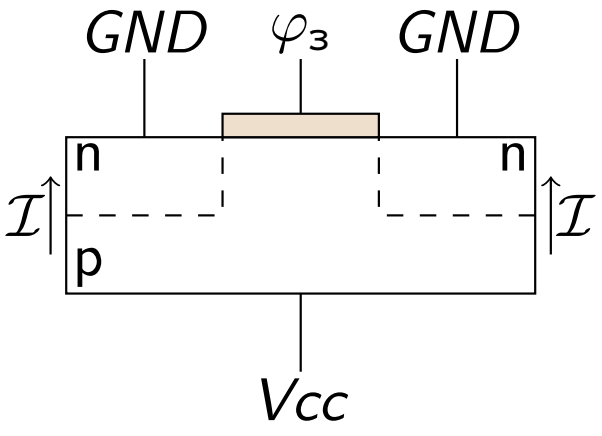


Если $\varphi_п$ = Vcc/GND и на сток или исток подан потенциал GND/Vcc, то между стоком/истоком и подложкой возникает немалый ток

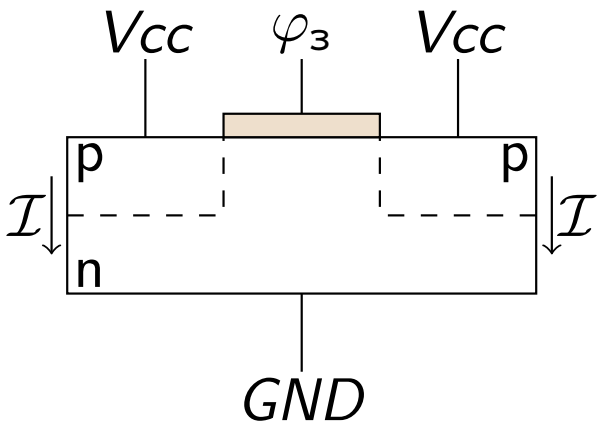
Немного физики: МОП-транзистор

МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор



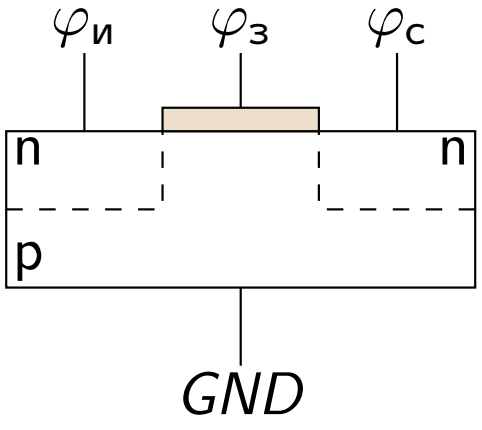
Если $\varphi_п$ = Vcc/GND и на сток или исток подан потенциал GND/Vcc, то между стоком/истоком и подложкой возникает немалый ток

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

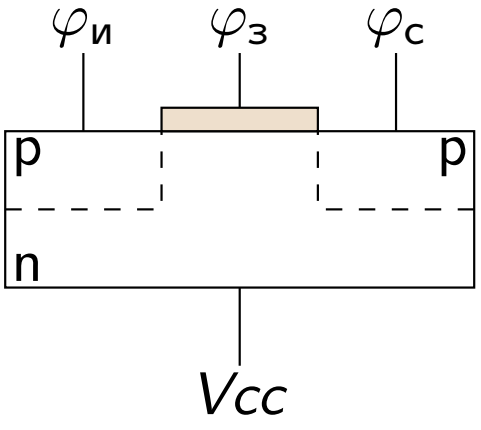
Немного физики: МОП-транзистор

МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор



Если $\varphi_п$ = Vcc/GND и на сток или исток подан потенциал GND/Vcc, то между стоком/истоком и подложкой возникает немалый ток

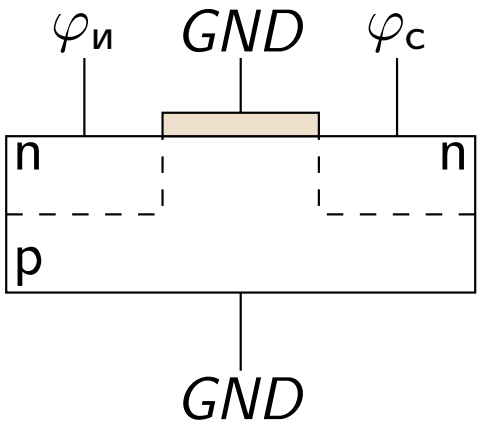
Такое поведение нежелательно, так как назначение МОП-транзистора — передача потенциала, а не поддержание тока

Поэтому $\varphi_п$ = GND/Vcc

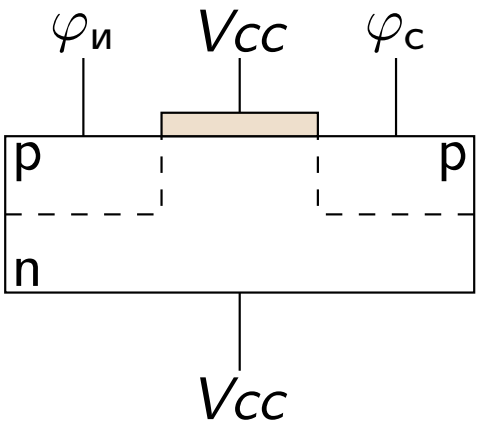
Немного физики: МОП-транзистор

МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор

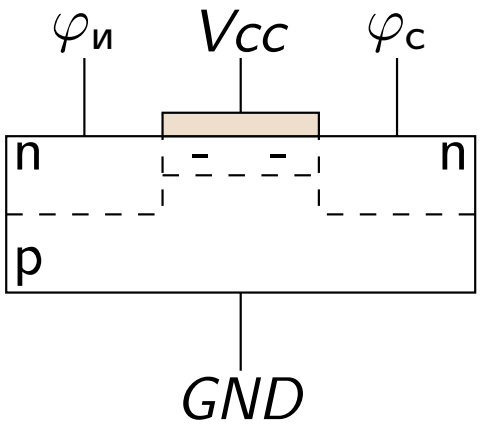


Если $\varphi_з =$ GND/Vcc, то исток и сток изолированы

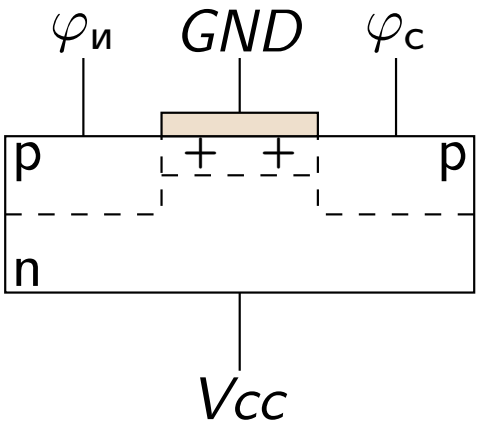
Немного физики: МОП-транзистор

МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор



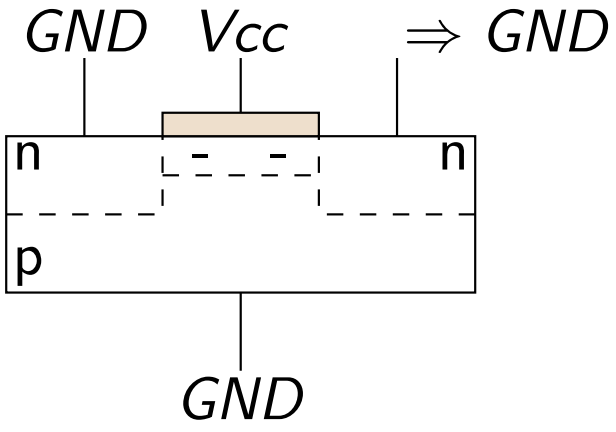
Если $\varphi_з =$ GND/Vcc, то исток и сток изолированы

Если $\varphi_з =$ Vcc/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

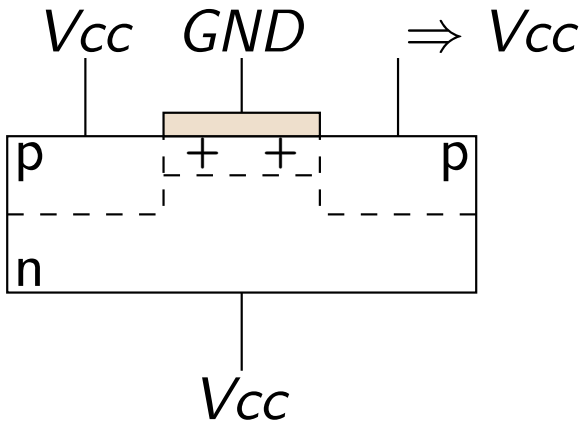
Немного физики: МОП-транзистор

МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор

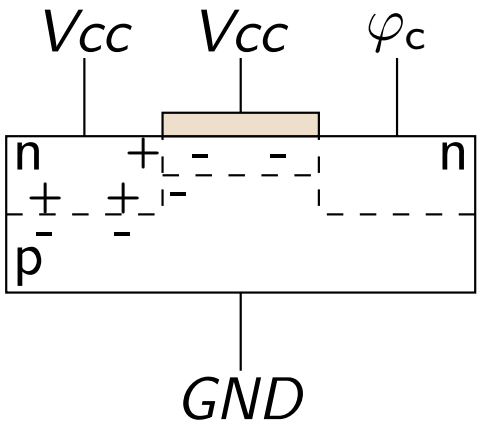


Если $\varphi_{\text{и}} = GND/Vcc$, а в стоке созданы условия *полной изоляции*, при которых потенциал может легко изменяться небольшим кратковременным током, то потенциалы стока и истока при открытом канале *примерно* выравниваются

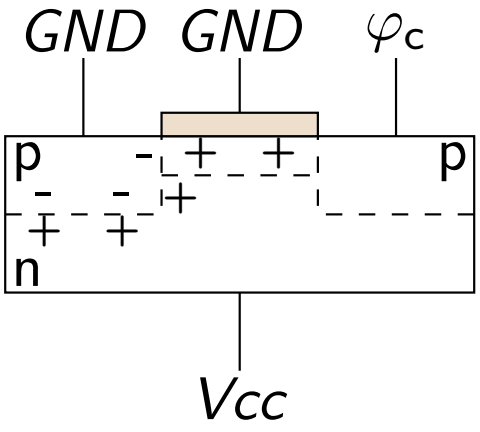
Немного физики: МОП-транзистор

МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор

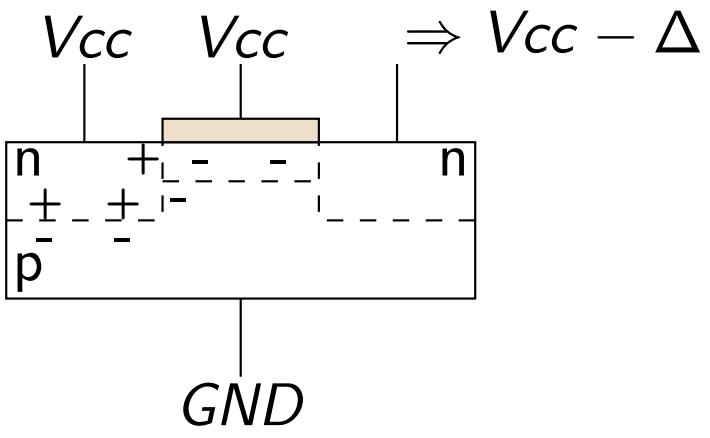


Если $\varphi_и = Vcc/GND$, то между истоком и подложкой образуется широкий p-n-переход

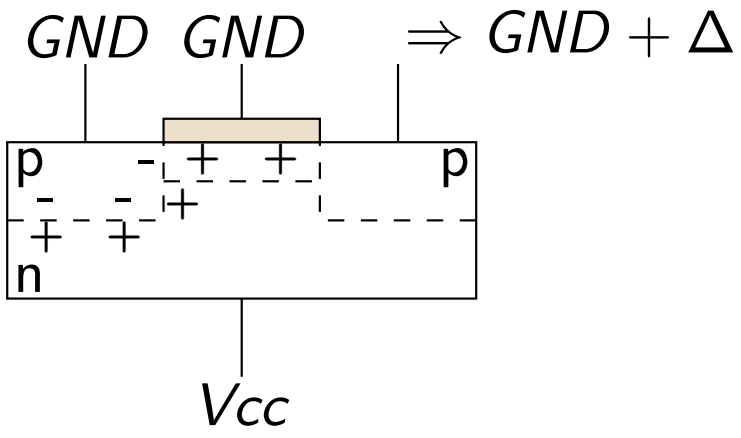
Немного физики: МОП-транзистор

МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор



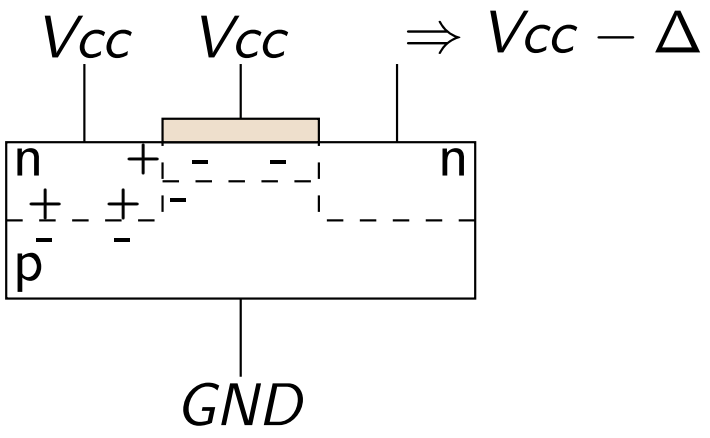
Если $\varphi_и = Vcc/GND$, то между истоком и подложкой образуется широкий p-n-переход

На преодоление перехода носителями заряда тратится заметно немалая энергия, то есть на нём заметно падает напряжение, и потенциалы $\varphi_и$, $\varphi_с$ будут заметно различаться после “выравнивания”

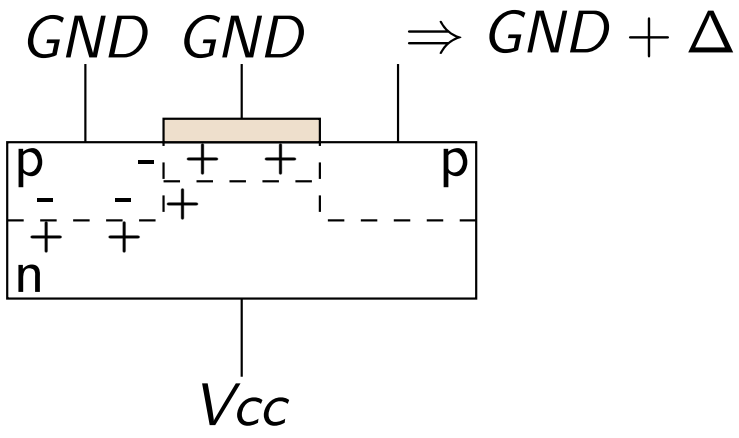
Немного физики: МОП-транзистор

МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор

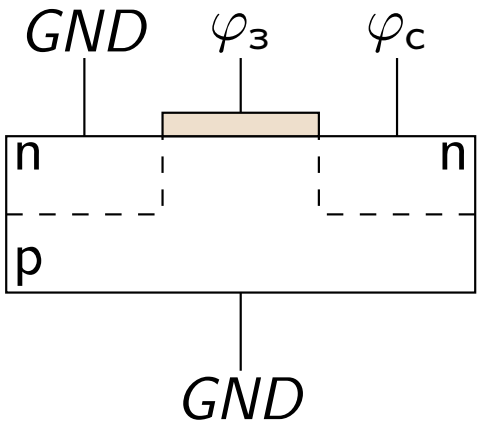


Такое поведение нежелательно, так как назначение МОП-транзистора в цифровой схеме — как можно более точная передача потенциалов Vcc и GND

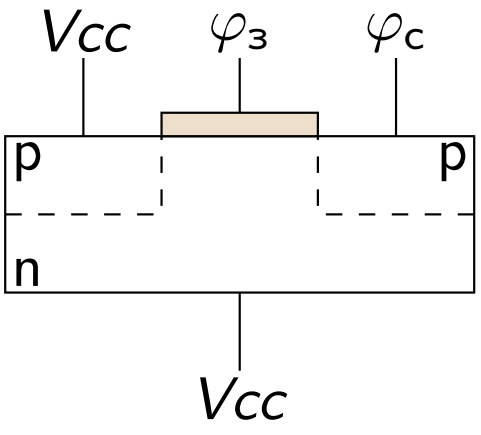
Немного физики: МОП-транзистор

МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор



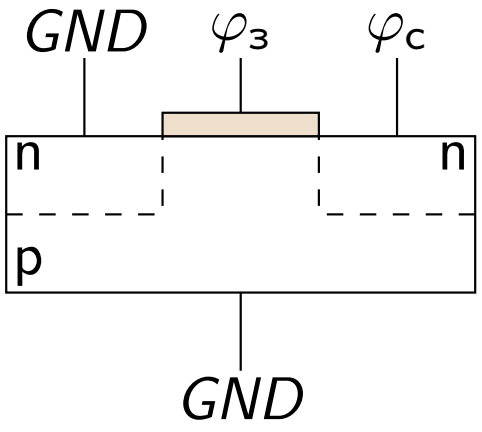
Такое поведение нежелательно, так как назначение МОП-транзистора в цифровой схеме — как можно более точная передача потенциалов Vcc и GND

Поэтому $\varphi_и = GND/Vcc$

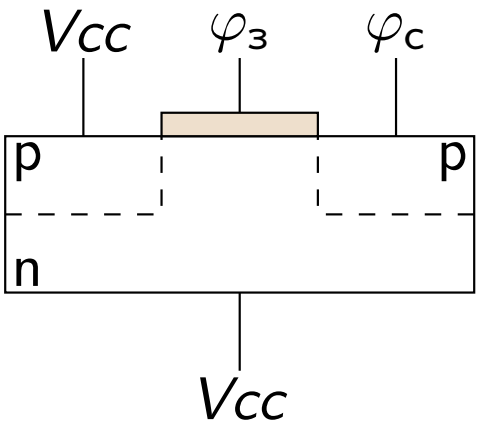
Немного физики: МОП-транзистор

МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор

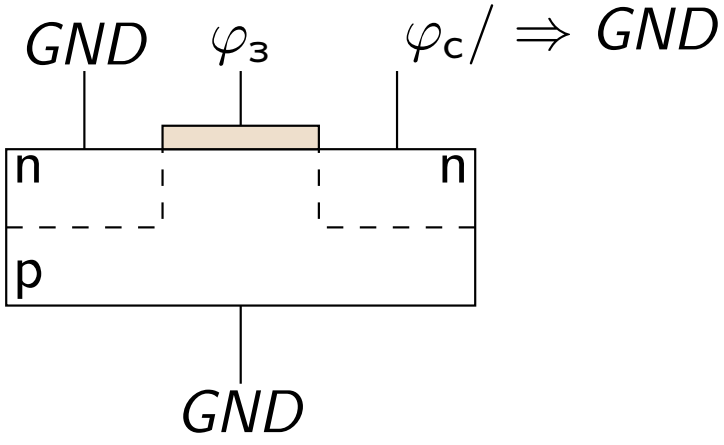


Итог. При “правильном” использовании МОП-транзистора $\varphi_и = \varphi_п = GND/Vcc$, и возможны ровно два состояния: канал закрыт и сток изолирован от истока, либо канал открыт и сток связан с истоком *почти* идеальным проводником

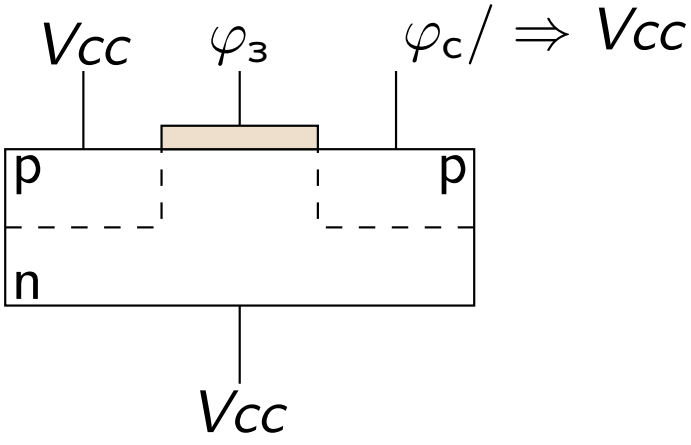
Немного физики: МОП-транзистор

МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор

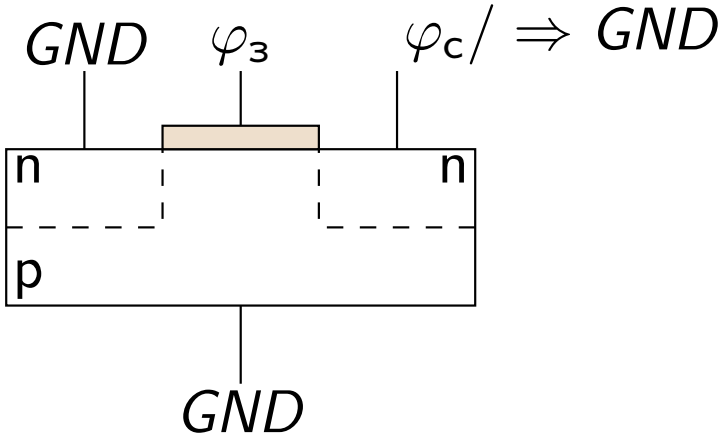


Итог. При “правильном” использовании МОП-транзистора $\varphi_и = \varphi_п = GND/Vcc$, и возможны ровно два состояния: канал закрыт и сток изолирован от истока, либо канал открыт и сток связан с истоком *почти* идеальным проводником

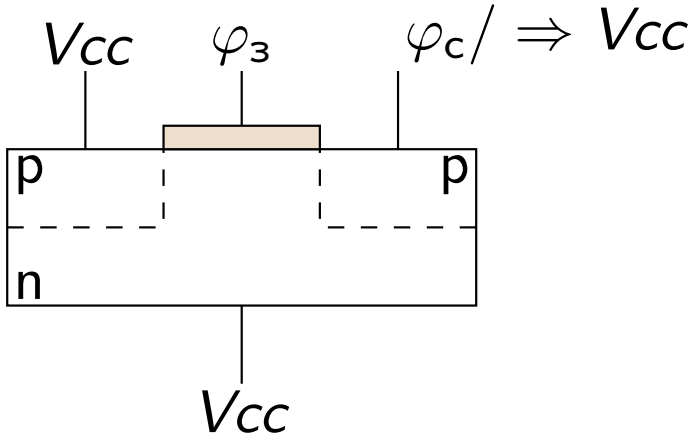
Немного физики: МОП-транзистор

МОП-транзистор в цифровых схемах

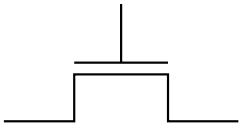
n-МОП-транзистор

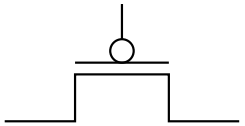


p-МОП-транзистор



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





Немного физики: КМОП

При “правильном” использовании n-МОП-транзистор способен передавать через себя *почти* без потерь только единицу (Vcc), а p-МОП-транзистор — только ноль (GND)

Для полноценной передачи обоих значений 0 и 1 в цифровых схемах используется технология КМОП:[1]

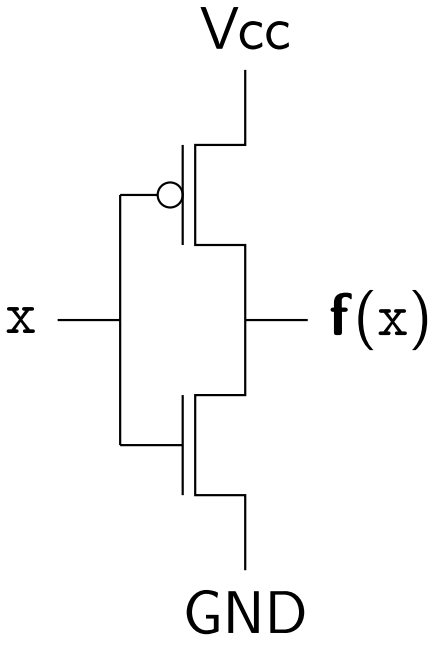
- Создаётся общая подложка p-типа
- В эту подложку вкрапляются области n-типа — стоки и истоки n-МОП-транзисторов
- Для размещения p-МОП-транзистора в основную подложку вставляется колодец: область n-типа с вкраплениями полупроводников p-типа
- Стоки, истоки и затворы транзисторов, контакты Vcc, GND и внешние контакты соединяются проводниками согласно логике схемы

[1] Комплементарные МОП-транзисторы

Немного физики: транзисторная (булева) логика

Отрицание:

$$\mathbf{f}(\mathtt{x}) = \overline{\mathtt{x}} \tag{10}$$

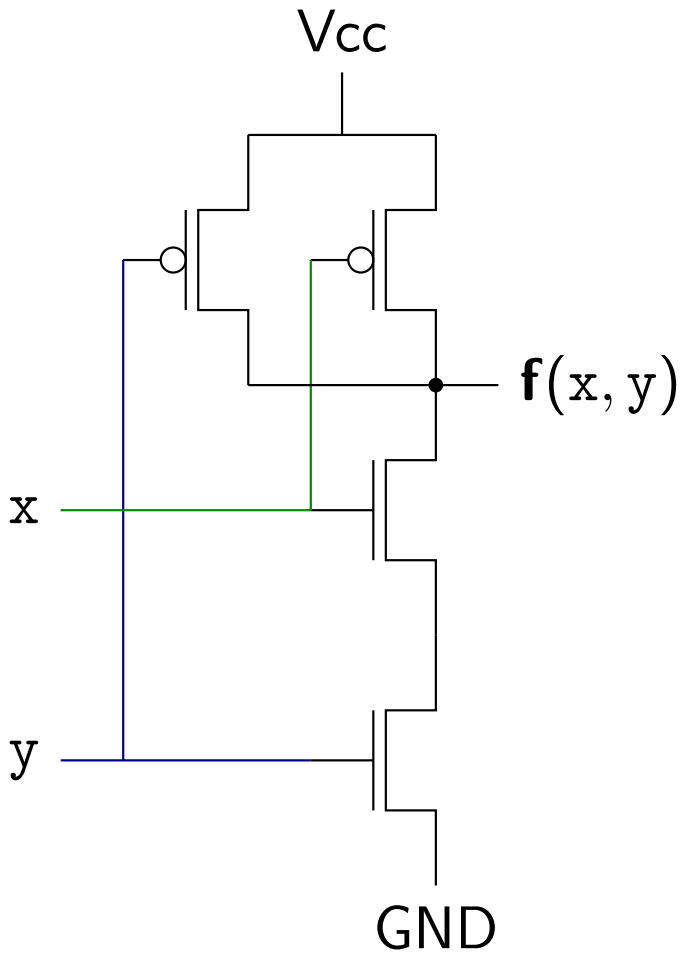


Немного физики: транзисторная (булева) логика

Штрих Шеффера:

$$\mathbf{f}(x, y) = \overline{x \cdot y}$$

(1110)

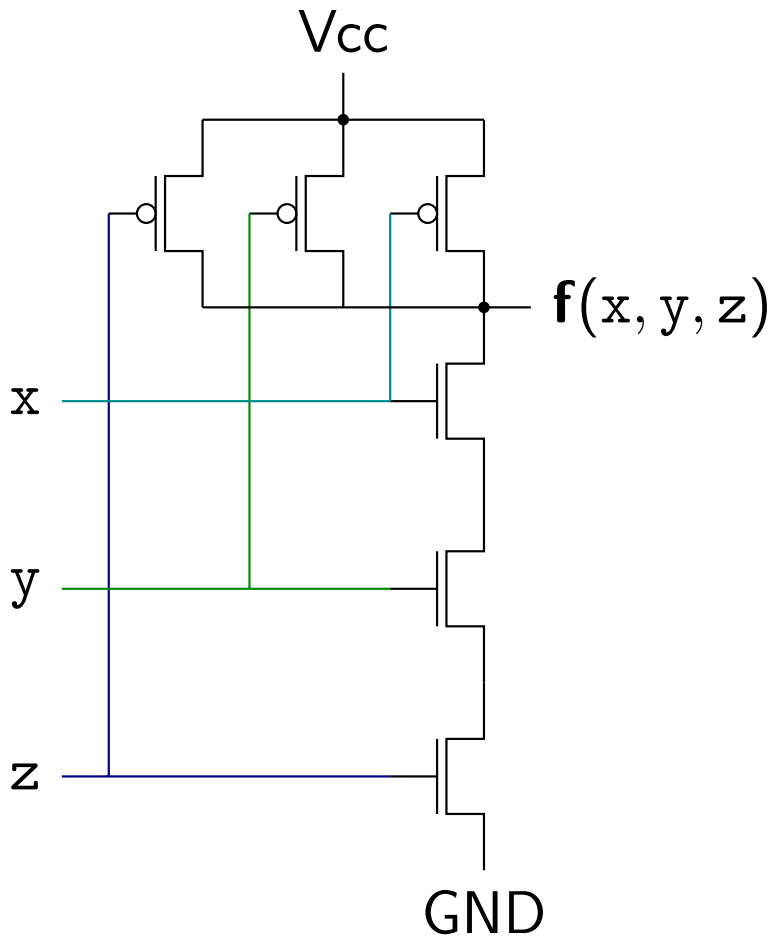


Немного физики: транзисторная (булева) логика

Трёхаргументный штрих Шеффера:

$$\mathbf{f}(\mathtt{x}, \mathtt{y}, \mathtt{z}) = \overline{\mathtt{x} \cdot \mathtt{y} \cdot \mathtt{z}}$$

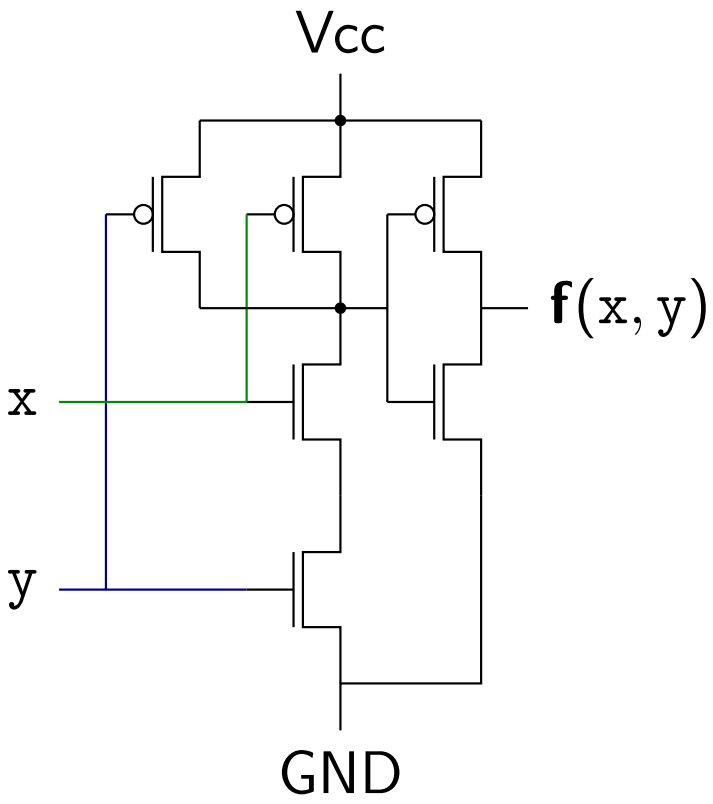
$$(11111110)$$



Немного физики: транзисторная (булева) логика

Конъюнкция:

$$\mathbf{f}(x, y) = x \cdot y$$
$$(0001)$$



Обратно к нолю и единице

При проектировании реальных схем учитывается немало физических тонкостей и эффектов:

- Как быстро сигнал распространяется через транзистор?
- Как функционал схемы зависит от скорости распространения сигналов Vcc и GND?
- Насколько точным должно быть значение напряжения Vcc, чтобы схема заработала?
- В каких случаях, где и насколько в элементах схемы падает напряжение?
- При каких уровнях напряжения транзисторы открыты, при каких закрыты, и нет ли других состояний?
- Как синхронизировать открытие и закрытие транзисторов, чтобы в схеме не возникло короткое замыкание контактов Vcc и GND?
- ...

Обратно к нолю и единице

Проектирование схемы разбивается на этапы, в каждом из которых рассматривается свой спектр анализируемых физических эффектов и своё представление схемы, например:

- Схема — это полупроводники на кристалле; рассматриваемые эффекты связаны с реальным атомным миром
- Схема — это геометрические области, в которых реализуются логические и другие элементы, и места размещения контактов; рассматриваемые эффекты связаны с пространственно-временным распространением потенциалов
- Схема — это граф соединения логических и других элементов; рассматриваются эффекты, выражаемые характеристиками графа
- Схема — это высокоуровневое описание зависимостей между входными и выходными логическими сигналами

Обратно к нолю и единице

“Схема — это высокоуровневое описание зависимостей между входными и выходными логическими сигналами”

Одно из таких представлений схемы — уровня регистровых передач[1] — используется в языке описания аппаратуры Verilog

В этом представлении можно в некоторой мере учесть некоторые физические характеристики схемы (например, скорость распространения сигнала), однако достоверный анализ функционирования реальной схемы на основании только RTL-представления принципиально невозможен

Тем не менее, RTL-представление схемы — это типичная отправная точка проектирования реальных сверхбольших интегральных схем

---

[1] RTL, Register Transfer Level