

Языки описания схем

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

ВМК МГУ, 2023/2024, осенний семестр

Вступление

ФЭ отрицания:

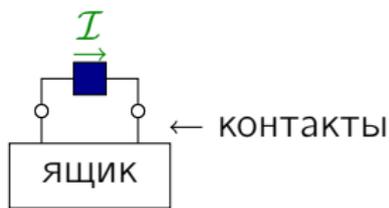


Элемент отрицания — это математическая абстракция реального объекта, в который можно посылать булево значение и получать отрицание этого значения

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

Как устроена цифровая аппаратура

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

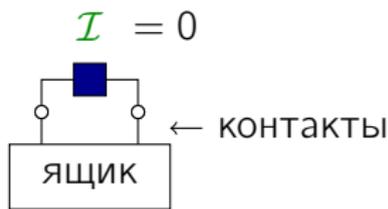


Пару контактов (○ ○) можно соединить **проводником**

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

Как устроена цифровая аппаратура

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



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

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

Немного физики: закон Ома

Закон Ома:

$$U = IR$$

- ▶ I — **сила тока** в проводнике, то есть то, насколько много электронов протекает через проводник в единицу времени
 - ▶ единица измерения: **ампер**, A
- ▶ R — **сопротивление** проводника, то есть то, сколько усилий нужно приложить, чтобы переместить каждый электрон через проводник в единицу времени
 - ▶ единица измерения: **Ом**, Ω
- ▶ 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**

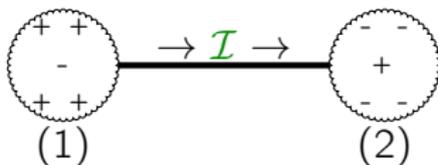
А что такое напряжение?

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,

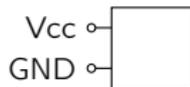
и тем больший ток будет течь по проводнику

Vcc и GND, единица и ноль

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

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

У цифровой аппаратуры обычно тоже есть такая «вилка» — два контакта с постоянным потенциалом (напряжением¹), подаваемым извне:



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

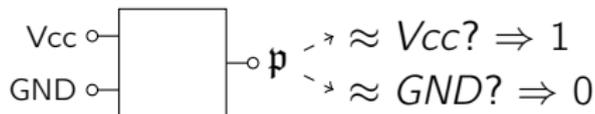
1 Схемотехники не любят слово «потенциал»

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

Vcc и GND, единица и ноль



Каждая точка p аппаратуры также обладает некоторым потенциалом

Если потенциал точки p (приблизительно) равен

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

В современной цифровой схемотехнике основное внимание уделяется **микросхемам**: аппаратуре, содержащей очень много деталей (транзисторов — о них речь пойдёт дальше) в очень маленьком ящике —

до сотен миллионов деталей на квадратный миллиметр в один слой

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

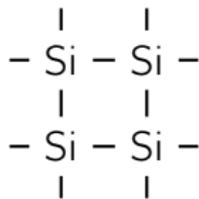
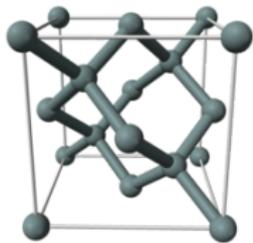
Немного физики: полупроводники

Современные микросхемы, как правило, основаны на полупроводниках

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

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

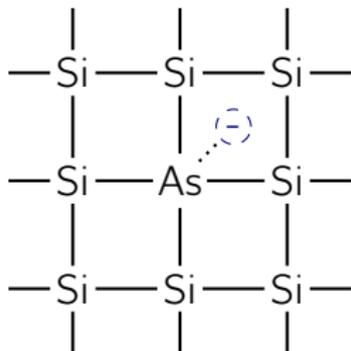
решётка кристалла Si схематичное двумерное изображение



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

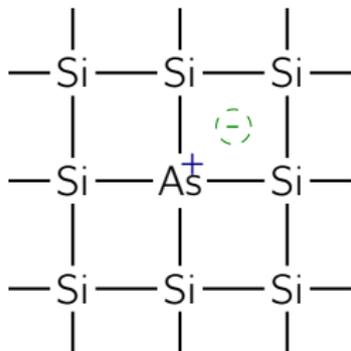
В качестве примеси можно вкратить в решётку кремния мышьяк (As):



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

Немного физики: полупроводники

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



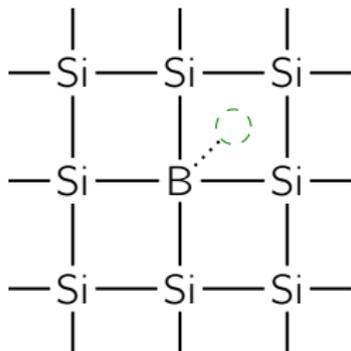
Мышьяк имеет 5 валентных электронов, из них 4 связаны кристаллической решёткой

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

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

Немного физики: полупроводники

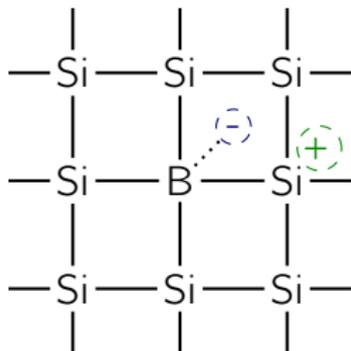
В качестве примеси можно вкратить в решётку кремния бор (B):



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

Немного физики: полупроводники

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



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

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

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

Немного физики: диод

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



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



Немного физики: диод

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

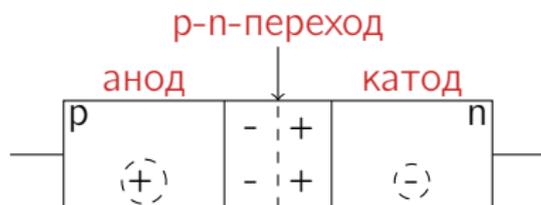


Это **полупроводниковый диод**, пропускающий ток в одну сторону и не пропускающий обратный ток:



Немного физики: диод

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



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



Немного физики: диод

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

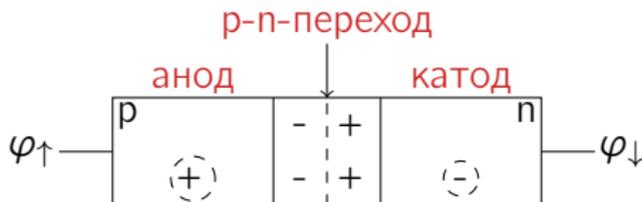


Это **полупроводниковый диод**, пропускающий ток в одну сторону и не пропускающий обратный ток:



Немного физики: диод

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



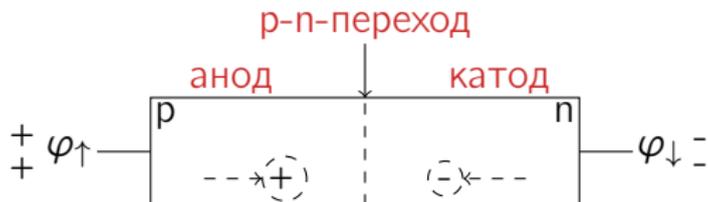
Здесь и дальше: φ_{\uparrow} — высокий потенциал,
 φ_{\downarrow} — низкий потенциал

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:



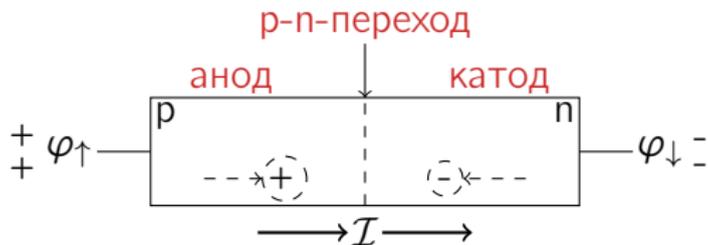
Здесь и дальше: φ_{\uparrow} — высокий потенциал,
 φ_{\downarrow} — низкий потенциал

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:



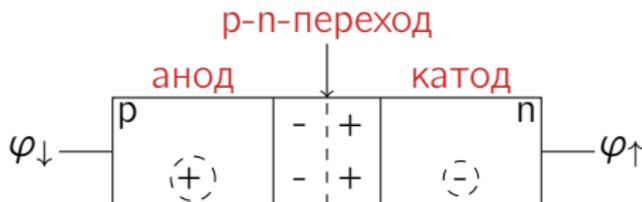
Здесь и дальше: φ_{\uparrow} — высокий потенциал,
 φ_{\downarrow} — низкий потенциал

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:



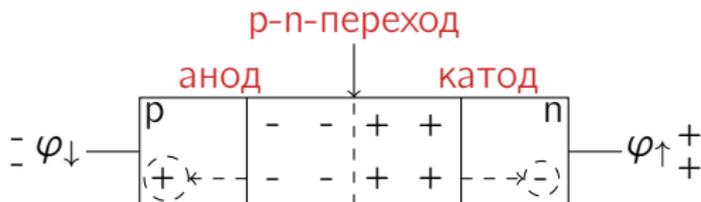
Здесь и дальше: φ_{\uparrow} — высокий потенциал,
 φ_{\downarrow} — низкий потенциал

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:



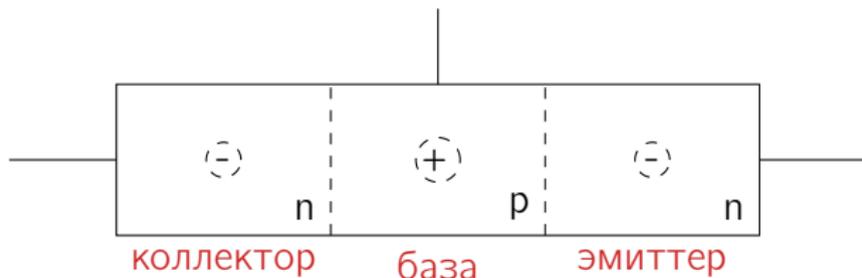
Здесь и дальше: φ_{\uparrow} — высокий потенциал,
 φ_{\downarrow} — низкий потенциал

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



Немного физики: биполярный транзистор

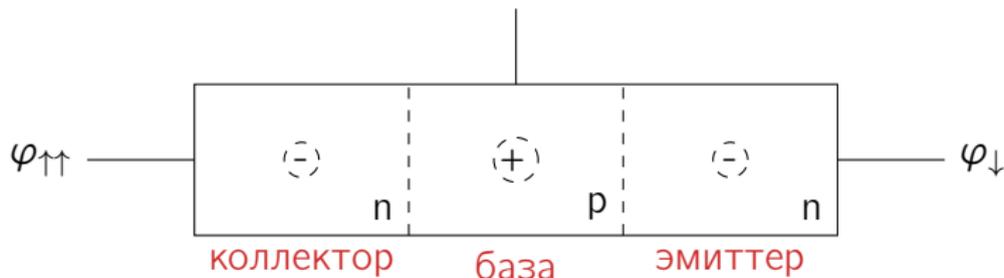
Ещё более нетривиальная проводимость получается, если расположить последовательно полупроводники n-, p- и снова n-типов:



Это биполярный pnp-транзистор: 

Немного физики: биполярный транзистор

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



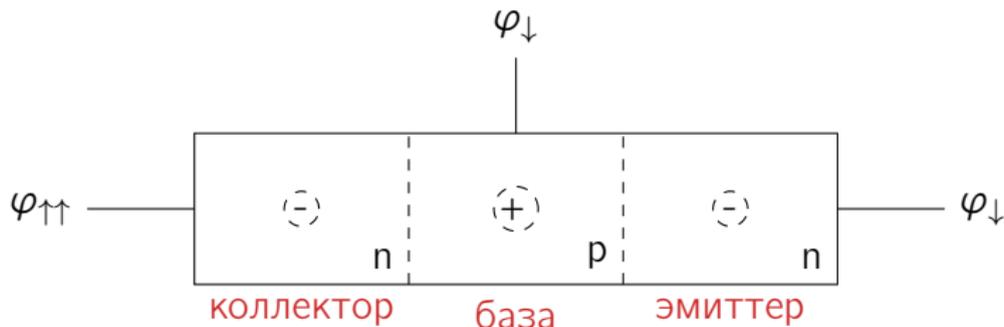
$\varphi_{\uparrow\uparrow}$ — очень высокий потенциал

Это биполярный pnp-транзистор:



Немного физики: биполярный транзистор

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

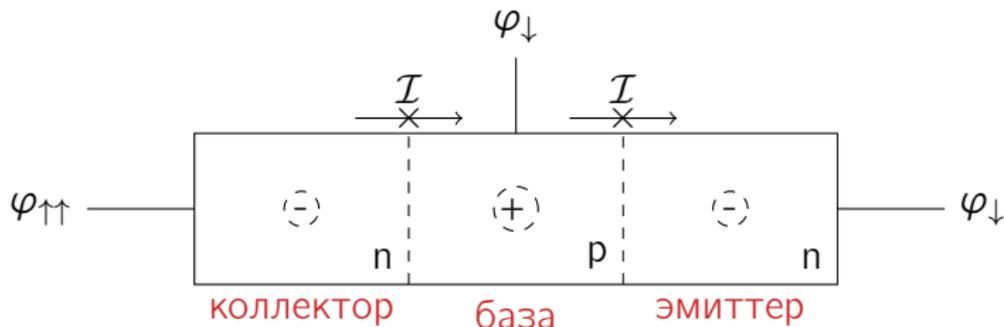


$\varphi_{\uparrow\uparrow}$ — очень высокий потенциал

Это биполярный pnp-транзистор:

Немного физики: биполярный транзистор

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

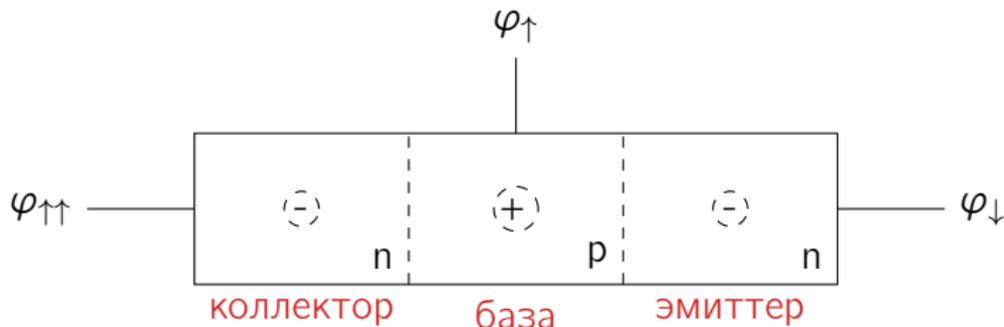


$\varphi_{\uparrow\uparrow}$ — очень высокий потенциал

Это биполярный pnp-транзистор:

Немного физики: биполярный транзистор

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

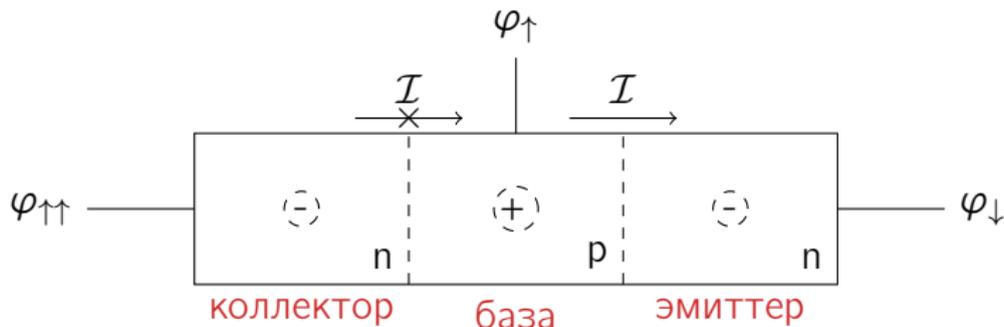


$\varphi_{\uparrow\uparrow}$ — очень высокий потенциал

Это биполярный pnp-транзистор:

Немного физики: биполярный транзистор

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

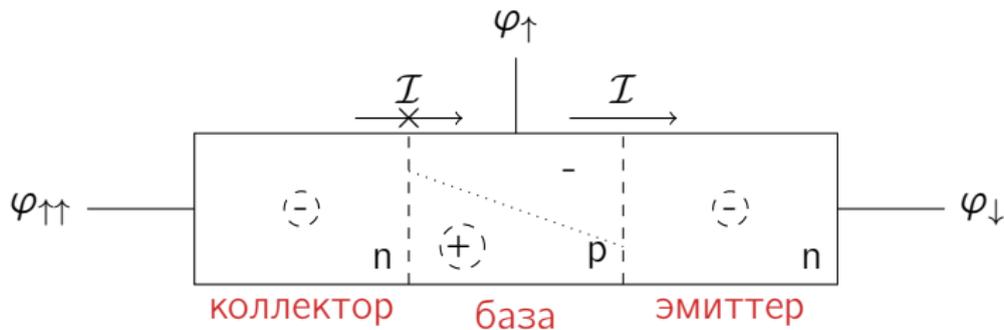


$\varphi_{\uparrow\uparrow}$ — очень высокий потенциал

Это биполярный pnp-транзистор: 

Немного физики: биполярный транзистор

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

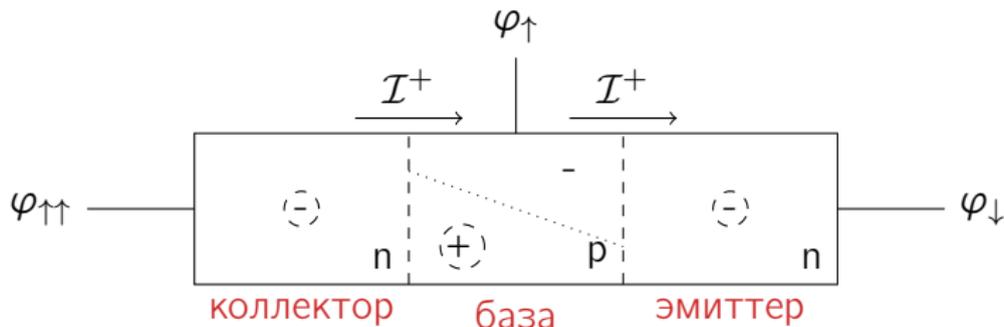


$\varphi_{\uparrow\uparrow}$ — очень высокий потенциал

Это биполярный pnp-транзистор:

Немного физики: биполярный транзистор

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



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

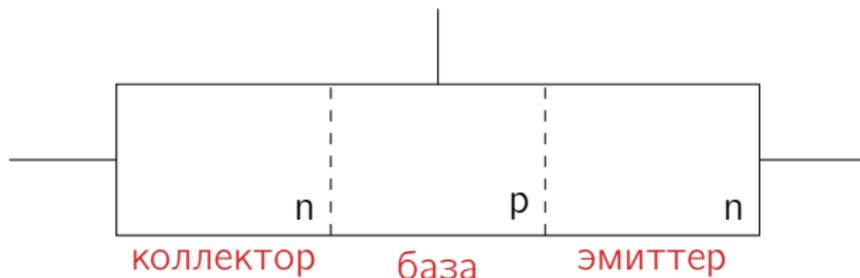
I^+ — очень сильный ток

Это биполярный pnp-транзистор:



Немного физики: биполярный транзистор

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



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

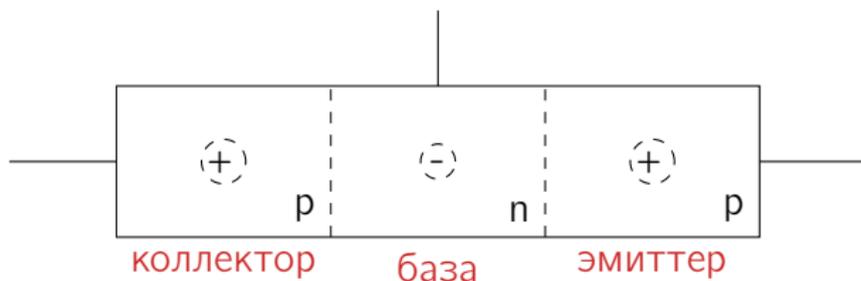
I^+ — очень сильный ток

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

Это **биполярный pnp-транзистор**:

Немного физики: биполярный транзистор

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

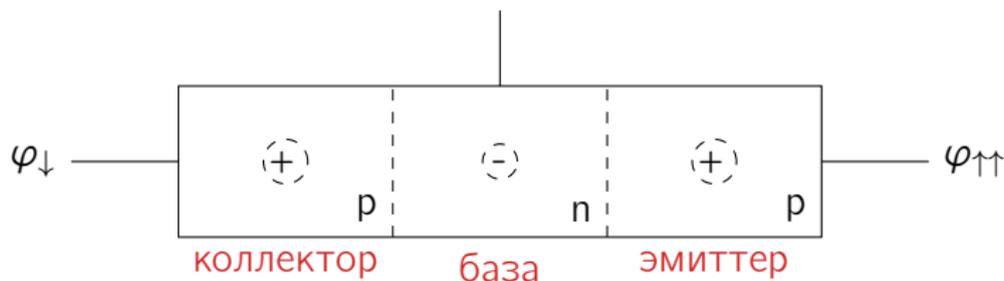


Это биполярный rpn-транзистор:



Немного физики: биполярный транзистор

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

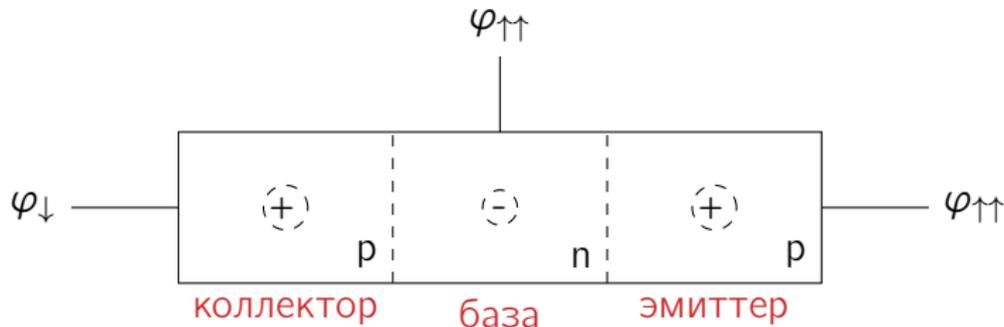


Это биполярный rpn-транзистор:



Немного физики: биполярный транзистор

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

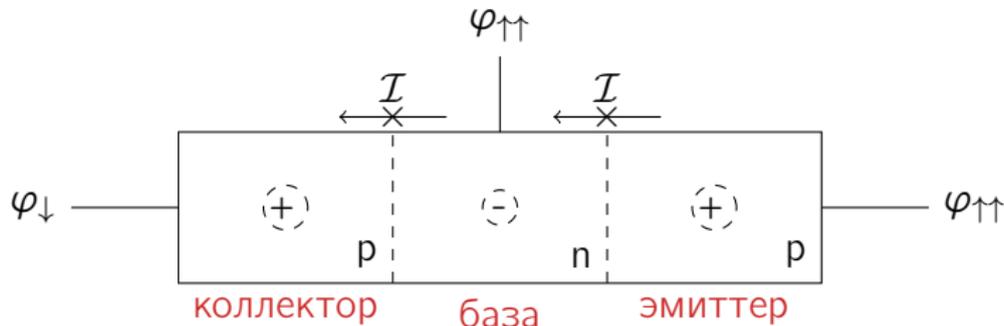


Это биполярный rpn-транзистор:



Немного физики: биполярный транзистор

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

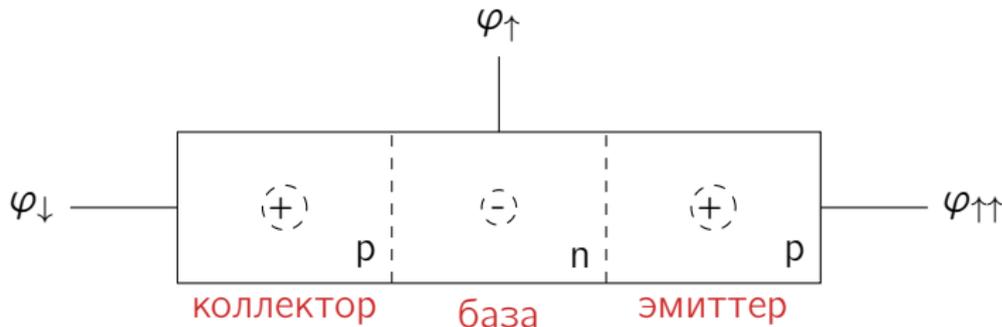


Это биполярный pnp-транзистор:



Немного физики: биполярный транзистор

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

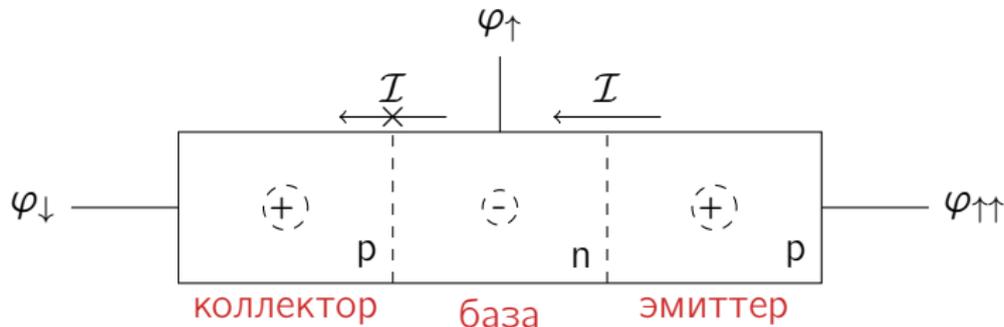


Это биполярный rpn-транзистор:



Немного физики: биполярный транзистор

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

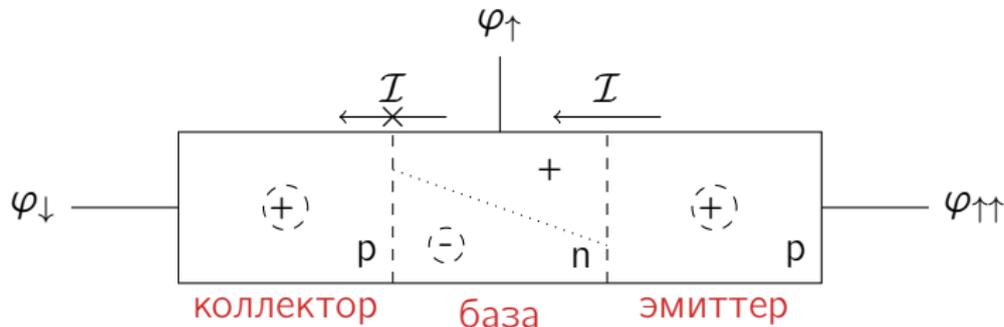


Это биполярный pnp-транзистор:



Немного физики: биполярный транзистор

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

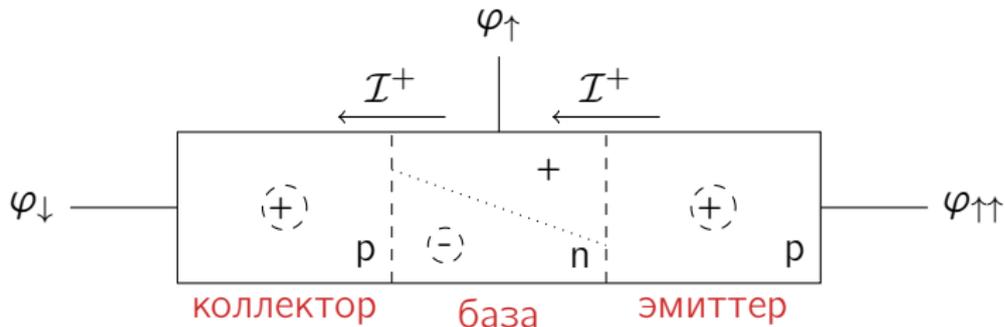


Это биполярный pnp-транзистор:



Немного физики: биполярный транзистор

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

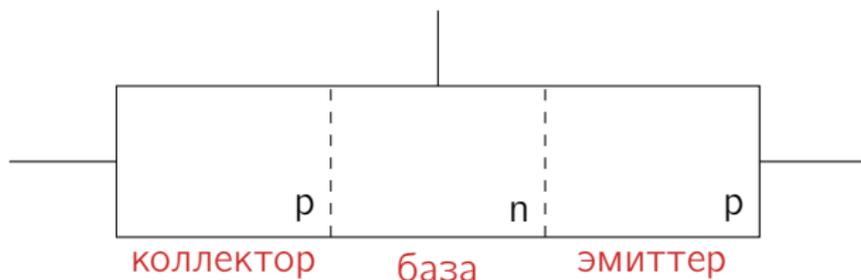


Это биполярный pnp-транзистор:



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 цифровые микросхемы

МОП-транзистор имеет несколько слоёв:

1. проводящий **затвор**

- ▶ **М**еталл, хотя сейчас вместо металлического напыления используются более хитрые технологии

2. диэлектрик, отделяющий затвор от подложки

- ▶ (ди)**О**ксид кремния, то есть стекло, хотя могут использоваться и другие изоляторы

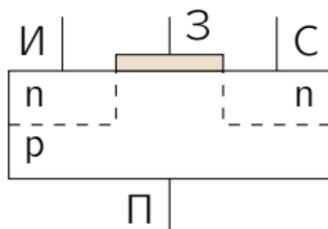
3. **П**олупроводники, образующие

исток (эмиттер), **сток** (коллектор) и **подложку** (базу)

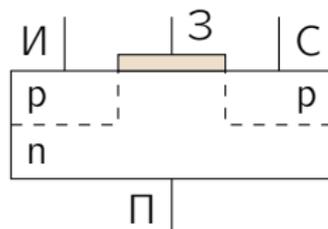
В отличие от биполярного транзистора, в котором канал проводимости открывается протекающим **током**, в полевом транзисторе канал открывается электрическим **полем**, создаваемым напряжением между затвором и подложкой

Немного физики: МОП-транзистор

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор

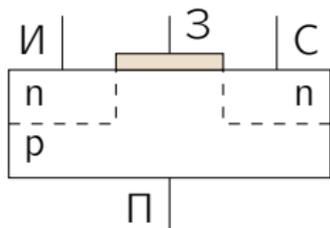


Если не принимать во внимание затвор, то МОП-транзисторы очень похожи на биполярные транзисторы, но всё же они применяются совсем по-другому:

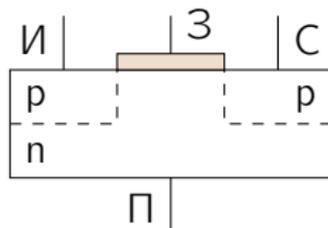
- ▶ на контакты МОП-транзистора не подводится «очень большой потенциал»: МОП-транзистор в цифровой схеме обычно оперирует только потенциалами $\varphi_{\downarrow} = GND$ и $\varphi_{\uparrow} = V_{CC}$

Немного физики: МОП-транзистор

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор

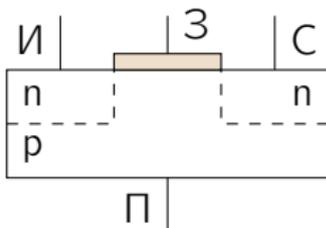


Если не принимать во внимание затвор, то МОП-транзисторы очень похожи на биполярные транзисторы, но всё же они применяются совсем по-другому:

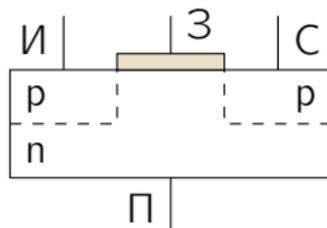
- ▶ основное назначение МОП-транзистора — передача потенциалов с контактов V_{cc} и GND во внутренние части схемы и на внешние контакты, с которых уровни напряжения будут считываться другими электрическими схемами

Немного физики: МОП-транзистор

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор



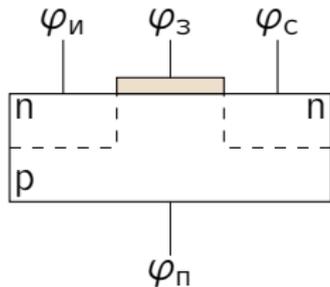
Если не принимать во внимание затвор, то МОП-транзисторы очень похожи на биполярные транзисторы, но всё же они применяются совсем по-другому:

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

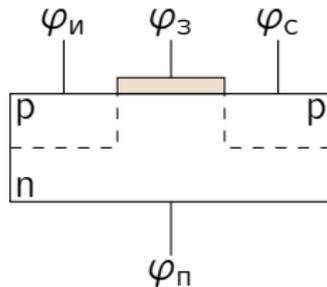
Немного физики: МОП-транзистор

МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



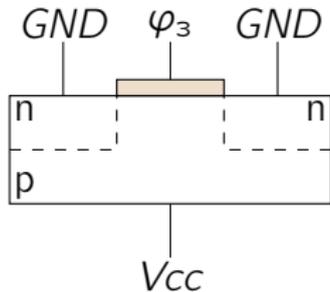
p-МОП-транзистор



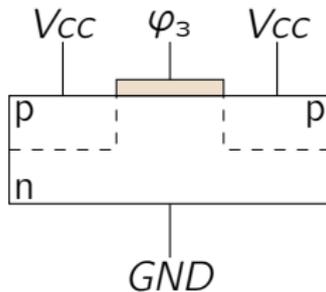
Немного физики: МОП-транзистор

МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор

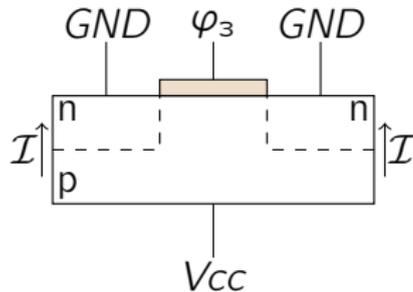


Если $\varphi_n = V_{cc}/GND$ и на сток или исток подан потенциал GND/V_{cc} , то между стоком/истоком и подложкой возникает немалый ток

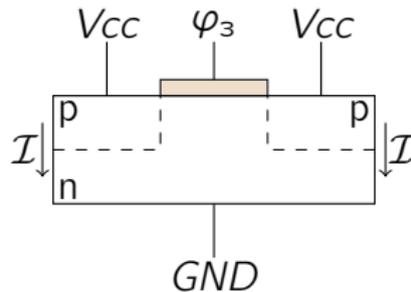
Немного физики: МОП-транзистор

МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор

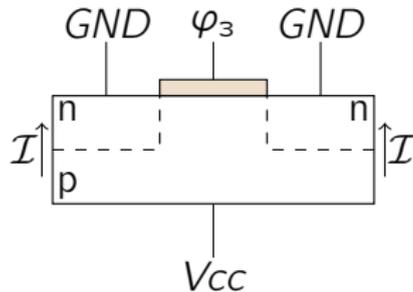


Если $\varphi_n = V_{cc}/GND$ и на сток или исток подан потенциал GND/V_{cc} , то между стоком/истоком и подложкой возникает немалый ток

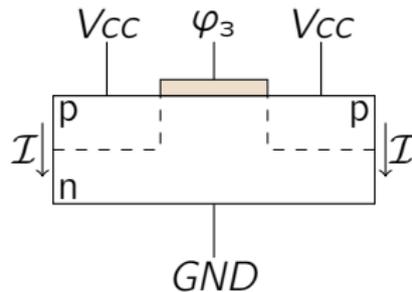
Немного физики: МОП-транзистор

МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор



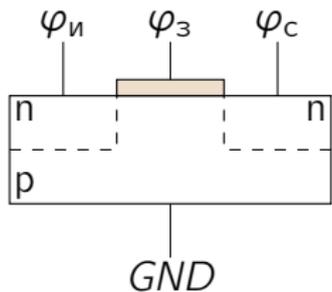
Если $\varphi_n = V_{cc}/GND$ и на сток или исток подан потенциал GND/V_{cc} , то между стоком/истоком и подложкой возникает немалый ток

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

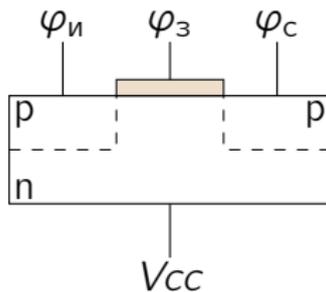
Немного физики: МОП-транзистор

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

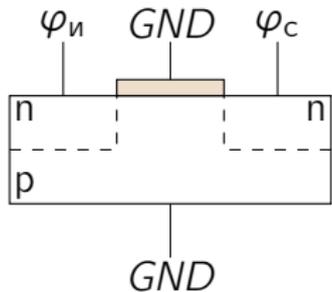
Такое поведение нежелательно, так как назначение МОП-транзистора — передача потенциала, а не поддержание тока

Поэтому $\varphi_n = GND/V_{cc}$

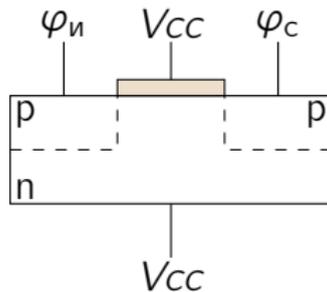
Немного физики: МОП-транзистор

МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор

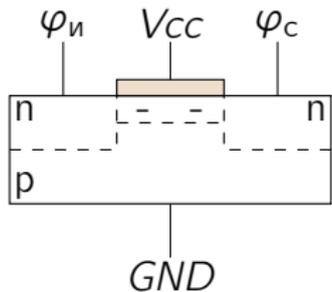


Если $\varphi_{з} = GND/V_{cc}$, то исток и сток изолированы

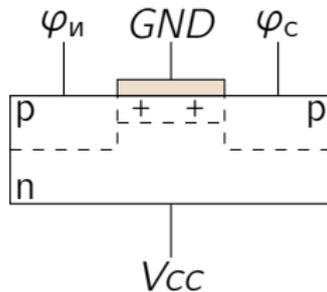
Немного физики: МОП-транзистор

МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор

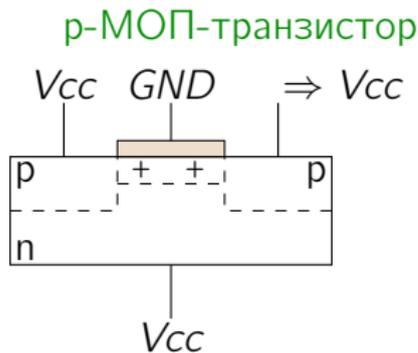
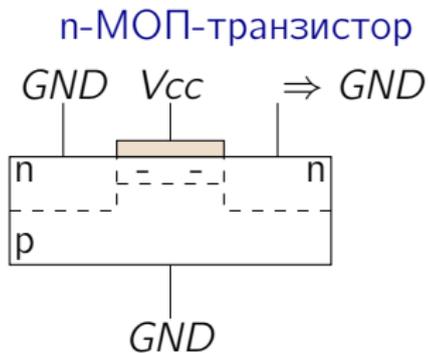


Если $\varphi_3 = GND/V_{CC}$, то исток и сток изолированы

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

Немного физики: МОП-транзистор

МОП-транзистор в цифровых схемах

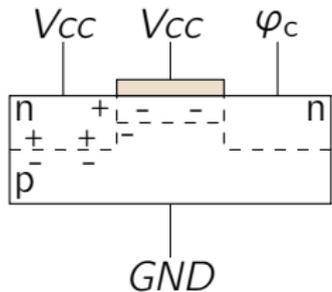


Если $\varphi_{и} = GND/V_{cc}$, а в стоке созданы условия *полной изоляции*, при которых потенциал может легко изменяться небольшим кратковременным током, то потенциалы стока и истока при открытом канале *примерно* выравниваются

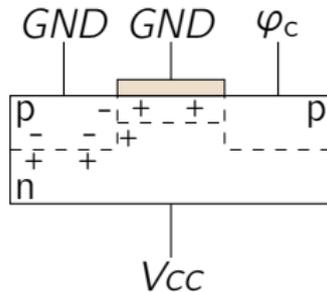
Немного физики: МОП-транзистор

МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



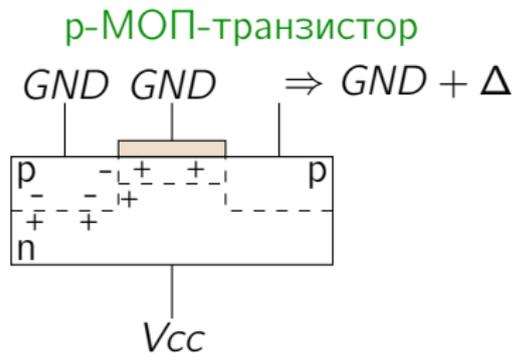
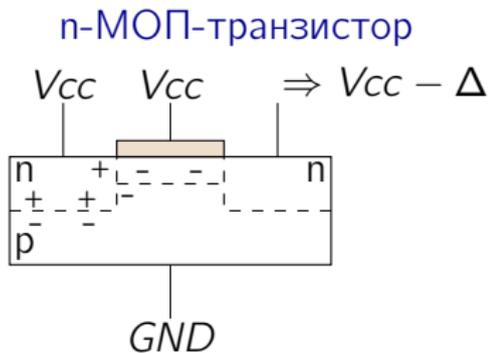
p-МОП-транзистор



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

Немного физики: МОП-транзистор

МОП-транзистор в цифровых схемах

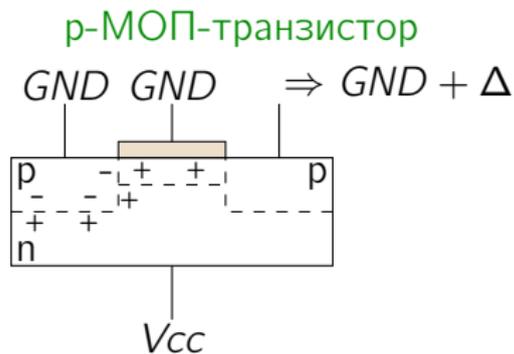
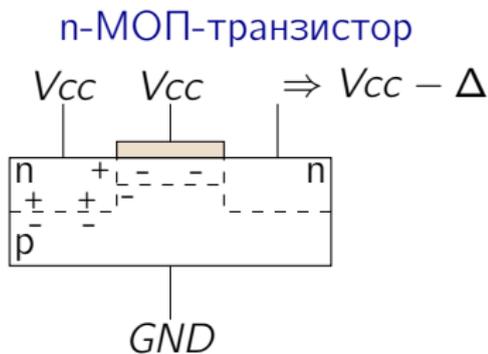


Если $\varphi_{и} = V_{cc}/GND$, то между истоком и подложкой образуется широкий p-n-переход

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

Немного физики: МОП-транзистор

МОП-транзистор в цифровых схемах

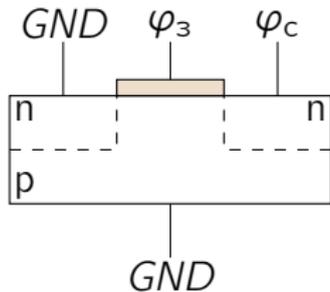


Такое поведение нежелательно, так как назначение МОП-транзистора в цифровой схеме — как можно более точная передача потенциалов V_{cc} и GND

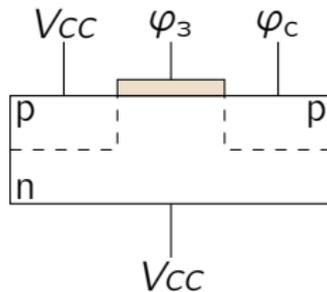
Немного физики: МОП-транзистор

МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



p-МОП-транзистор



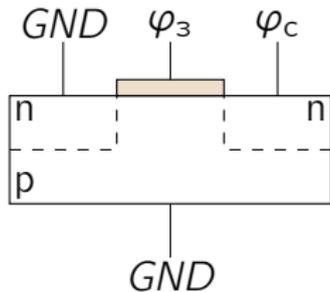
Такое поведение нежелательно, так как назначение МОП-транзистора в цифровой схеме — как можно более точная передача потенциалов V_{CC} и GND

Поэтому $\varphi_{in} = GND/V_{CC}$

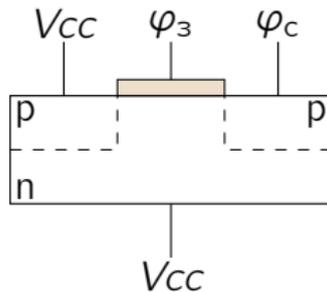
Немного физики: МОП-транзистор

МОП-транзистор в цифровых схемах

n-МОП-транзистор



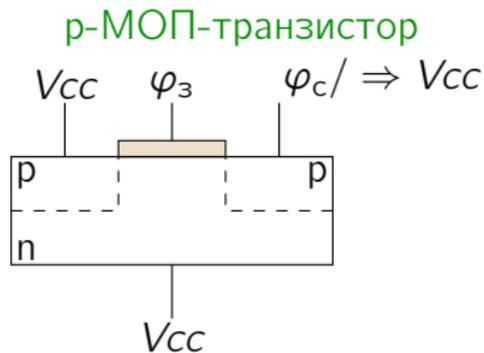
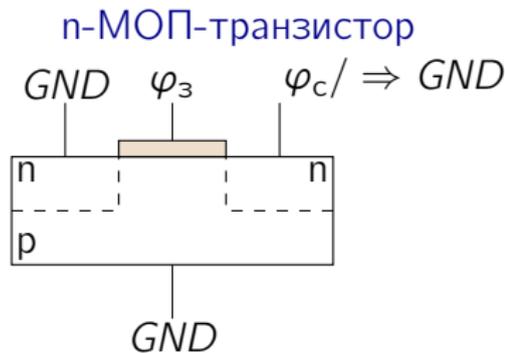
p-МОП-транзистор



Итог. При «правильном» использовании МОП-транзистора $\varphi_{и} = \varphi_{п} = GND/V_{CC}$, 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

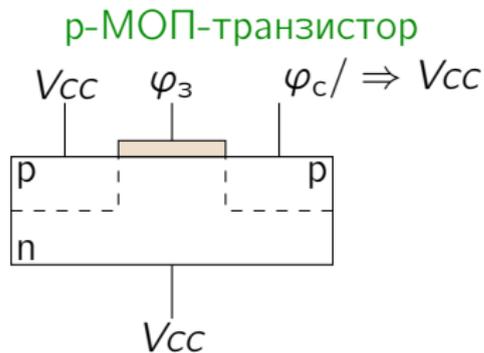
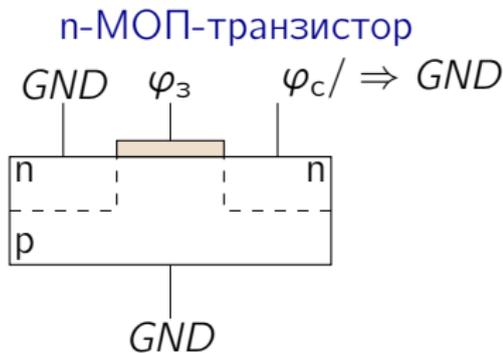
МОП-транзистор в цифровых схемах



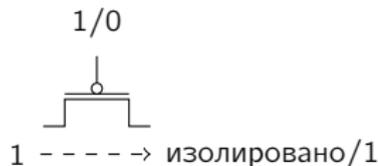
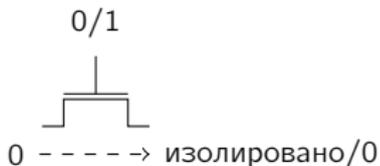
Итог. При «правильном» использовании МОП-транзистора $\varphi_n = \varphi_p = GND/V_{CC}$, и возможны ровно два состояния: канал закрыт и сток изолирован от истока, либо канал открыт и сток связан с истоком почти идеальным проводником

Немного физики: МОП-транзистор

МОП-транзистор в цифровых схемах



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



КМОП

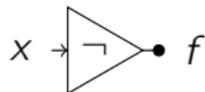
Для полноценной передачи обоих значений 0 и 1 в цифровых схемах используется технология **КМОП**:¹

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

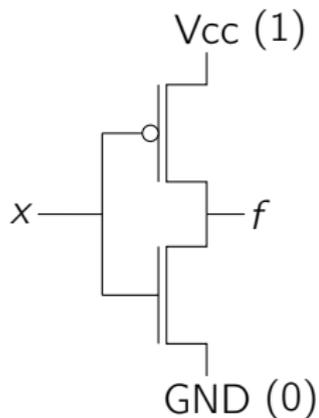
¹ Комплементарные МОП-транзисторы

КМОП и СФЭ

СФЭ:

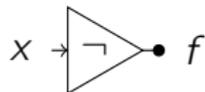


То же самое в КМОП:

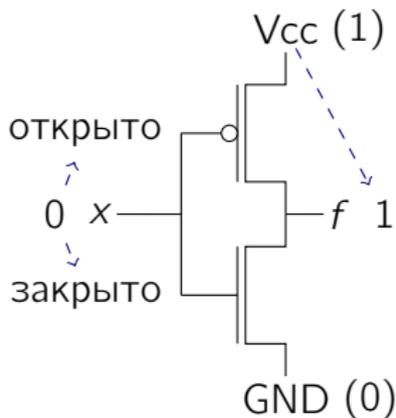


КМОП и СФЭ

СФЭ:

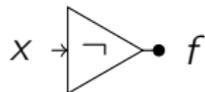


То же самое в КМОП:

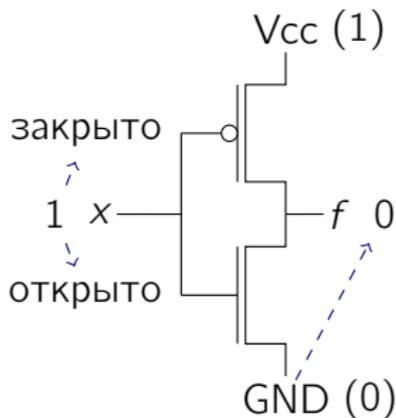


КМОП и СФЭ

СФЭ:

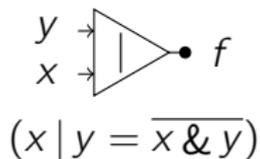


То же самое в КМОП:

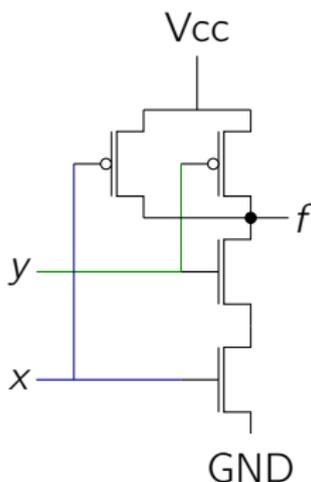


КМОП и СФЭ

СФЭ:



То же самое в КМОП:

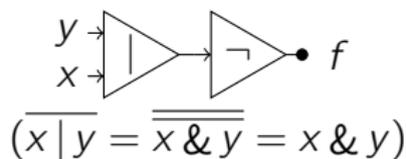


— разветвление провода

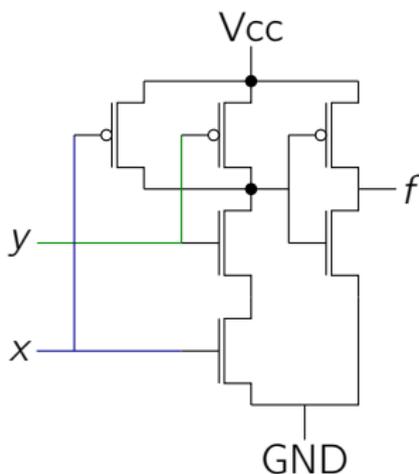
— непересекающиеся вертикальный и горизонтальный проводá

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