

Элементная база ВТ

Комбинационные схемы

**Помехи в комбинационных
схемах**

**Последовательностные
схемы**

Уровень абстракции

Критически важный принцип управления сложностью системы – абстракция, подразумевающая исключение из рассмотрения тех элементов, которые в данном конкретном случае несущественны для понимания работы этой системы.

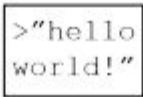


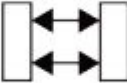
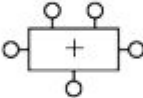
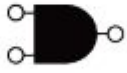
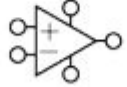

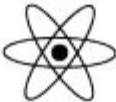
На Рис. показаны уровни абстракции, типичные для любой электронной компьютерной системы вместе со строительными блоками, характерными для каждого уровня абстракции этой системы. На самом низком уровне абстракции находится физика, изучающая движение электронов. Поведение электронов описывается квантовой механикой и системой уравнений Максвелла.

Данный подход означает, что, если рассматривать систему на уровне устройств, функции которых однозначно определены, то можно не учитывать поведение электронов внутри отдельных устройств этой системы.

Уровни абстракции электронной вычислительной системы

Именно принцип абстрагирования от маловажных деталей позволяет людям общаться в Интернете, не задумываясь о квантовых колебаниях электронов или организации памяти компьютера. Предмет нашего изучения – уровни абстракции от цифровых схем до компьютерной архитектуры. Полезно и необходимо знать кое-что и об уровнях абстракции, непосредственно сопряженных с тем уровнем, который изучается или на котором работаем.

Программист, например, не сможет полностью оптимизировать код без понимания архитектуры процессора, который будет выполнять эту программу. Инженер-электронщик, разрабатывающий блок, не сможет найти компромисс между быстродействием и уровнем потребления энергии, ничего не зная о той схеме, где этот

Application Software		Programs
Operating Systems		Device Drivers
Architecture		Instructions Registers
Micro-architecture		Datapaths Controllers
Logic		Adders Memories
Digital Circuits		AND Gates NOT Gates
Analog Circuits		Amplifiers Filters
Devices		Transistors Diodes
Physics		Electrons

Уровни абстракции электронной вычислительной системы

Микроархитектурный уровень абстракции, или просто микроархитектура (microarchitecture), связывает логический и архитектурный уровни абстракции. Архитектурный уровень абстракции, или архитектура (architecture), описывает компьютер с точки зрения программиста.

Микроархитектура – это соединение простейших цифровых элементов в логические блоки, предназначенные для выполнения команд, определенных какой-то конкретной архитектурой.

Разработка электронной вычислительной системы

В дополнение к абстрагированию от несущественных деталей и конструкторской дисциплине разработчики электронных систем используют еще три базовых принципа для управления сложностью системы: иерархичность, модульность и регулярность.

Эти принципы применительно как к программному обеспечению, так и к аппаратной части компьютерных систем.

1 Иерархичность – принцип иерархичности предполагает разделение системы на отдельные модули, а затем последующее разделение каждого такого модуля на фрагменты до уровня, позволяющего легко понять поведение каждого конкретного фрагмента.

2 Модульность – принцип модульности требует, чтобы каждый модуль в системе имел четко определенную функциональность и набор интерфейсов и мог быть легко и без непредвиденных побочных эффектов соединен с другими модулями системы.

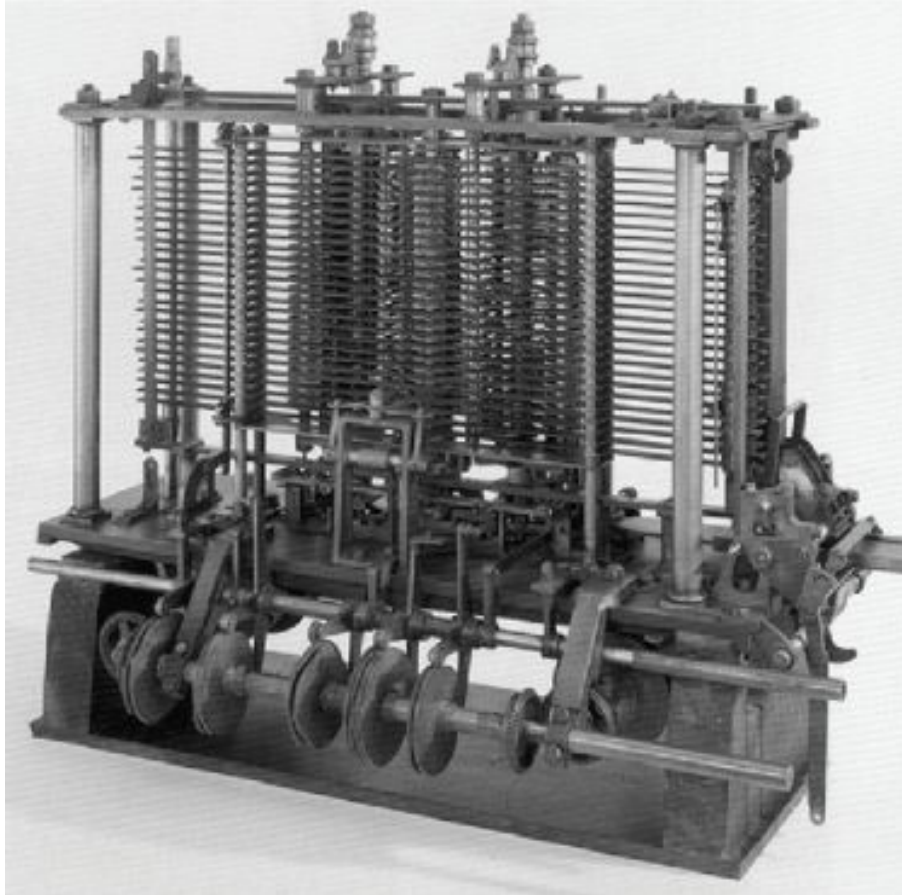
3 Регулярность – принцип регулярности требует соблюдения единообразия при проектировании отдельных модулей системы. Стандартные модули общего назначения, например, такие как блоки

питания, могут использоваться многократно, во много раз снижая количество модулей, необходимых для разработки новой системы.



Чарльз Бэббидж, 1791–1871

Чарльз Бэббидж родился в 1791 году. Закончил Кембриджский университет и женился на Джорджиане Витмур. Он изобрел Аналитическую Машину – первый в мире механический компьютер. Чарльз Бэббидж также изобрел предохранительную решетку для локомотивов, спидометр и универсальный почтовый тариф. Ученый также очень интересовался отмычками для замков и почему - то ненавидел уличных музыкантов.



Одной из наиболее ранних цифровых систем стала Аналитическая Машина Чарльза Бэббиджа, которая использовала переменные с десятью дискретными значениями. Начиная с 1834 года и до 1871 года Бэббидж разрабатывал и пытался построить этот механический компьютер.

Каждый ряд шестеренок такой машины обрабатывал одну цифру. В своем механическом компьютере Бэббидж использовал 25 рядов шестеренок таким образом, чтобы машина обеспечивала вычисления с точностью до 25-го знака.

В отличие от машины Бэббиджа большинство электронных

компьютеров использует двоичный (бинарный) код.

Объем информации D , передаваемый одной дискретной переменной, которая может находиться в N различных состояниях, измеряется в единицах, называемых битами, и вычисляется по следующей формуле:

$$D = \log_2 N \text{ bits} \quad (1.1)$$

Двоичная переменная передает $\log_2 2 = 1$ – один бит информации.

Теперь стало понятнее, почему единица информации называется битом. Bit (бит) – это сокращение от английского binary digit, что дословно переводится как двоичный разряд.

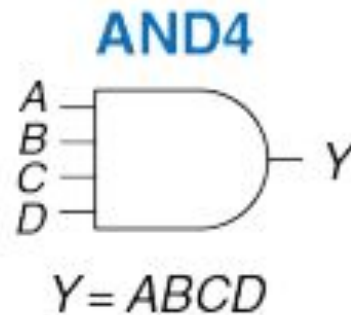
Каждая шестеренка в машине Бэббиджа содержит $\log_2 10 = 3,322$ бит информации, поскольку она может находиться в одном из $2^{3,322} = 10$ уникальных положений.

Теоретически непрерывный сигнал может передавать бесконечное количество информации, поскольку может принимать неограниченное число значений. На практике, однако, шум и ошибки измерения ограничивают информацию, передаваемую большинством непрерывных сигналов, диапазоном от 10 бит до 16 бит. Если же измерение уровня сигнала должно быть произведено очень быстро, то объём передаваемой информации будет еще ниже (в случае 10 бит, например, это будет только 8 бит).

Теоретически непрерывный сигнал может передавать бесконечное количество информации, поскольку может принимать неограниченное число значений. На практике, однако, шум и ошибки измерения ограничивают информацию, передаваемую большинством непрерывных сигналов, диапазоном от 10 бит до 16 бит. Если же измерение уровня сигнала должно быть произведено очень быстро, то объём передаваемой информации будет еще ниже (в случае 10 бит, например, это будет только 8 бит).



Джордж Буль, 1815–1864

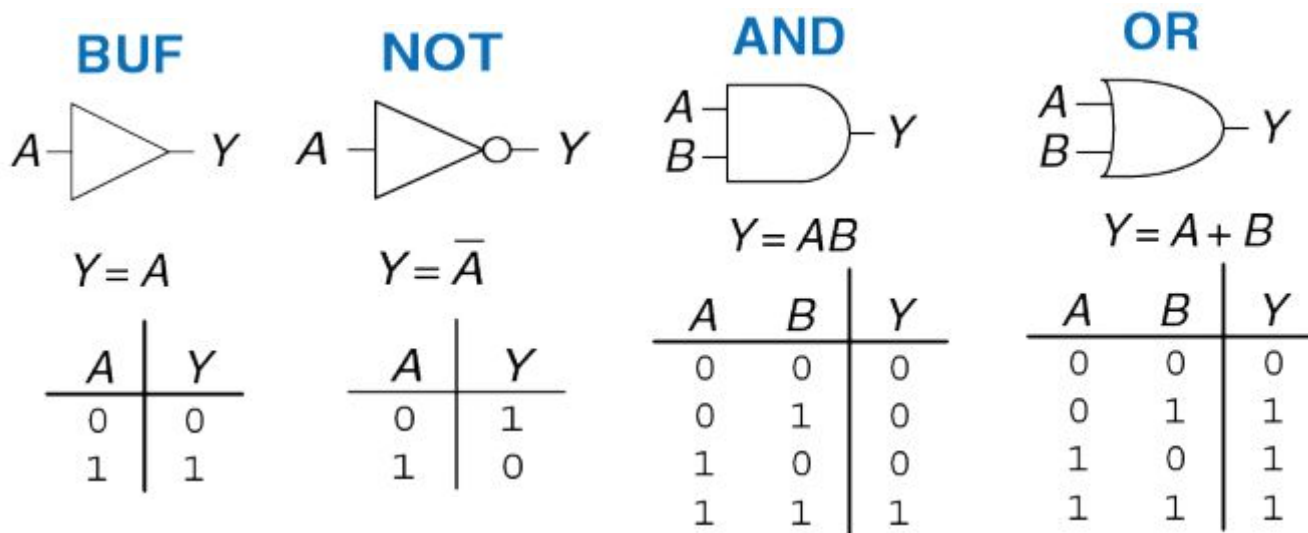


A	C	B	D	Y
0	0	0	0	0
0	0	0	1	0
0	0	1	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	0	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	0
0	1	1	1	0
1	0	0	0	0
1	0	0	1	0
1	0	1	0	0
1	0	1	1	0
1	1	0	0	0
1	1	0	1	0
1	1	1	0	0
1	1	1	1	1

Джордж Буль родился в семье небогатого ремесленника. Родители Джорджа не могли оплатить его формального образования, поэтому он осваивал математику самоучкой. Несмотря на это, Булю удалось стать преподавателем Королевского колледжа в Ирландии. В 1854 году Джордж Буль написал свою работу Исследование законов мышления, которая впервые ввела в научный оборот двоичные переменные, а также три основных логических оператора И, ИЛИ, НЕ (AND, OR, NOT).

Логические элементы

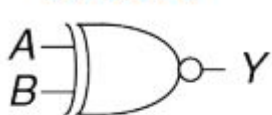
Логические вентили (logic gates) – это простейшие цифровые схемы, получающие один или более двоичных сигналов на входе и производящие новый двоичный сигнал на выходе.



Логические элементы

Логические вентили (logic gates) – это простейшие цифровые схемы, получающие один или более двоичных сигналов на входе и производящие новый двоичный сигнал на выходе.

XNOR



$$Y = \overline{A \oplus B}$$

A	B	Y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

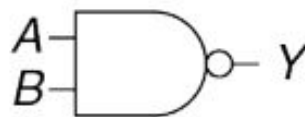
XOR



$$Y = A \oplus B$$

A	B	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

NAND



$$Y = \overline{AB}$$

A	B	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

NOR



$$Y = \overline{A+B}$$

A	B	Y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Преимущества *цифровой абстракции* заключаются в том, что разработчик цифровой системы может сосредоточиться исключительно на единицах и нулях, полностью игнорируя, каким образом булевы переменные представлены на **физическом уровне**. Разработчика не волнует, представлены ли нули и единицы определенными значениями напряжения, вращающимися шестернями или уровнем гидравлической жидкости. Программист может продуктивно работать, не располагая детальной информацией об аппаратном обеспечении компьютера.

Однако, понимание того, как работает это аппаратное обеспечение, позволяет программисту гораздо лучше оптимизировать программу для конкретного компьютера.

Напряжение питания

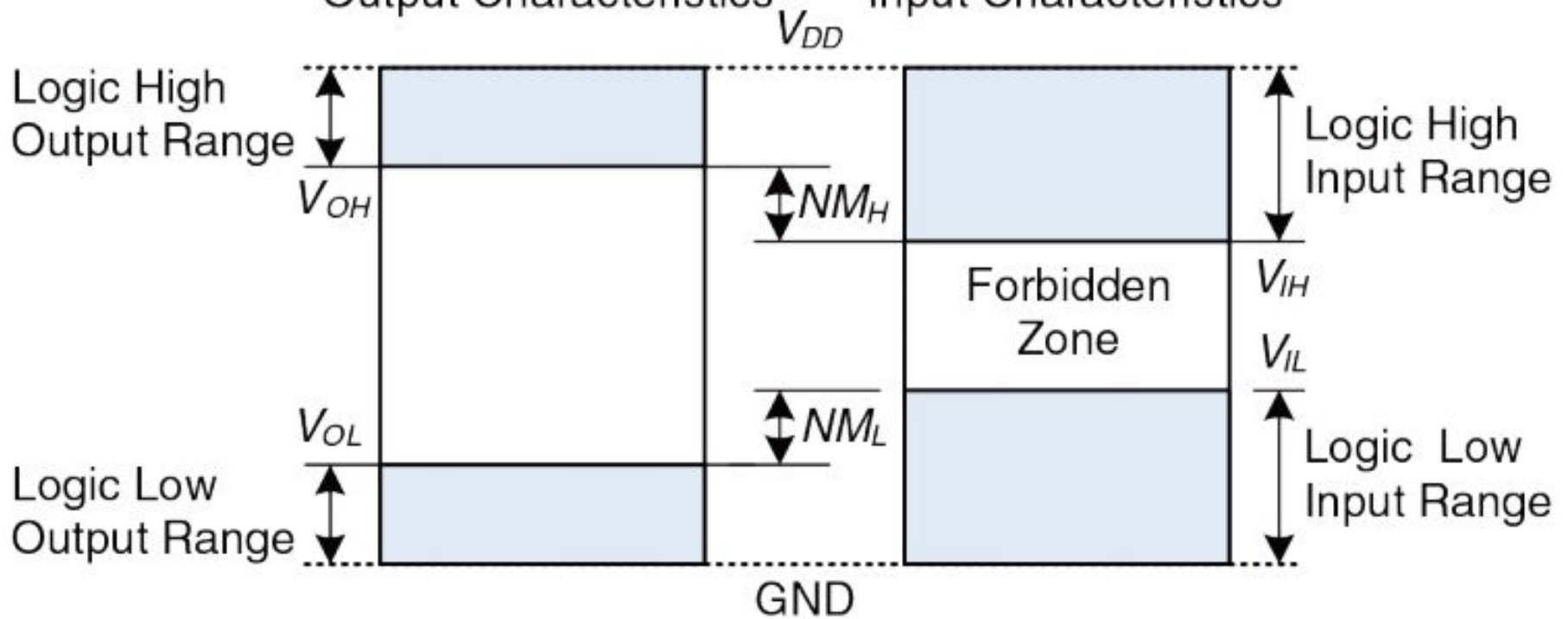
Предположим, что минимальное напряжение в электронной цифровой системе, называемое также напряжением земли (ground voltage, или просто ground, или GND), составляет 0 В. Самое высокое напряжение в системе поступает от блока питания и, как правило, обозначается VDD.

Транзисторные технологии семидесятых и восьмидесятых годов прошлого века в основном использовали VDD равное 5 В. С переходом на транзисторы меньшего размера, VDD последовательно снижали до 3,3 В, 2,5 В, 1,8 В, 1,5 В, 1,2 В и даже ниже для экономии электроэнергии и во избежание перегрузки транзисторов.

Логические уровни



Output Characteristics Input Characteristics



Логические уровни

Первый логический элемент в рассматриваемой схеме называется источник (**driver**), а второй – приемник (**receiver**). Выходной сигнал источника подключается ко входу приемника. **Источник** выдает выходной сигнал низкого напряжения (0) в диапазоне от 0 В до V_{OL} или выходной сигнал

высокого напряжения (1) в диапазоне от V_{OH} до V_{DD} .

Если приемник получает на вход сигнал в диапазоне от 0 до V_{IL} , он рассматривает такой сигнал как нуль. Если приемник получает на вход сигнал в диапазоне от V_{IH} до V_{DD} , он рассматривает такой сигнал как единицу. Если же по какой-либо причине, например, наличия шумов или неисправности одного из элементов схемы, напряжение сигнала на

входе приемника падает настолько, что попадает в запретную зону (*forbidden zone*) между V_{IL} и V_{IH} , то

Допускаемые Уровни Шумов

Для того чтобы выходной сигнал источника был правильно интерпретирован на входе приемника, необходимо, чтобы

$V_O < V_{IL}$ и $V_{OH} > V_{IH}$. В этом случае, даже если выходной сигнал источника будет загрязнен шумами, приемник по-прежнему сможет правильно определить логический уровень входного сигнала. Допускаемый уровень шумов (noise margin) – это то максимальное количество шума, присутствие которого в выходном сигнале источника не мешает приемнику корректно интерпретировать значение полученного сигнала.

Как можно увидеть на Рис. 1.23, значения нижнего допускаемого уровня шумов (low noise margin) и верхнего допускаемого уровня шумов (high noise margin) определяются следующим образом: $NML = V_{IL} - V_{OL}$; $NMH =$

Допускаемые Уровни Шумов

Для того чтобы выходной сигнал источника был правильно интерпретирован на входе приемника, необходимо, чтобы

$V_O < V_{IL}$ и $V_{OH} > V_{IH}$. В этом случае, даже если выходной сигнал источника будет загрязнен шумами, приемник по-прежнему сможет правильно определить логический уровень входного сигнала. Допускаемый уровень шумов (noise margin) – это то максимальное количество шума, присутствие которого в выходном сигнале источника не мешает приемнику корректно интерпретировать значение полученного сигнала.

Как можно увидеть на Рис. 1.23, значения нижнего допускаемого уровня шумов (low noise margin) и верхнего допускаемого уровня шумов (high noise margin) определяются следующим образом: $NML = V_{IL} - V_{OL}$; $NMH =$

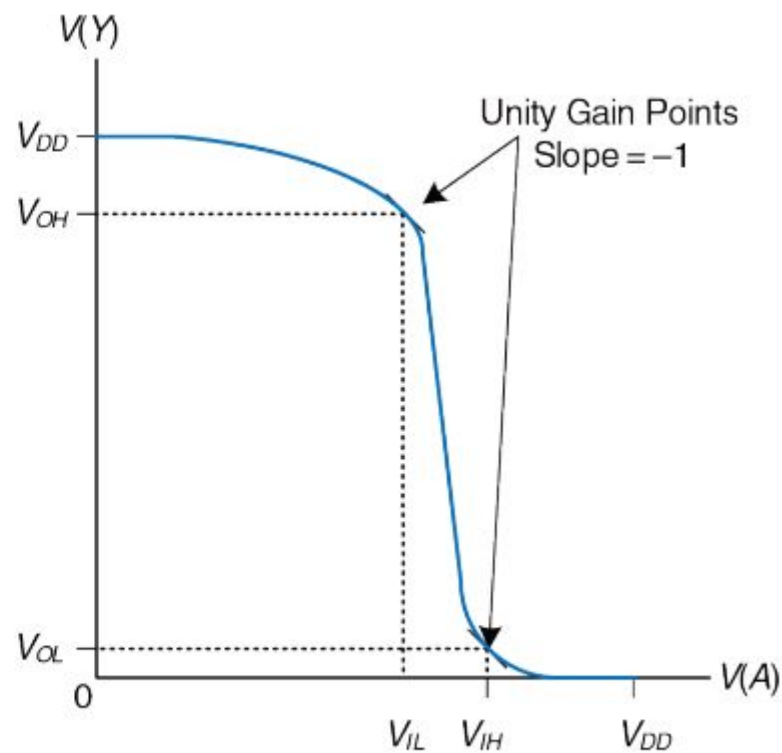
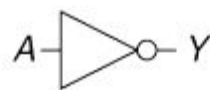
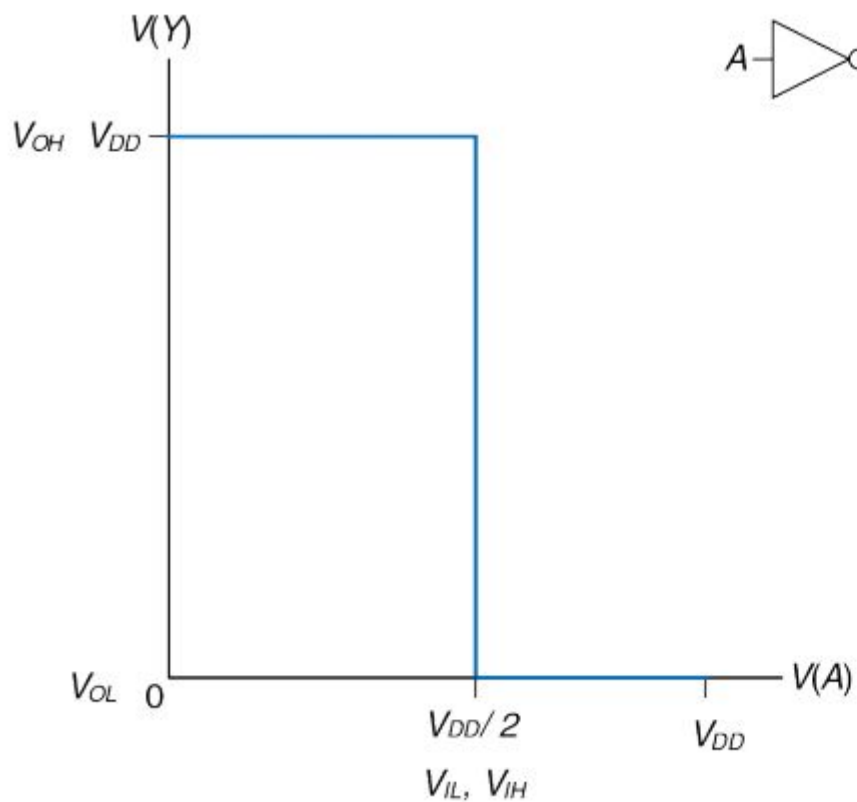
Передаточная Характеристика

Для понимания предела цифровой абстракции мы должны рассмотреть поведение логических вентилях с аналоговой точки зрения.

Передаточная характеристика (DC transfer characteristics) какого-либо логического вентиля описывает напряжение на выходе этого элемента как функцию напряжения на его входе, когда входной сигнал изменяется настолько медленно, что выходной сигнал успевает изменяться вслед за ним. Такая характеристика называется передаточной, поскольку описывает взаимосвязь между входным и выходным напряжением.

Разумно выбрать в качестве логических уровней те две точки, где наклон передаточной характеристики $dV(Y)/dV(A)$ равен -1 . Такие точки называются граничные коэффициенты передачи (unity gain points). Подобный выбор обычно максимизирует допустимые уровни

Передаточная Характеристика



(a)

(b)

Передаточная Характеристика

Выбор VDD и логических уровней может быть произвольным, однако этот выбор должен обеспечить совместимость всех логических вентиляей, обменивающихся данными в пределах одной цифровой системы. Поэтому вентили обычно группируются в семейства логики (logic families) таким образом, что любой элемент из одного семейства при соединении с любым другим элементом из этого же семейства автоматически обеспечивает соблюдение принципа статической дисциплины.

Семейства ИС

Четыре основные семейства логических вентиляей доминировали с 70-х по 90-е годы прошлого века – это ТТЛ – транзисторно-транзисторная логика (Transistor-Transistor Logic, или TTL), КМОП – логика, построенная на комплементарной структуре металл-оксид-полупроводник (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Logic, или CMOS), НТТЛ – низковольтная транзисторно-транзисторная логика (Low-Voltage Transistor-Transistor Logic, или LVTTTL) и НКМОП низковольтная логика на комплементарной структуре металл-оксид-полупроводник (Low-Voltage Complementary Metal-Oxide Semiconductor Logic, или LVCMOS). Логические уровни для всех этих семейств представлены в Табл. Начиная с 90-х годов прошлого века, четыре вышеперечисленных семейства распались на большое количество более мелких семейств в связи со все большим распространением устройств, требующих еще более низкого

Семейства ИС

Четыре основные семейства логических вентилях доминировали с 70-х по 90-е годы прошлого века – это ТТЛ – транзисторно-транзисторная логика (**Transistor-Transistor Logic, или TTL**), КМОП – логика, построенная на комплементарной структуре металл-оксид-полупроводник (**Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Logic, или CMOS**), НТТЛ – низковольтная транзисторно-транзисторная логика (**Low-Voltage Transistor-Transistor Logic, или LVTTTL**) и НКМОП – низковольтная логика на комплементарной структуре металл-оксид-полупроводник (**Low-Voltage Complementary Metal-Oxide Semiconductor Logic, или LVCMOS**). Логические уровни для всех этих семейств представлены в Табл.а. Начиная с 90-х годов прошлого века, вышеперечисленные семейства распались на более мелкие семейства в связи со все большим распространением устройств, требующих еще более низкого напряжения питания.

Семейства ИС

Семейство логики	V_{DD}	V_{IL}	V_{IH}	V_{OL}	V_{OH}
TTL	5 (4,75 – 5,25)	0,8	2,0	0,4	2,4
CMOS	5 (4,5 – 6)	1,35	3,15	0,33	3,84
LVTTL	3.3 (3 – 3,6)	0,8	2,0	0,4	2,4
LVC MOS	3.3 (3 – 3,6)	0,9	1,8	0,36	2,7

Совместимость логических семейств

		Приемник			
		TTL	CMOS	LVTTL	LVC MOS
Источник	TTL	ДА	НЕТ: $V_{OH} < V_{IH}$	ВОЗМОЖНО ^а	ВОЗМОЖНО ^а
	CMOS	ДА	ОК	ВОЗМОЖНО ^а	ВОЗМОЖНО ^а
	LVTTL	ДА	НЕТ: $V_{OH} < V_{IH}$	ДА	ДА
	LVC MOS	ДА	НЕТ: $V_{OH} < V_{IH}$	ДА	ДА

^а As если сигнал в 5 В ВЫСОКОГО уровня не может повредить вход приемника

КМОП транзисторы

Современные компьютеры используют транзисторы, потому что они дешевы, имеют малые размеры и высокую надежность. **Транзистор** – это переключатель с двумя положениями

«включить» и «выключить», контролируемый путем подачи напряжения или тока на управляющую клемму.

Существуют **два основных типа транзисторов** – биполярные транзисторы (**bipolar junction transistors**) и МОП-транзисторы – металл-оксид-полупроводник- транзисторы (иногда говорят полевые транзисторы –

metal-oxide-semiconductor field effect transistors, или MOSFET).

В 1958 году Джек Килби из Texas Instruments создал первую интегральную схему, состоявшую из двух транзисторов. В 1959 году Роберт Нойс, работавший тогда в Fairchild Semiconductor, запатентовал метод соединения нескольких транзисторов на одном кремниевом кристалле. В то время один транзистор стоил около 10 американских долларов.

КМОП транзисторы



Роберт Нойс, 1927 –1990 Родился в городе Берлингтон штата Айова и получил степень бакалавра в области физики в Гриннеллском колледже, а степень доктора наук в области физики – в Массачусетском Технологическом Институте. Роберта Нойса прозвали “мэром Силиконовой долины” за его обширный вклад в развитие микроэлектроники.

Нойс стал со-основателем Fairchild Semiconductor в 1957 году и корпорации Intel в 1968 году. Он также является одним из изобретателей интегральной микросхемы. Инженеры из групп, возглавляемых Нойсом, в дальнейшем основали целый ряд выдающихся полупроводниковых компаний.

(Воспроизводится с разрешения Intel Corporation © 2006 г).

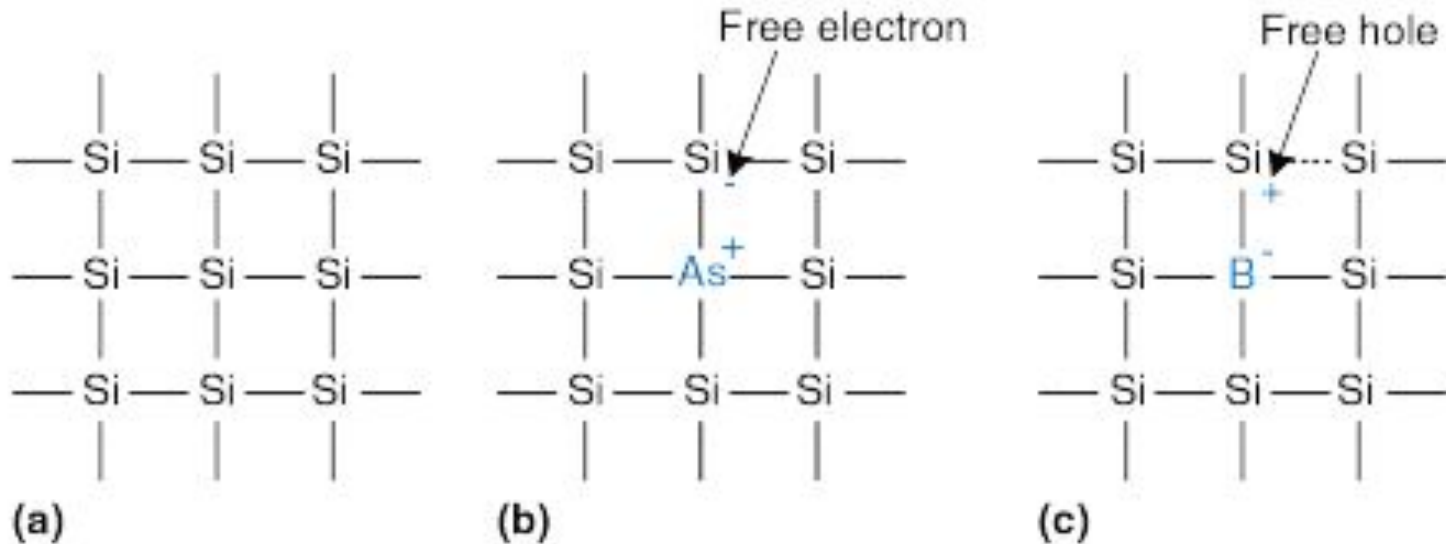
КМОП транзисторы

Сегодня, после более чем нескольких десятилетий беспрецедентного развития полупроводниковой технологии, инженеры могут «упаковать» приблизительно один миллиард полевых МОП-транзисторов на одном квадратном сантиметре кристалла кремния, причем каждый из этих транзисторов будет стоить меньше десяти микроцентов. Плотность размещения транзисторов на кристалле возрастает на порядок, а себестоимость одного транзистора падает каждые восемь лет.

В настоящее время полевые МОП-транзисторы – это те «кирпичики», из которых собираются почти все цифровые системы.

Полупроводники

МОП-транзисторы изготавливаются из кремния – элемента, преобладающего в скальной породе и песке. Кремний (Si) – это элемент IV атомной группы, то есть он имеет четыре валентных электрона, может образовывать связи с четырьмя соседними атомами и, таким образом, формировать кристаллическую решетку (lattice).



Полупроводники

По своей природе, кремний – плохой проводник, потому что все электроны заняты в ковалентных связях. Однако проводимость кремния улучшается, если добавить в него небольшое количество атомов другого вещества, называемого примесью (dopant). Если в качестве примеси используется элемент V атомной группы, например, мышьяк (As), то в каждом атоме примеси окажется дополнительный электрон, не участвующий в образовании ковалентных связей. Этот свободный электрон может легко перемещаться внутри кристаллической решетки. При этом атом мышьяка, потерявший электрон, превращается в положительный ион (As^+), как показано на Рис. (b). Электрон имеет отрицательный заряд (negative charge), поэтому мышьяк принято называть примесью n-типа (n-type dopant).

Полупроводники

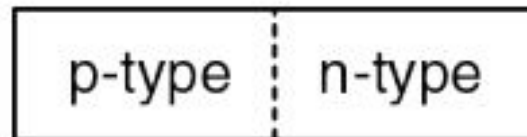
Если же в качестве примеси используется элемент **III атомной группы**, например, **бор (В)**, то в каждом из атомов примеси будет не хватать одного электрона, как показано на Рис. (с). Отсутствующий электрон называют дыркой (**hole**). Электрон из соседнего атома кремния может перейти к атому бора и заполнить недостающую связь. При этом, атом бора, получивший дополнительный электрон, превращается в отрицательный ион (B^-), а в атоме кремния возникает дырка. Таким образом, дырка может мигрировать в кристаллической решетке подобно электрону.

Дырка – это всего лишь отсутствие отрицательного заряда, но она ведет себя в полупроводнике как положительно заряженная частица. Именно поэтому бор называют примесью p-типа (**p-type dopant**).

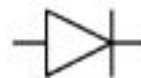
А поскольку проводимость кремния может меняться на порядки в зависимости от концентрации примеси, кремний называют полупроводником (**semiconductor**).

Полупроводники Диоды

Диод (diode) – это соединение полупроводника p-типа с полупроводником n-типа, как показано на Рис. При этом область p-типа называют анодом (**anode**), а область n-типа называют катодом (**cathode**). Когда напряжение на аноде превышает напряжение на катоде, диод открыт (*forward biased*), и ток через него течет от анода к катоду. Если же напряжение на аноде ниже напряжения на катоде, то диод закрыт (*reverse biased*), и ток через диод не течет. Символ диода очень интуитивен и наглядно показывает, что ток через диод может протекать только в одном направлении.



anode cathode



Полупроводники Конденсаторы

Конденсатор (capacitor) состоит из двух проводников, отделенных друг от друга изолятором. Если к одному из проводников приложить напряжение V , то через некоторое время этот проводник накопит электрический заряд Q , а другой проводник накопит противоположный электрический заряд $-Q$. **Емкостью** (capacitance) C конденсатора называется отношение заряда к приложенному напряжению $C = Q/V$.

Емкость прямо пропорциональна размеру проводников и обратно пропорциональна расстоянию между ними.

Емкость – это очень важный параметр электрической схемы, поскольку зарядка или разрядка любого проводника требует времени и энергии.

Более высокая емкость означает, что электрическая схема будет работать медленнее и потребует для своего функционирования больше энергии.



Полупроводники Транзисторы

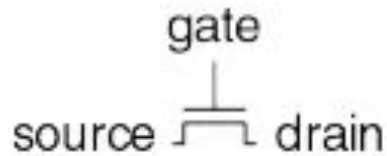
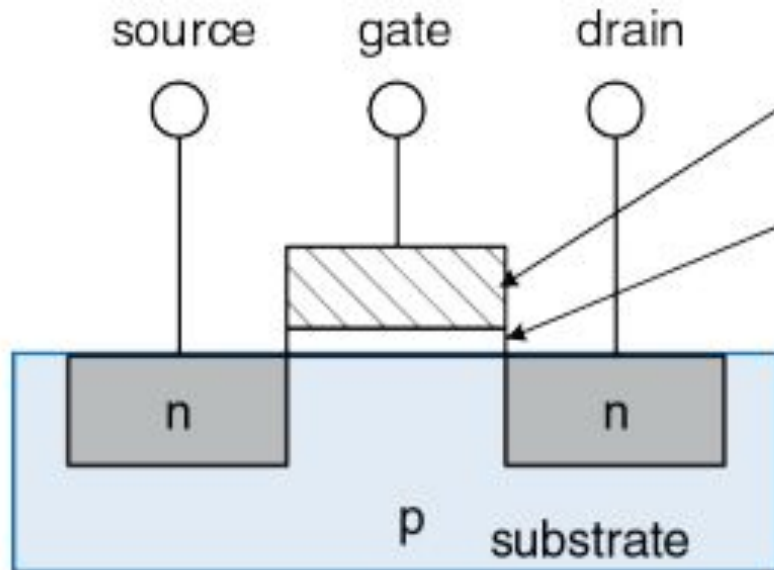
Полевой МОП-транзистор представляет собой «сэндвич» из нескольких слоёв проводящих и изолирующих материалов.

Сэндвич полевого МОП-транзистора состоит из слоя проводника, называемого затвором (gate), наложенного на слой изолятора – диоксида кремния (SiO_2), в свою очередь, наложенного на кремневую пластину, называемую подложкой. Изначально для изготовления затвора использовался тонкий слой металла, отсюда и название этого типа транзисторов – металл-оксид-полупроводник.

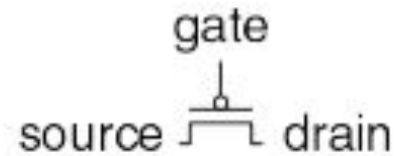
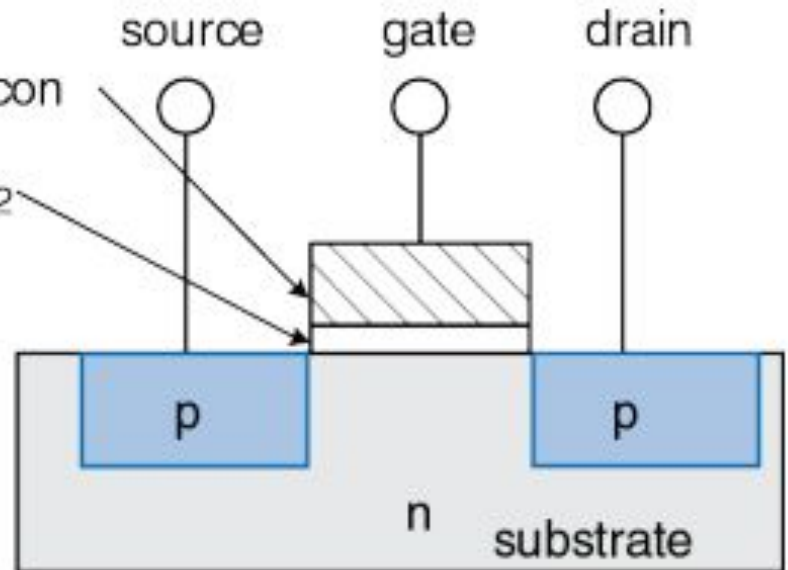
Существуют два вида полевых МОП-транзисторов: n-МОП и p-МОП (по английски n-MOS и p-MOS).

В транзисторах n-типа, (n-МОП), области, где расположены полупроводниковые примеси n-типа – в свою очередь называемые **истоком (source)** и **стоком (drain)** – находятся рядом

Полупроводники Транзисторы

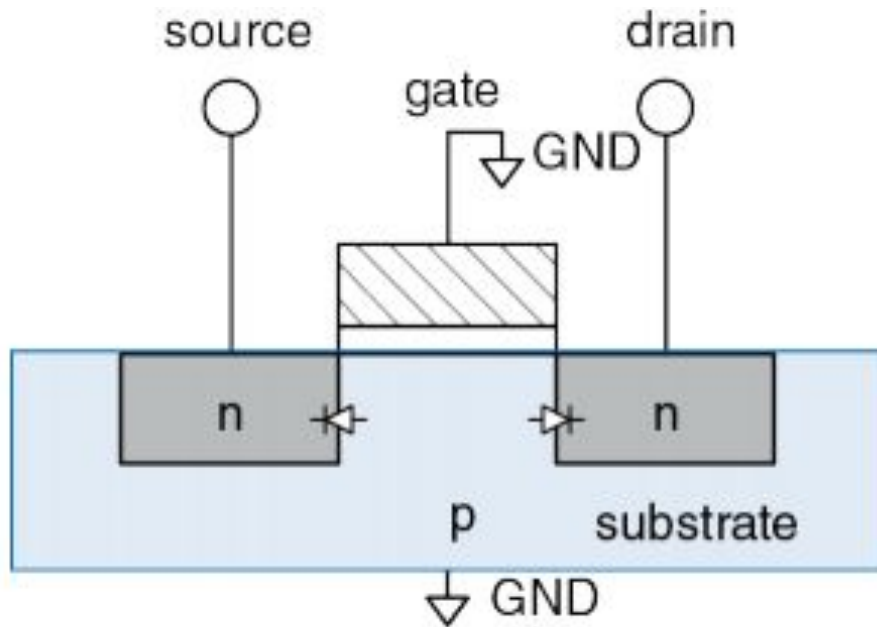


(a) nMOS

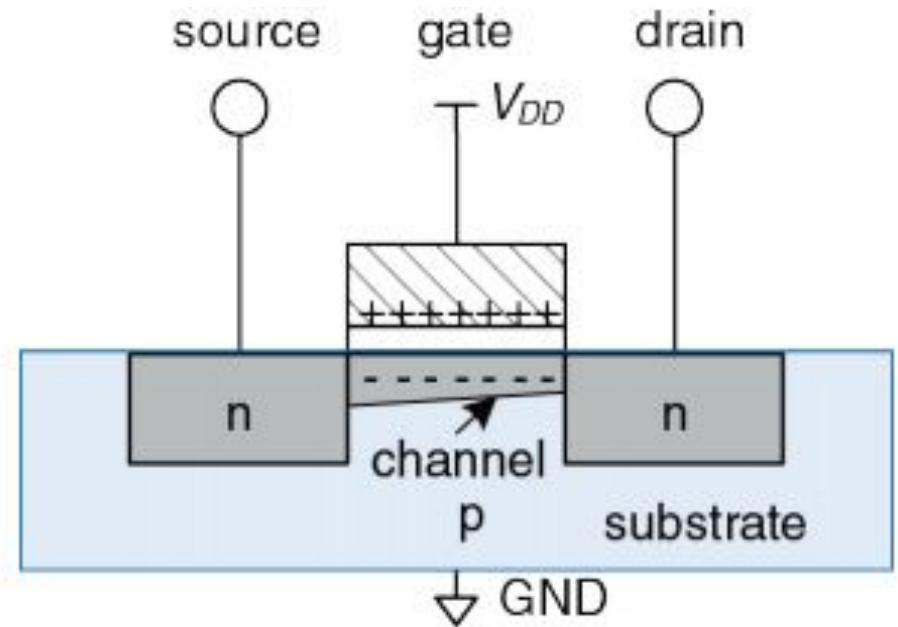


(b) pMOS

Полупроводники Транзисторы



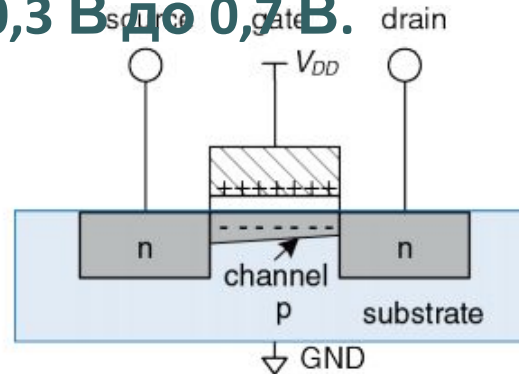
(a)



(b)

Полупроводники Транзисторы

При достаточно высоком напряжении на нижней границе затвора накапливается настолько много электронов, что область с полупроводником p-типа превращается в область с полупроводником n-типа. Такая инвертированная область называется каналом (channel). В этот момент в транзисторе образуется область проводимости от источника n-типа, через каналы n-типа к стоку n-типа, и через этот канал протекает эл. ток от истока к стоку. Транзистор включен. **Напряжение перехода, которое требуется для включения транзистора, называется пороговым значением напряжения (threshold voltage) V_T и обычно составляет от 0,3 В до 0,7 В.**



(b)

Полупроводники Транзисторы

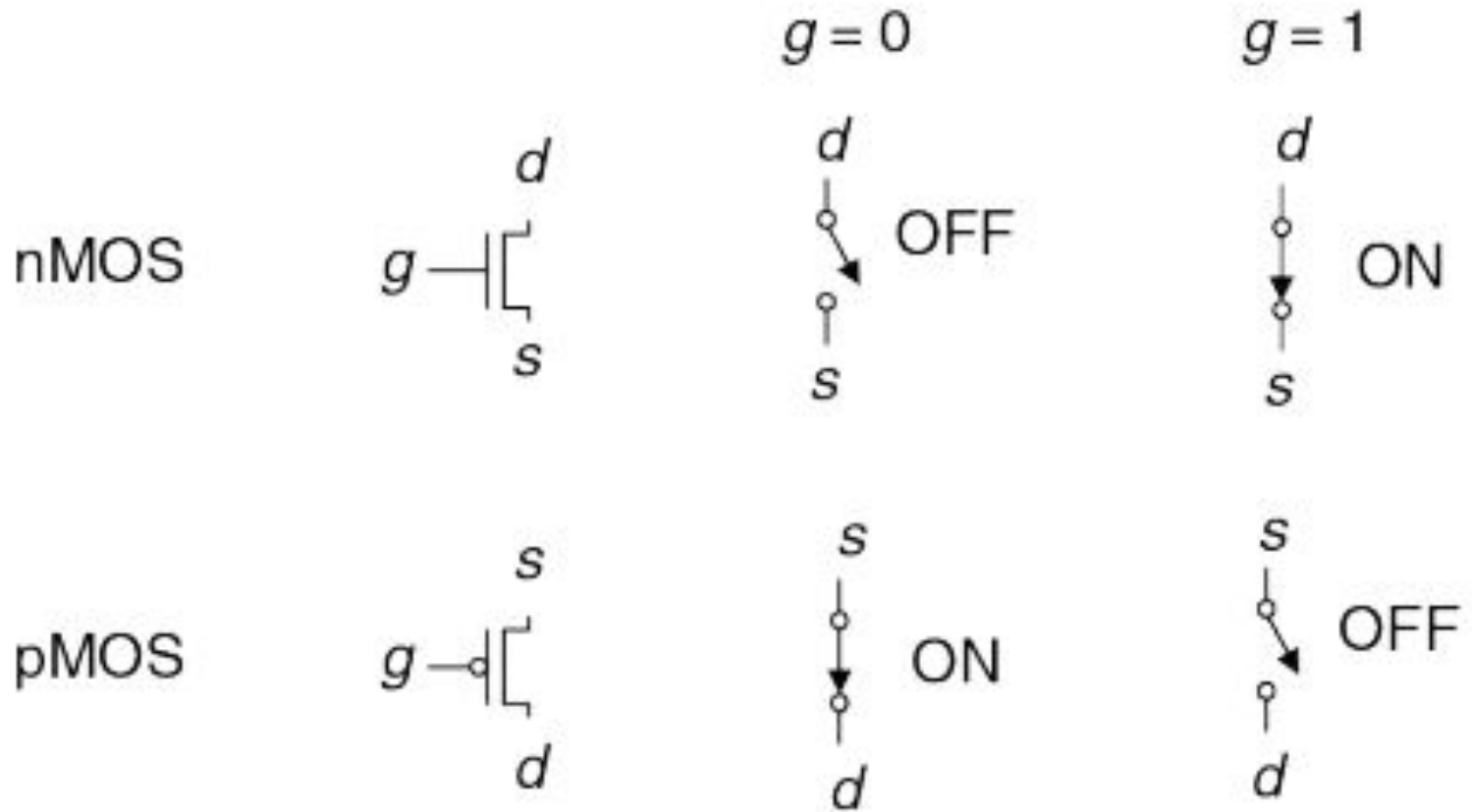
К сожалению, полевые МОП-транзисторы в роли переключателя работают далеко не идеально. В частности, n-МОП-транзисторы хорошо передают 0, но плохо передают 1. Если переход n-МОП-транзистора находится под напряжением V_{DD} , то напряжение на стоке будет колебаться между 0 и $V_{DD} - V_T$. Аналогичным же образом, p-МОП-транзисторы хорошо передают 1, но плохо передают 0.

Для изготовления n-МОП-транзистора требуется подложка с проводимостью p-типа, а для изготовления p-МОП-транзисторов необходима подложка n-типа. Для того, чтобы разместить оба типа

транзисторов на одном кристалле, производственный процесс, как

правило, начинается с подложки p-типа, в который затем имплантируют

Полупроводники Транзисторы



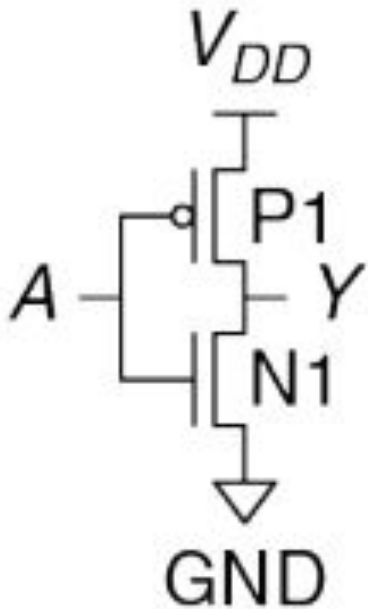
Полупроводники Транзисторы

В настоящее время КМОП-процесс используется для изготовления подавляющего большинства транзисторов и микросхем.

КМОП-процесс позволяет разместить МОП-транзисторы n-типа и p-типа.

Транзисторы n-МОП выключены, когда значение напряжения на переходе соответствует логическому 0, и включены, когда значение напряжения на переходе соответствует логическому 1. Транзисторы p-МОП, работают с точностью до наоборот.

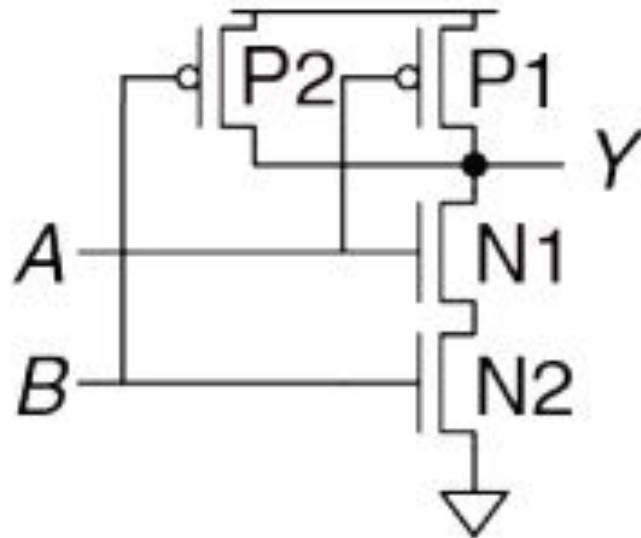
Логический вентиль НЕ на КМОП-транзисторах



Если напряжение на А равно 0, то транзистор N1 выключен, а транзистор P1 включен. При этом, напряжение на контакте Y равно напряжению питания VDD, а не земли, что соответствует логической единице. В этом случае говорят, что Y «подтянут» к единице (англ.: pulled up).

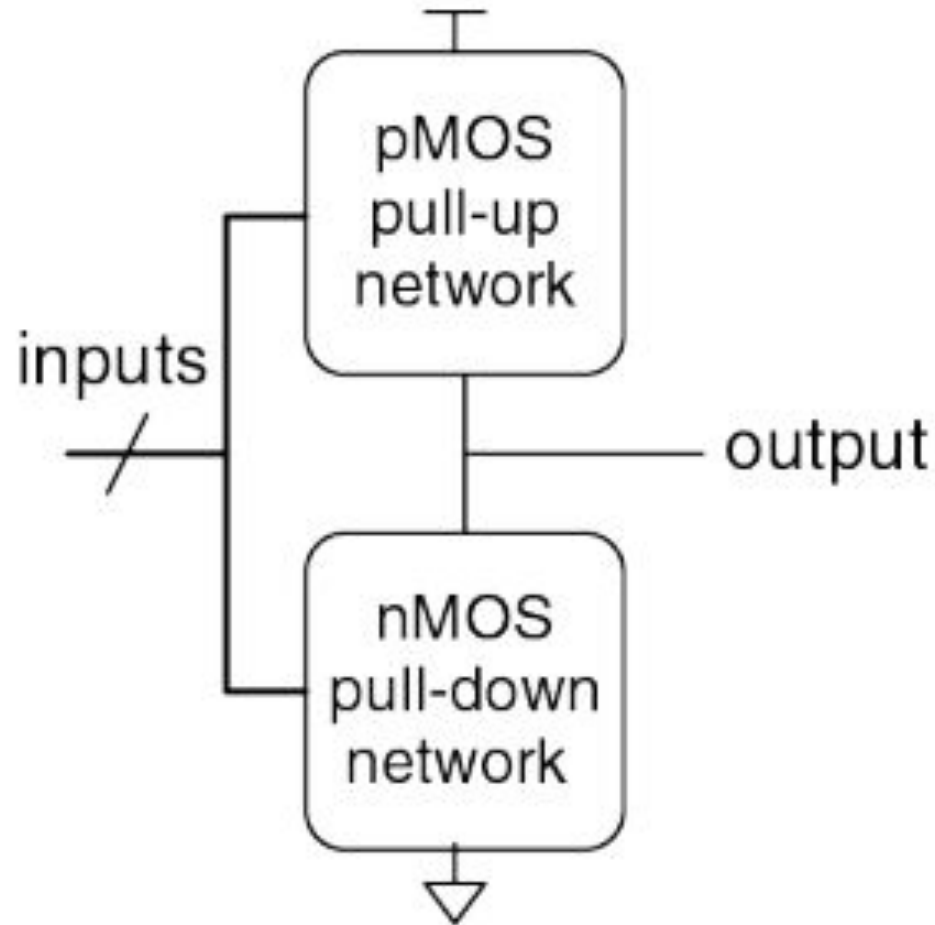
Включенный транзистор P1 хорошо передает логическую единицу (равную напряжению питания), то есть напряжение на контакте Y очень близко к VDD. Если же напряжение на контакте А равно логической единице, то транзистор N1 включен, а транзистор P1 выключен, и напряжение на контакте Y равно напряжению земли, что соответствует логическому нулю. В этом случае говорят, что Y «подтянут» к нулю (англ.: pulled down). Включенный транзистор N1 хорошо передает логический ноль, то есть напряжение на

Логический вентиль И-НЕ



A	B	Схема понижения логического уровня	Схема повышения логического уровня	Y
0	0	ВЫКЛ.	ВКЛ.	1
0	1	ВЫКЛ.	ВКЛ.	1
1	0	ВЫКЛ.	ВКЛ.	1
1	1	ВКЛ.	ВЫКЛ.	0

Общая форма логического вентиля x-НЕ



Общая форма логического вентиля x-HE

Транзисторы n-МОП хорошо передают 0, поэтому схема, понижающая логический уровень (pull-down network), составленная из таких транзисторов, помещается между выходным контактом и землей GND для передачи 0 на выход. Транзисторы p-МОП хорошо передают 1, поэтому схема, повышающая логический уровень (pull-up network), составленная из таких транзисторов, помещается между выходным контактом и напряжением питания VDD для передачи 1 на выход.

Если и понижающую, и повышающую части схемы включить одновременно, то во всей схеме возникнет короткое замыкание между напряжением питания VDD и землей GND.

Сигнал на выходном контакте может оказаться в запретной зоне, а транзисторы, потребляющие при этом большое количество энергии, могут перегореть. С другой стороны, если и понижающую и повышающую части схемы одновременно выключить, то выходной сигнал будет отключен и от VDD, и от GND. В этом случае говорят, что выходной сигнал плавает (floats). Его значение, так же как и в случае одновременно включенных схем, не

Правило дополнения проводимости

В правильно функционирующем логическом венти́ле в любой момент времени одна из схем должна быть включена, а другая выключена, и напряжение на выходе должно быть или высоким (VDD), или низким (GND). *Ни короткое замыкание, ни плавающее значение сигнала не допускается.* Чтобы гарантировать это условие, пользуются правилом дополнения проводимости (conduction complements).

Если n-МОП-транзисторы в какой-либо цепи соединены последовательно, то p-МОП-транзисторы в этой же цепи должно быть соединены параллельно. Если же n-МОП-

транзисторы соединены параллельно, то p-МОП-транзисторы должны соединяться

СХЕМА ВЕНТИЛЯ И-НЕ С ТРЕМЯ ВХОДАМИ

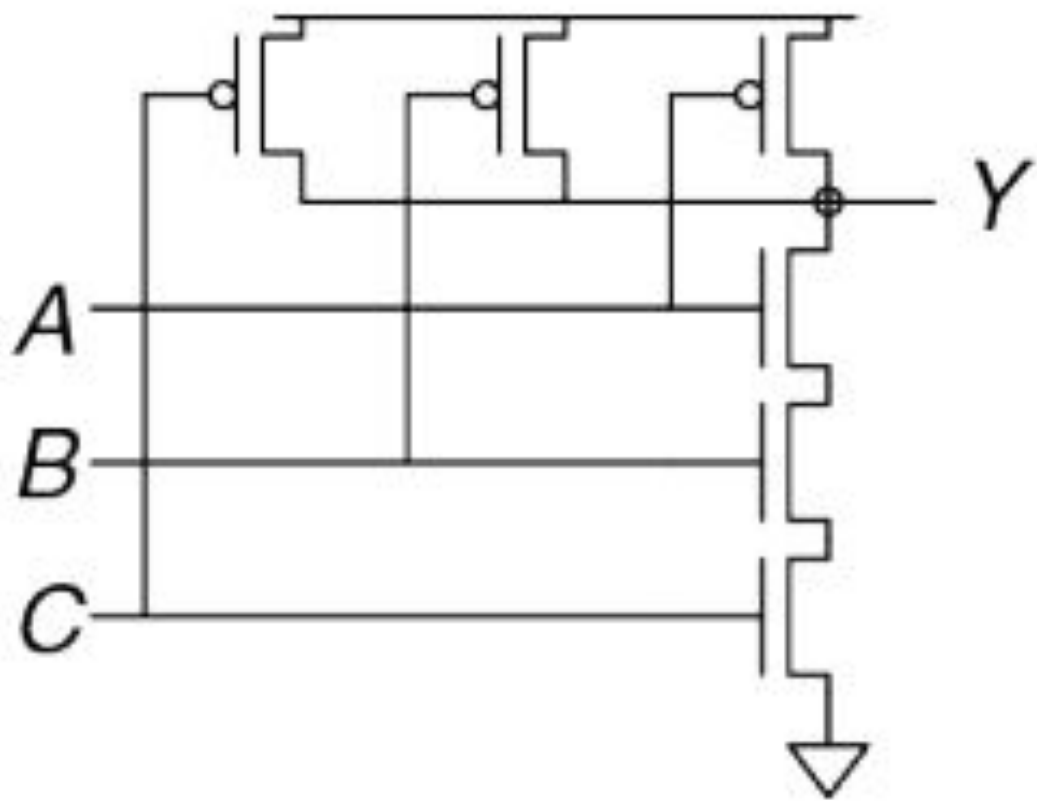


СХЕМА ВЕНТИЛЯ ИЛИ-НЕ С ДВУМЯ ВХОДАМИ

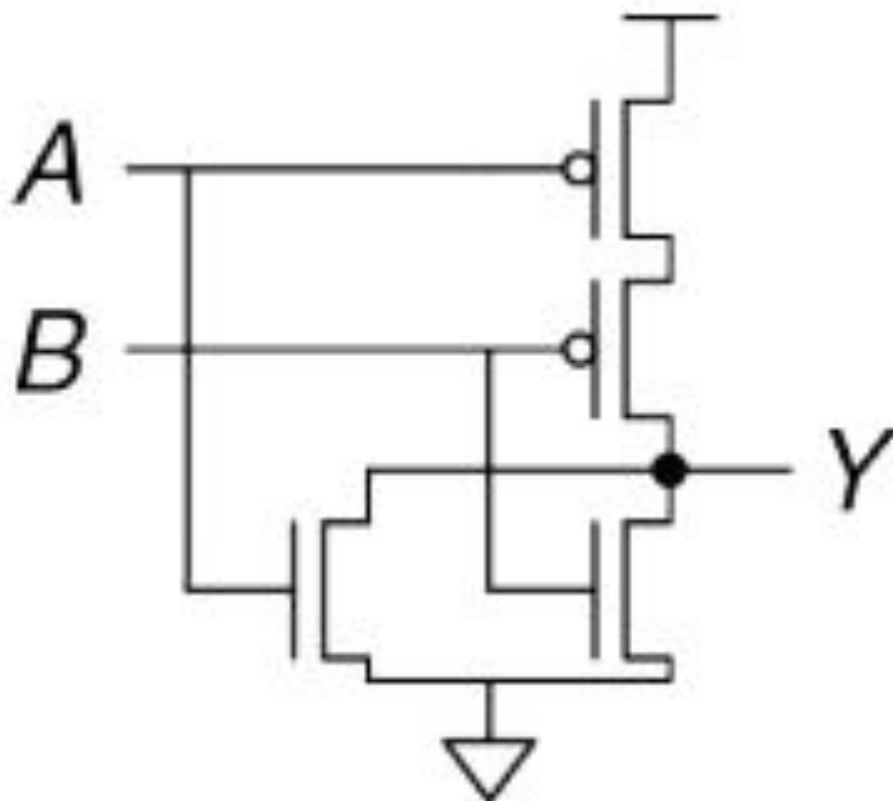
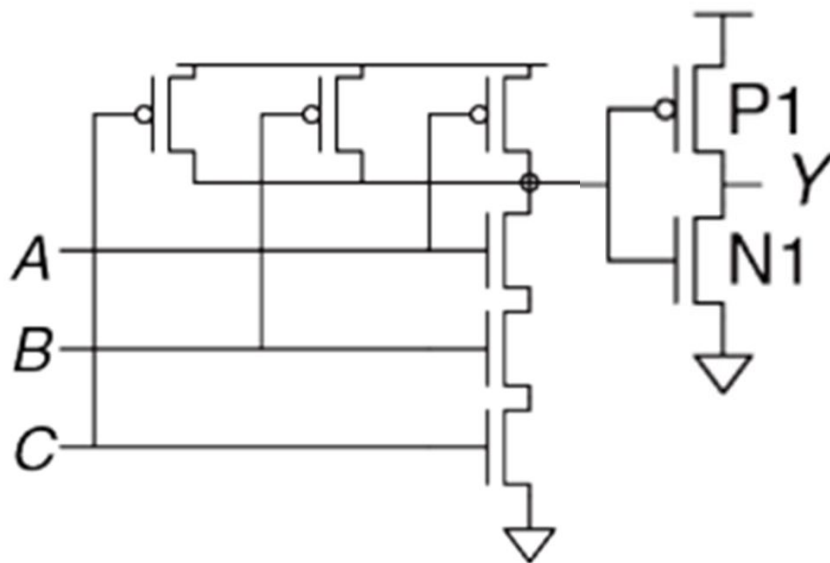
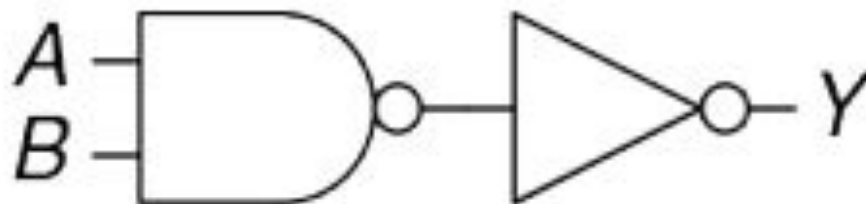
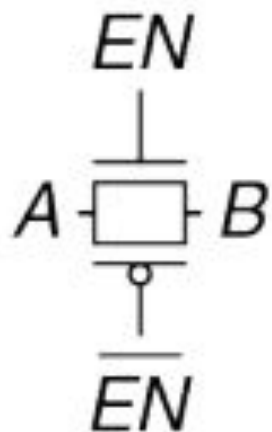


СХЕМА ВЕНТИЛЯ И С ДВУМЯ ВХОДАМИ



Передаточный логический вентиль



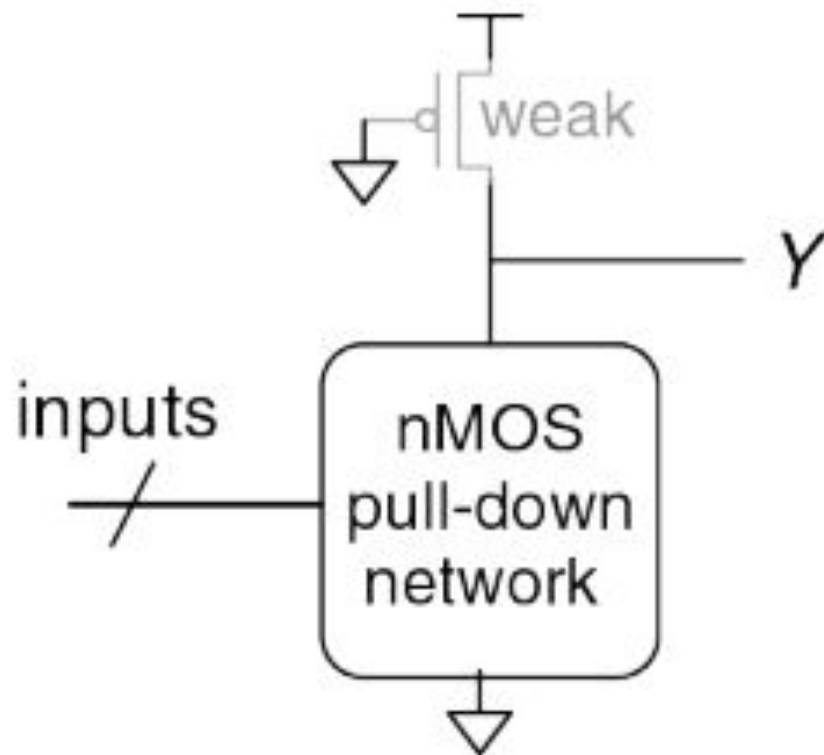
Иногда разработчику необходим идеальный переключатель, который может одинаково хорошо передавать как 0, так и 1. n-МОП-транзисторы хорошо передают 0, а p-МОП-транзисторы хорошо передают 1, и параллельное соединение этих двух транзисторов должно хорошо передавать оба этих значения.

Передаточный логический элемент (transmission gate), проходной логический вентиль (pass gate) или аналоговый ключ. Выводы этого элемента обозначаются A и B, поскольку передача сигнала в таком логическом вентиле может идти в двух направлениях, и ни одно из этих направлений не является предпочтительным. Сигналы управления (в англоязычной литературе называемые enables), обозначаются EN и \overline{EN} . Если EN равен 0, а \overline{EN} равен 1, то оба транзистора выключены. При этом, весь передаточный логический вентиль выключен, и контакт A не имеет связи с контактом B. Если же EN равен 1, а \overline{EN} равен 0, то передаточный логический вентиль включен, и любое

Псевдо n-МОП-Логика

Построенный по технологии КМОП логический вентиль ИЛИ-НЕ,
у которого число входных контактов равно N , использует N параллельно включенных n-МОП-транзисторов и N последовательно включенных p-МОП-транзисторов. Последовательно включенные транзисторы передают сигнал медленнее, чем транзисторы, включенные параллельно, аналогично тому, как сопротивление резисторов, включенных последовательно, будет больше, чем сопротивление резисторов, включенных параллельно. Кроме того, p-МОП-транзисторы передают сигналы медленнее, чем n-МОП-транзисторы, поскольку дырки не могут перемещаться по кристаллической решетке кремния так же быстро, как электроны. В результате, соединенные параллельно n-МОП-транзисторы работают быстро, а соединенные последовательно p-МОП-транзисторы работают медленно,

Псевдо n-МОП-Логика

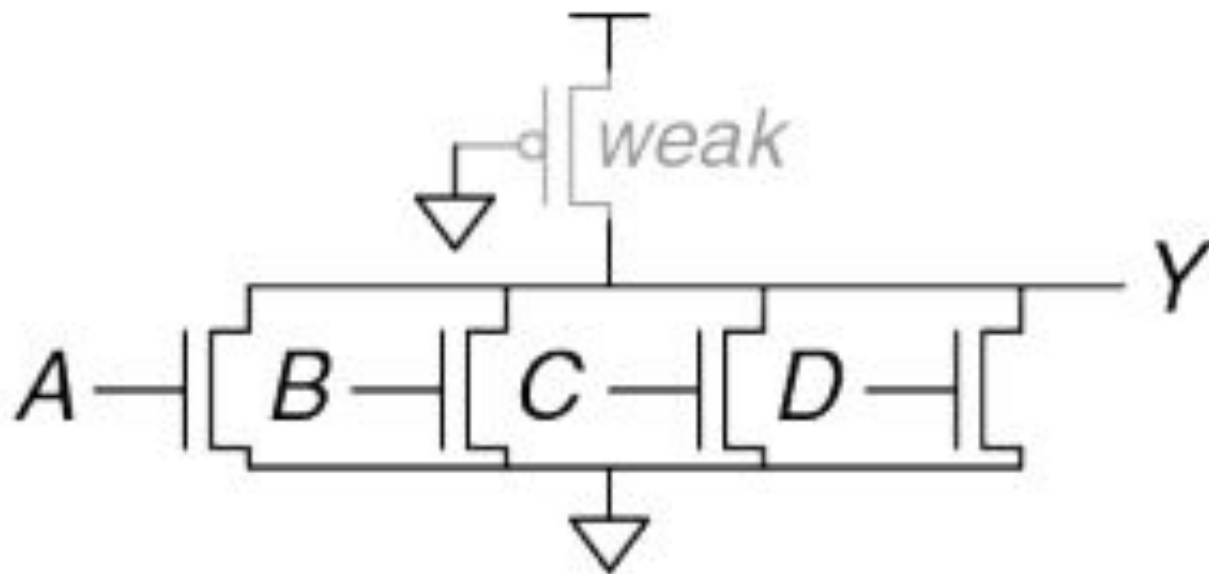


Псевдо n-МОП-Логика

При использовании псевдо n-МОП-логики (pseudo-nMOS logic), или просто псевдо-логики, медленный стек из p-МОП-транзисторов заменяют одним «слабым» p-МОП-транзистором, который всегда находится во включенном состоянии. Такой транзистор часто называют слабым подтягивающим транзистором (weak pull-up).

Физические параметры p-МОП-транзистора подбираются таким образом, что этот транзистор до высокого логического уровня (1) выход Y «подтягивает слабо» – то есть только в том случае, когда все n-МОП-транзисторы выключены. Но если при этом хотя бы один из n-МОП-транзисторов включается, то он, превосходя по мощности слабый подтягивающий транзистор, «перетягивает» выход Y настолько близко к напряжению земли GND, что на выходе получается логический 0.

Псевдо n-МОП-Логика



ПОТРЕБЛЯЕМАЯ МОЩНОСТЬ

Потребляемая мощность – это количество энергии, потребляемой системой в единицу времени. Энергопотребление имеет большое значение в цифровых системах.

Цифровая система потребляет энергию как в динамическом режиме, когда выполняет какие-либо операции, так и в статическом, когда система находится в состоянии покоя (idle). **В динамическом режиме** энергия расходуется на зарядку емкостей элементов системы, когда эти элементы переключаются между 0 и 1. И хотя **в статическом режиме** никаких переключений не происходит, система все равно расходует электрическую энергию.

ПОТРЕБЛЯЕМАЯ МОЩНОСТЬ

Потребляемая мощность – это количество энергии, потребляемой системой в единицу времени. Энергопотребление имеет большое значение в цифровых системах.

$$P_{\text{dynamic}} = \frac{1}{2}CV_{DD}^2f$$

$$P_{\text{static}} = I_{DD}V_{DD}$$

I_{DD} называется током утечки (leakage current) или током покоя (quiescent supply current).

Упражнения

Упражнение 1

Сделайте набросок схемы на уровне транзисторов для следующих КМОП-вентилей. Используйте минимальное количество транзисторов.

- a) Вентиль И-НЕ с четырьмя входами
- b) Вентиль инвертированный ИЛИ-И с тремя входами
- c) Вентиль И-ИЛИ с тремя входами

Упражнение 2

Сделайте набросок схемы на уровне транзисторов для следующих КМОП-вентилей. Используйте минимальное количество транзисторов.

- a) Вентиль ИЛИ-НЕ с тремя входами
- b) Вентиль И с тремя входами
- c) Вентиль ИЛИ с двумя входами

Упражнения

Упражнение 3

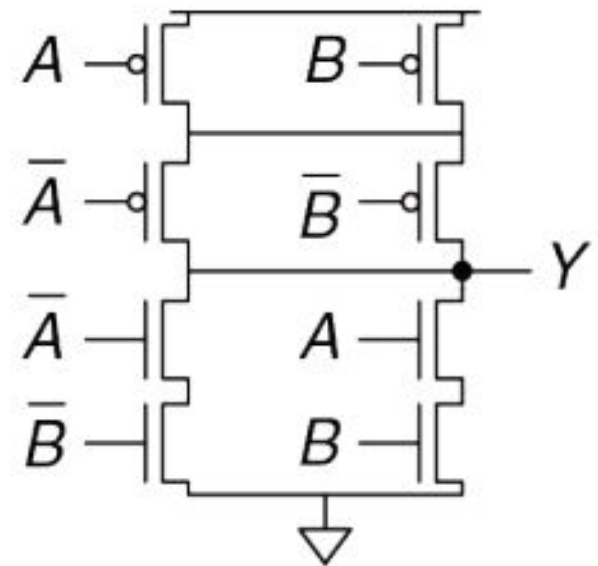
Вентиль меньшинства выдает значение ИСТИНА тогда и только тогда, когда меньше половины его входов имеют значение ИСТИНА.

В противном случае он выдает значение ЛОЖЬ. Сделайте набросок схемы на уровне транзисторов для КМОП-вентиля меньшинства. Используйте минимальное количество

транзисторов. Упражнение 4

Напишите таблицу истинности для функции вентиля на Рис. таблица должна иметь два входа A и B.

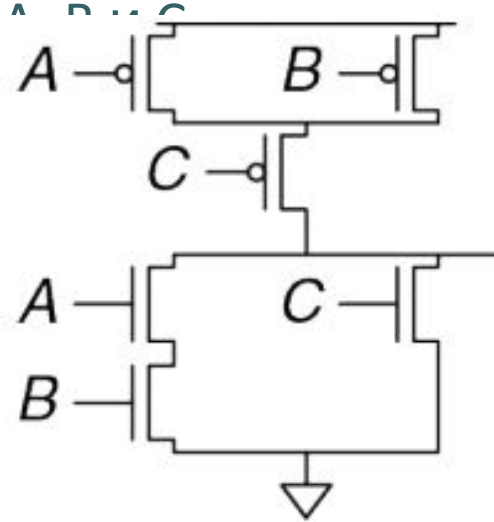
Как называется эта функция?



Упражнения

Упражнение 5

Напишите таблицу истинности для функции вентиля на Рис. таблица должна иметь три входа \hat{A} \hat{B} \hat{C}



Упражнение 6

Реализуйте следующие вентиля с тремя входами, используя только псевдо-n-MОП-логические вентиля. Используйте минимальное количество транзисторов.

- a) Вентиль ИЛИ-НЕ
- b) Вентиль И-НЕ
- Вентиль И

ЗАДАНИЯ

Упражнение 7

Резисторно-транзисторная логика (РТЛ) использует n-МОП-транзисторы для выдачи значения НИЗКИЙ (LOW) и резистор с малым сопротивлением для выдачи значения ВЫСОКИЙ (HIGH), когда ни один из путей к заземлению не активен. Вентиль НЕ, построенный с помощью РТЛ, показан на Рис. Сделайте набросок схемы РТЛ-вентиля ИЛИ-НЕ с тремя входами. Используйте минимальное количество транзисторов.

