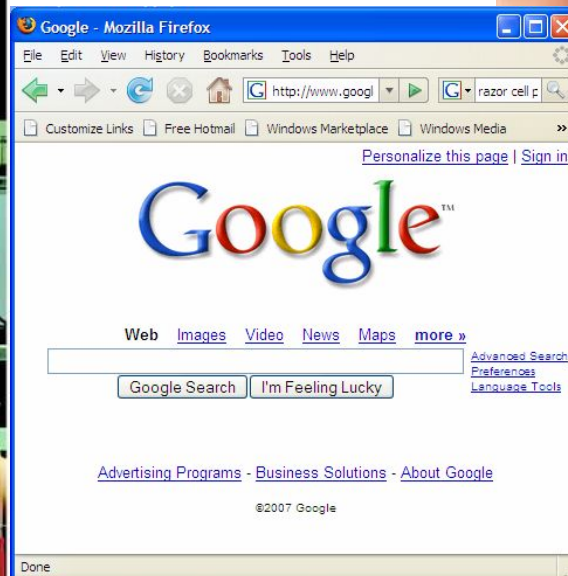


# Глава1 :: Темы

- **Микроэлектронная промышленность**
- **План игры**
- **Искусство управления сложностью**
- **Цифровая абстракция**
- **Системы счисления**
- **Логические элементы**
- **Логические уровни**
- **КМОП транзисторы**
- **Энергопотребление**

# Полупроводниковая микроэлектроника

- Микропроцессоры кардинально изменили наш мир
  - Сотовые телефоны, интернет, достижения в медицинской сфере
- Объем продаж полупроводниковой промышленности вырос с 21 миллиарда долларов в 1985 году до 300 миллиардов долларов в 2011



# План игры

- Цель курса:
  - Понять, что происходит внутри корпуса компьютера
  - Изучить основные принципы цифровой схемотехники
  - Научиться разрабатывать проекты увеличивающейся сложности
  - Научиться проектировать микропроцессоры

# Искусство управления

- Абстракция
- Дисциплина
- Три базовых принципа
  - Иерархичность
  - Модульность
  - Регулярность

# Абстракция

- Исключение из рассмотрения деталей, которые в данном контексте неважны

focus of this course

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

# Дисциплина

- Намеренное ограничение выбора возможных проектных решений
- Пример: Цифровая дисциплина
  - Использование дискретных значений напряжений вместо непрерывных
  - Цифровые системы проще проектировать, чем аналоговые – можно создать более сложные устройства
  - Аналоговые предшественники были вытеснены цифровыми системами:
    - например, цифровые камеры, цифровое телевидение, сотовые телефоны, компакт-диски

# Три базовых принципа

- **Иерархичность**

- Система разделяется на модули и подмодули

- **Модульность**

- Каждый модуль имеет четко определенные функции и интерфейсы

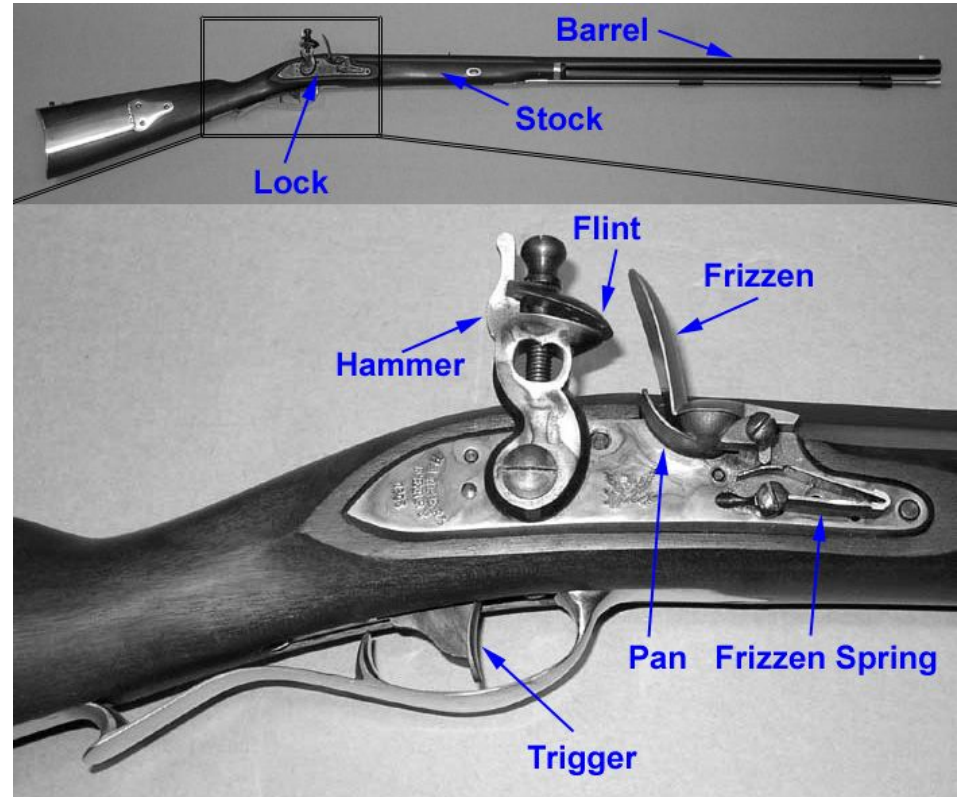
- **Регулярность**

- Поощрение единообразия, что позволяет многократно использовать модули

# Пример: Кремневое ружье

- **Иерархичность**

- Три главные модуля:  
ствол, ударно-спусковой механизм и приклад с цевьем
- Подмодули ударно-спускового механизма:  
крючок, курок, кремль и т.д.





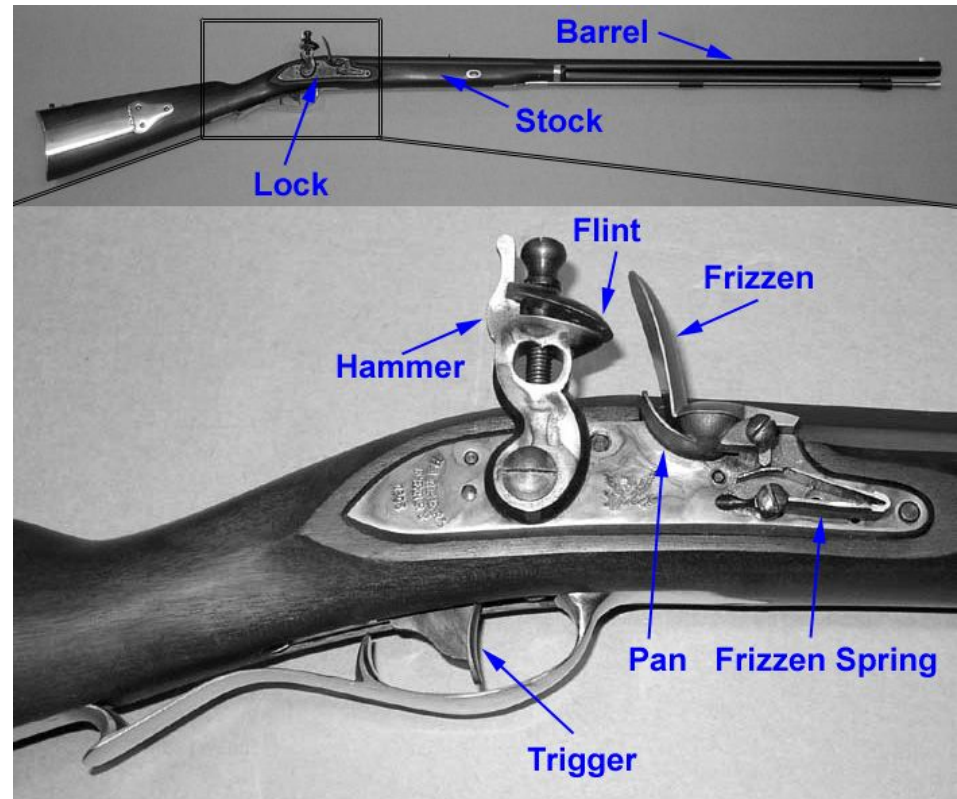
# Пример: Кремневое ружье

- **Модульность**

- **Функции приклада и цевья:** служить базой для установки ствола и ударно-спускового механизма
- **Интерфейс приклада и цевья:** длина и расположение посадочных мест

- **Регулярность**

- Взаимозаменяемые детали

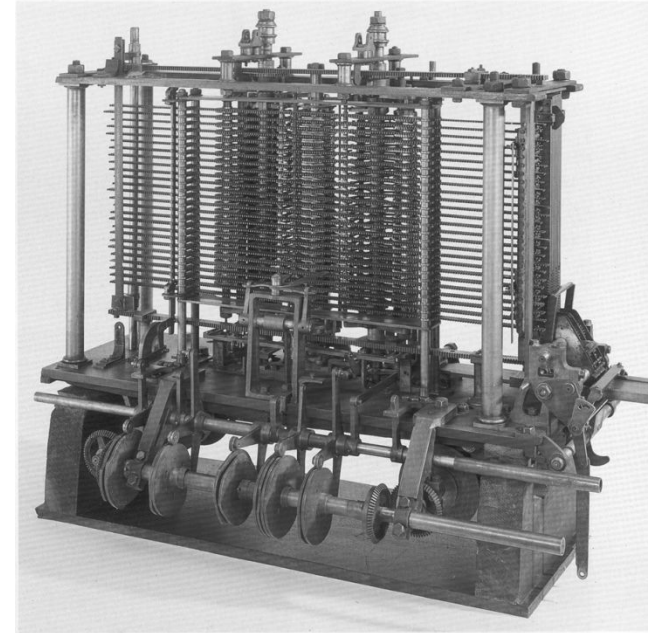


# Цифровая абстракция

- Большинство физических величин **непрерывны**
  - Потенциал проводника
  - Частота колебаний
  - Положение тела
- Цифровая абстракция рассматривает **дискретное множество** возможных значений

# Аналитическая машина

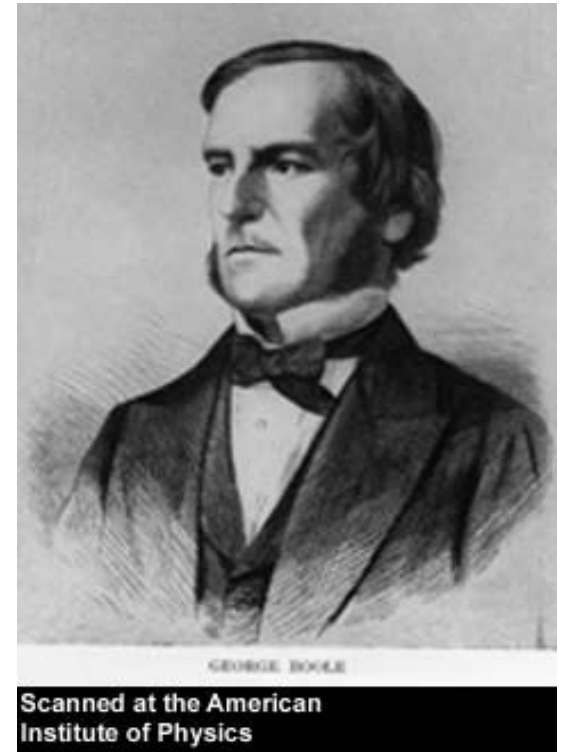
- Спроектирована Чарльзом Бэббиджем в 1834 – 1871 годах
- Считается первым цифровым компьютером
- Построена из механических шестеренок, каждая шестеренка представляла дискретную величину (0-9)
- Бэббидж не дожил до окончания работ над машиной



- **Два дискретные значения:**
  - 1 и 0
  - 1, Истина, Большая величина
  - 0, Ложь, Малая величина
- **1 и 0:** Величина напряжения, угол поворота шестеренки, уровень жидкости и т.д.
- Цифровые схемы используют значение **напряжения** для представления 0 и 1
- **Bit (Bit):** Двоичная цифра (*Binary digit*)

# Джордж Буль, 1815-1864

- Родился в семье небогатого ремесленника
- Самостоятельно изучал математику и стал преподавателем Королевского колледжа в Ирландии.
- Написал работу *Исследование законов мышления* (1854)
- Ввел двоичные переменные
- Ввел три основных логических оператора: И, ИЛИ, НЕ (AND, OR, NOT)



# Системы счисления

- Десятичные числа

1's column  
10's column  
100's column  
1000's column

$$5374_{10} =$$

- Двоичные числа

1's column  
2's column  
4's column  
8's column

$$1101_2 =$$

# Системы счисления

- Десятичные числа

1's column  
10's column  
100's column  
1000's column

$$5374_{10} = 5 \times 10^3 + 3 \times 10^2 + 7 \times 10^1 + 4 \times 10^0$$

five                      three                      seven                      four  
thousands              hundreds              tens                      ones

- Двоичные числа

1's column  
2's column  
4's column  
8's column

$$1101_2 = 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = 13_{10}$$

one                      one                      no                      one  
eight                      four                      two                      one

# Степени числа 2

- $2^0 =$

- $2^1 =$

- $2^2 =$

- $2^3 =$

- $2^4 =$

- $2^5 =$

- $2^6 =$

- $2^7 =$

- $2^8 =$

- $2^9 =$

- $2^{10} =$

- $2^{11} =$

- $2^{12} =$

- $2^{13} =$

- $2^{14} =$

- $2^{15} =$



# Степени числа 2

- $2^0 = 1$
- $2^1 = 2$
- $2^2 = 4$
- $2^3 = 8$
- $2^4 = 16$
- $2^5 = 32$
- $2^6 = 64$
- $2^7 = 128$
- $2^8 = 256$
- $2^9 = 512$
- $2^{10} = 1024$
- $2^{11} = 2048$
- $2^{12} = 4096$
- $2^{13} = 8192$
- $2^{14} = 16384$
- $2^{15} = 32768$
- Желательно запомнить до  $2^9$

- Преобразование двоичного числа в десятичное:
  - Преобразовать  $10011_2$  в десятичное число
- Преобразование десятичного числа в двоичное:
  - Преобразовать  $47_{10}$  в двоичное число

- Преобразование десятичного числа в двоичное:

- Преобразовать  $10011_2$  в десятичное число
- $16 \times 1 + 8 \times 0 + 4 \times 0 + 2 \times 1 + 1 \times 1 = 19_{10}$

- Преобразование десятичного числа в двоичное:

- Преобразовать  $47_{10}$  в двоичное число
- $32 \times 1 + 16 \times 0 + 4 \times 1 + 2 \times 1 + 1 \times 1 = 101111_2$

# Двойничные числа и их диапазоны

- $N$ -разрядное десятичное число
  - Сколько значений?
  - Диапазон?
  - Пример: Трёхразрядное десятичное число
- $N$ -битовое двоичное число
  - Сколько значений?
  - Диапазон:
  - Пример: Трёхразрядное двоичное число

# Двойничные числа и их диапазоны

- $N$ -разрядное десятичное число
  - Сколько значений?  $10^N$
  - Диапазон?  $[0, 10^N - 1]$
  - Пример: Трёхразрядное десятичное число
    - $10^3 = 1000$  возможных значений
    - Диапазон:  $[0, 999]$
- $N$ -битовое двоичное число
  - Сколько значений?  $2^N$
  - Диапазон:  $[0, 2^N - 1]$
  - Пример: Трёхразрядное двоичное число
    - $2^3 = 8$  возможных значений
    - Диапазон:  $[0, 7] = [\text{от } 000_2 \text{ до } 111_2]$

# Шестнадцатеричные числа

Шестнадцатеричная цифра	Десятичный эквивалент	Двоичный эквивалент
0	0	
1	1	
2	2	
3	3	
4	4	
5	5	
6	6	
7	7	
8	8	
9	9	
A	10	
B	11	
C	12	
D	13	
E	14	
F	15	

# Шестнадцатеричные числа

Шестнадцатеричная цифра	Десятичный эквивалент	Двоичный эквивалент
0	0	0000
1	1	0001
2	2	0010
3	3	0011
4	4	0100
5	5	0101
6	6	0110
7	7	0111
8	8	1000
9	9	1001
A	10	1010
B	11	1011
C	12	1100
D	13	1101
E	14	1110
F	15	1111

# Шестнадцатеричные числа

- Основание 16
- Компактная запись двоичных чисел



# Преобразование шестнадцатеричных чисел в двоичные

- Преобразование шестнадцатеричных чисел в двоичные:
  - Преобразовать  $4AF_{16}$  (также записывается  $0x4AF$ ) в двоичное число
- Преобразование шестнадцатеричных чисел в двоичные:
  - Преобразовать  $0x4AF$  в десятичное число

# Преобразование шестнадцатеричных чисел в двоичные

- Преобразование шестнадцатеричных чисел в двоичные:

- Преобразовать  $4AF_{16}$  (также записывается  $0x4AF$ ) в двоичное число
- $0100\ 1010\ 1111_2$

- Преобразование шестнадцатеричных чисел в десятичные:

- Преобразовать  $4AF_{16}$  в десятичное число
- $16^2 \times 4 + 16^1 \times 10 + 16^0 \times 15 = 1199_{10}$

# Биты, байты, полубайты...

- Биты

10010110

most significant bit      least significant bit

- Байты и
- полубайты (nibble)

byte

10010110

nibble

- Байты

CEBF9AD7

most significant byte      least significant byte

# Большие степени 2

- $2^{10} = 1 \text{ кило} \approx 1000 \text{ (1024)}$
- $2^{20} = 1 \text{ мега} \approx 1 \text{ миллион (1,048,576)}$
- $2^{30} = 1 \text{ гига} \approx 1 \text{ миллиард (1,073,741,824)}$

# Вычисление степеней 2

- Чему равно  $2^{24}$ ?
- Сколько значений может представить 32-битовая переменная?

# Вычисление степеней 2

- Чему равно  $2^{24}$ ?
  - $2^4 \times 2^{20} \approx 16$  миллионов
- Сколько значений может представить 32-битовая переменная?
  - $2^2 \times 2^{30} \approx 4$  миллиарда

# Сложение

- Десятичное

$$\begin{array}{r} 11 \leftarrow \text{carries} \\ 3734 \\ + 5168 \\ \hline 8902 \end{array}$$

- Двоичное

$$\begin{array}{r} 11 \leftarrow \text{carries} \\ 1011 \\ + 0011 \\ \hline 1110 \end{array}$$

# Примеры сложения двоичных чисел

- Сложите следующие 4-битовые двоичные числа

$$\begin{array}{r} 1001 \\ + 0101 \\ \hline \end{array}$$

- Сложите следующие 4-битовые двоичные числа

$$\begin{array}{r} 1011 \\ + 0110 \\ \hline \end{array}$$



# Примеры сложения двоичных чисел

- Сложите следующие 4-битовые двоичные числа

$$\begin{array}{r} 1 \\ 1001 \\ + 0101 \\ \hline 1110 \end{array}$$

- Сложите следующие 4-битовые двоичные числа

$$\begin{array}{r} 111 \\ 1011 \\ + 0110 \\ \hline 10001 \end{array}$$

Переполнение!

# Переполнение

- Цифровые системы работают с **фиксированным количеством разрядов**
- Переполнение: когда результат слишком большой, чтобы поместится в доступном количестве разрядов
- Вспомните пример сложения  $11 + 6$

# Двоичные числа со знаком

- Числа в прямом коде
- Числа в дополнительном коде

# Числа в прямом коде

- Один знаковый бит,  $N-1$  битов величины
- Знаковый бит является старшим (самым левым) битом
  - Положительные числа:

знаковый бит = 1

$$A: \{a_{N-1}, a_{N-2}, \dots, a_2, a_1, a_0\}$$

- Отрицательные числа:

знаковый бит = 0

$$A = (-1)^{a_{n-1}} \sum_{i=0}^{n-2} a_i 2^i$$

- Пример, 4-битовое представление числа  $\pm 6$  в прямом коде
  - +6 =
  - 6 =
- Диапазон  $N$ -битового числа в прямом коде:

# Числа в прямом коде

- Один знаковый бит,  $N-1$  битов величины
- Знаковый бит является старшим (самым левым) битом
  - Положительные числа:

знаковый бит = 1

$$A : \{a_{N-1}, a_{N-2}, \dots, a_2, a_1, a_0\}$$

- Отрицательные числа:

знаковый бит = 0

$$A = (-1)^{a_{n-1}} \sum_{i=0}^{n-2} a_i 2^i$$

- Пример, 4-битовое представление числа  $\pm 6$  в прямом коде

$$+6 = \mathbf{0110}$$

$$-6 = \mathbf{1110}$$

- Диапазон  $N$ -битового числа в прямом коде:  
 $[-(2^{N-1}-1), 2^{N-1}-1]$

# Числа в прямом коде

- Недостатки:
  - Стандартный способ сложения не работает, например,  $-6 + 6$ :

$$\begin{array}{r} 1110 \\ +0110 \\ \hline \end{array}$$

10100 (не правильно!)

- Два представления числа 0 ( $\pm 0$ ):

1000

0000

# Числа в дополнительном

- Не имеет проблем прямого кода
  - Алгоритм сложения работает
  - Единственное представление 0

# Числа в дополнительном

- Старший бит имеет вес  $-2^{N-1}$

$$A = a_{n-1} \left( -2^{n-1} \right) + \sum_{i=0}^{n-2} a_i 2^i$$

- Наибольшее положительное 4-битовое число
- Наибольшее (по модулю) отрицательное 4-битовое число
- Старший бит, как и ранее, показывает знак (1 = отрицательное, 0 = положительное)
- Диапазон  $N$ -битового числа в дополнительном коде:



# Числа в дополнительном

- Старший бит имеет вес  $-2^{N-1}$

$$A = a_{n-1} \left( -2^{n-1} \right) + \sum_{i=0}^{n-2} a_i 2^i$$

- Наибольшее положительное 4-битовое число **0111**
- Наибольшее (по модулю) отрицательное 4-битовое число **1000**
- Старший бит, как и ранее, показывает знак (1 = отрицательное, 0 = положительное)
- Диапазон  $N$ -битового числа в дополнительном коде:  
 **$[-(2^{N-1}-1), 2^{N-1}-1]$**

# Операция “Дополнение до двух”

- Изменение знака числа, представленного в дополнительном коде
- Метод:
  1. Инвертировать биты
  2. Добавить 1
- Пример: Изменить знак  $3_{10} = 0011_2$

# Операция “Дополнение до двух”

- Изменение знака числа, представленного в дополнительном коде
- Метод:
  1. Инвертировать биты
  2. Добавить 1
- Пример: Изменить знак  $3_{10} = 0011_2$

1.  $1100$

2.  $+ 1$

$1101 = -3_{10}$

# Примеры вычислений с числами в дополнительном коде

- Найти представление в дополнительном коде числа  $6_{10} = 0110_2$
- Чему равно десятичное представление числа  $1001_2$ ?

# Примеры вычислений с числами в дополнительном коде

- Найти представление в дополнительном коде  $6_{10} = 0110_2$

1. 1001

2. + 1

$$1010 = -6_{10}$$

- Чему равно десятичное представление числа в дополнительном коде  $1001_2$ ?

1. 0110

2. + 1

$$\neg 0111_2 = 7_{10}, \text{ следовательно } 1001_2 = -7_{10}$$

# Сложение чисел в дополнительном коде

- Сложить числа  $6 + (-6)$  с использованием дополнительного кода

$$\begin{array}{r} 0110 \\ + 1010 \\ \hline \end{array}$$

- Сложить числа  $-2 + 3$  с использованием дополнительного кода

$$\begin{array}{r} 1110 \\ + 0011 \\ \hline \end{array}$$

# Сложение чисел в дополнительном коде

- Сложить числа  $6 + (-6)$  с использованием дополнительного кода

$$\begin{array}{r} 111 \\ 0110 \\ + 1010 \\ \hline 10000 \end{array}$$

- Сложить числа  $-2 + 3$  с использованием дополнительного кода

$$\begin{array}{r} 111 \\ 1110 \\ + 0011 \\ \hline 10001 \end{array}$$

# Увеличение количества бит

- **Увеличить количество бит с  $N$  до  $M$  ( $M > N$ ) :**
  - Знаковое расширение
  - Дополнение нулями



# Знаковое расширение

- Знаковый бит копируется во все новые старшие биты
- Значение числа не изменяется
- **Пример 1:**
  - 4-битовое представление  $3 = 0011$
  - 8-битовое представление:  $00000011$
- **Пример 2:**
  - 4-битовое представление  $-5 = 1011$
  - 8-битовое представление:  $11111011$

# Дополнение нулями

- Все новые старшие биты принимают нулевое значение
- Значение отрицательных чисел изменяется

- **Пример 1:**

- 4-битовая величина =  $0011_2 = 3_{10}$
- 8-битовая величина после дополнения нулями:  
 $00000011 = 3_{10}$

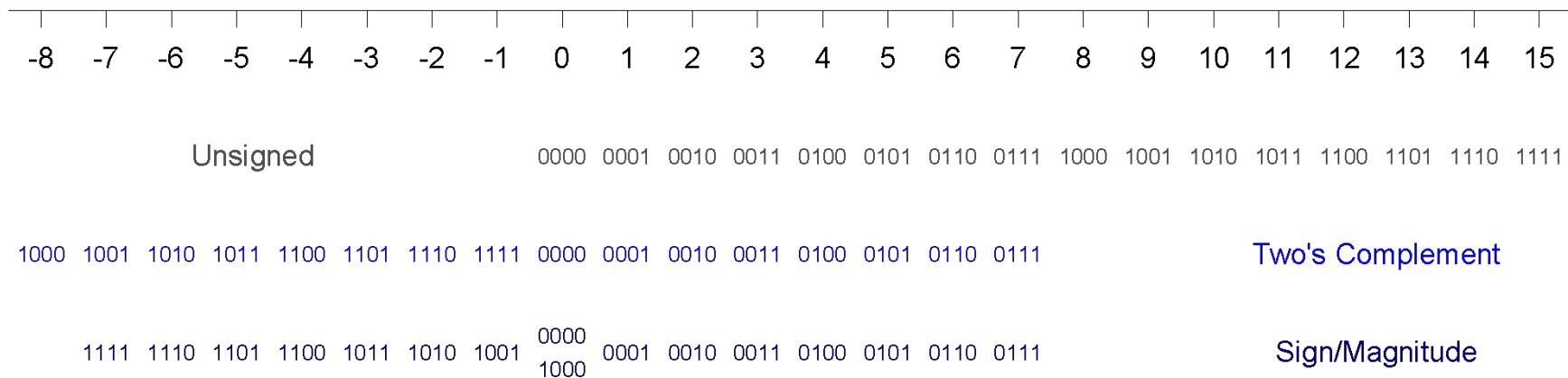
- **Пример 2:**

- 4-битовая величина =  $1011_2 = -5_{10}$
- 8-битовая величина после дополнения нулями:  
 $00001011 = 11_{10}$

# Сравнение способов представления двоичных чисел

Представление	Диапазон
Числа без знака	$[0, 2^N - 1]$
Числа в прямом коде	$[-(2^{N-1} - 1), 2^{N-1} - 1]$
Числа в дополнительном коде	$[-2^{N-1}, 2^{N-1} - 1]$

Пример: 4-битовое представление:

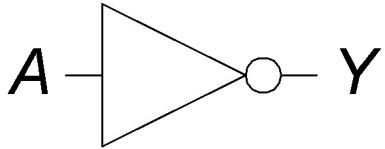


# Логические элементы

- **Выполняют логические функции**
  - Инверсия (НЕ), И (AND), ИЛИ (OR), И-НЕ (NAND), ИЛИ-НЕ (NOR), и т.д.
- **С одним входом**
  - Элемент НЕ, буфер
- **С двумя входами**
  - И, ИЛИ, И-НЕ, ИЛИ-НЕ, Исключающее ИЛИ, Исключающее ИЛИ-НЕ
- **С несколькими входами**

# Логические элементы с одним выходом

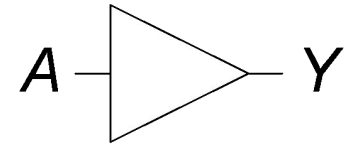
## NOT



$$Y = \overline{A}$$

A	Y
0	
1	

## BUF

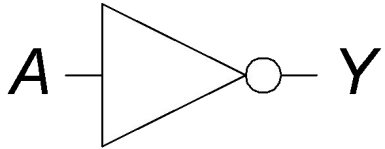


$$Y = A$$

A	Y
0	
1	

# Логические элементы с одним выходом

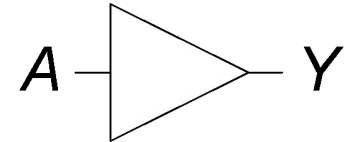
## NOT



$$Y = \overline{A}$$

A	Y
0	1
1	0

## BUF



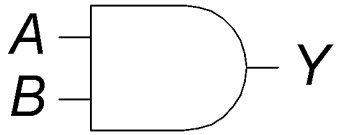
$$Y = A$$

A	Y
0	0
1	1

# Логические элементы с двумя

ВХОДАМИ

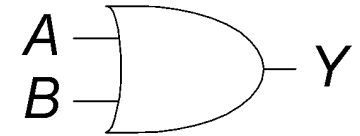
## AND



$$Y = AB$$

A	B	Y
0	0	
0	1	
1	0	
1	1	

## OR



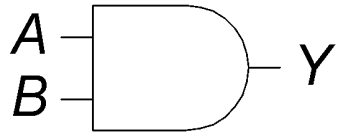
$$Y = A + B$$

A	B	Y
0	0	
0	1	
1	0	
1	1	

# Логические элементы с двумя

ВХОДАМИ

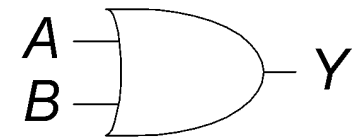
## AND



$$Y = AB$$

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

## OR



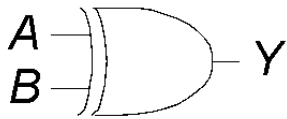
$$Y = A + B$$

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



# Прочие логические элементы с двумя входами

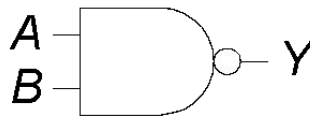
## XOR



$$Y = A \oplus B$$

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

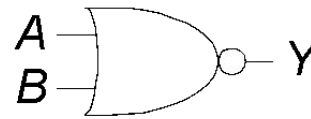
## NAND



$$Y = \overline{AB}$$

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

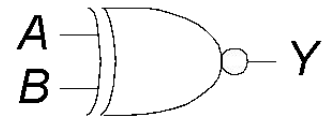
## NOR



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

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

## XNOR

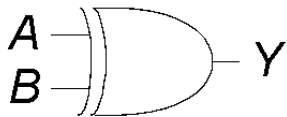


$$Y = \overline{A \oplus B}$$

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

# Прочие логические элементы с двумя входами

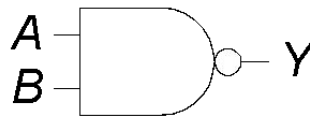
## XOR



$$Y = A \oplus B$$

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

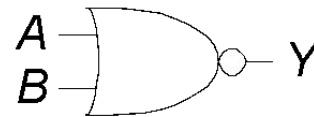
## NAND



$$Y = \overline{AB}$$

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

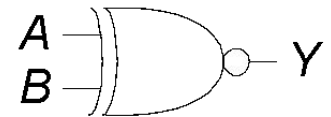
## NOR



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

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

## XNOR

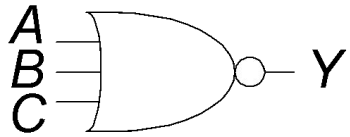


$$Y = \overline{A \oplus B}$$

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

# Логические элементы с несколькими входами

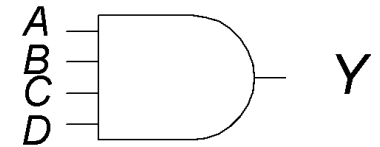
## NOR3



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

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

## AND4



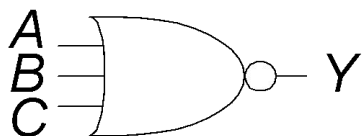
$$Y = ABCD$$

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



# Логические элементы с несколькими входами

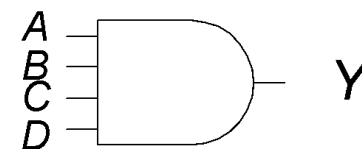
## NOR3



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

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

## AND4



$$Y = ABCD$$

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

- Многовходовый элемент XOR: Контроль четности

# Логические уровни

- Дискретные уровни напряжения представляют 1 и 0
- Например:
  - 0 = земля (GND) или 0 В
  - 1 =  $V_{DD}$  или 5 В
- Как трактовать напряжение 4.99 В? Это 0 или 1?
- Как трактовать напряжение 3.2 В?

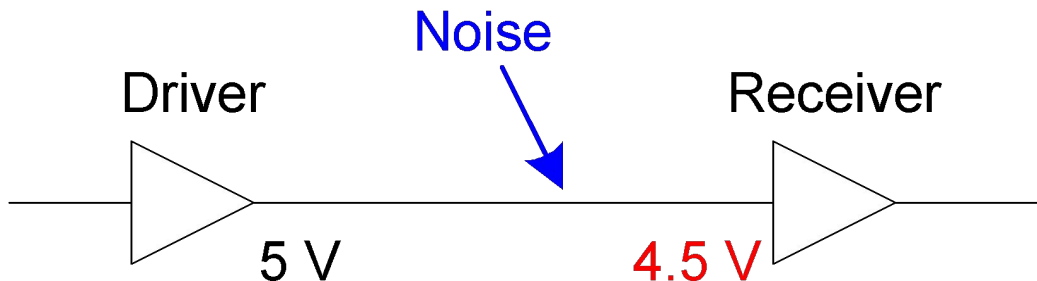
# Логические уровни

- Диапазон напряжений для 1 и 0
- Разные диапазоны для входов и выходов обеспечивают работу схем при наличии помех и шумов

# Что такое шум?

# Что такое шум?

- **Любая помеха искажающая сигнал**
  - Например, сопротивление проводников, помехи источника питания, наводки от соседних проводников и т.д.
- **Пример:** элемент (его выходной каскад) выдает 5 В, но из-за сопротивления длинного проводника на приемник поступает 4.5 В

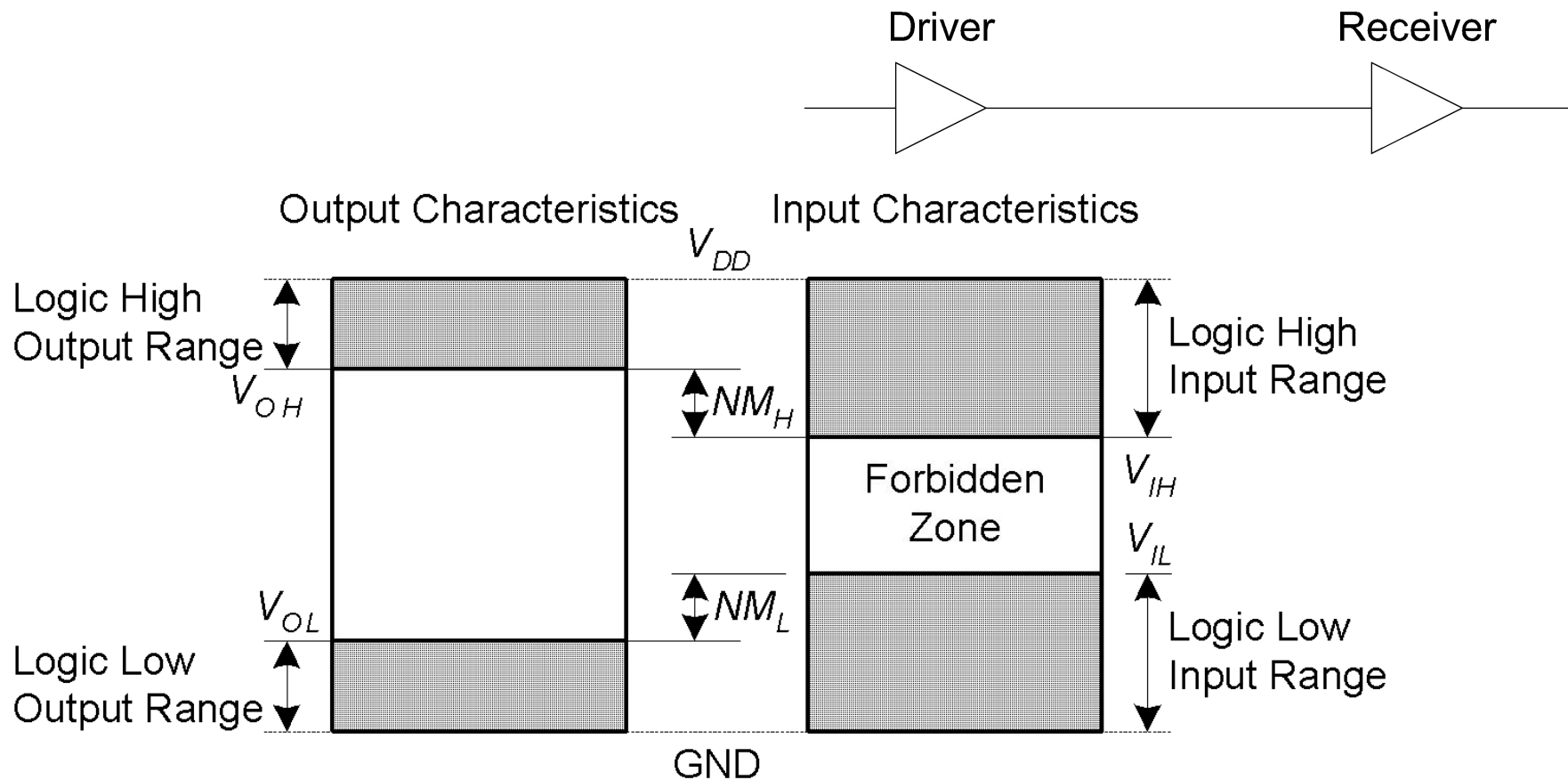




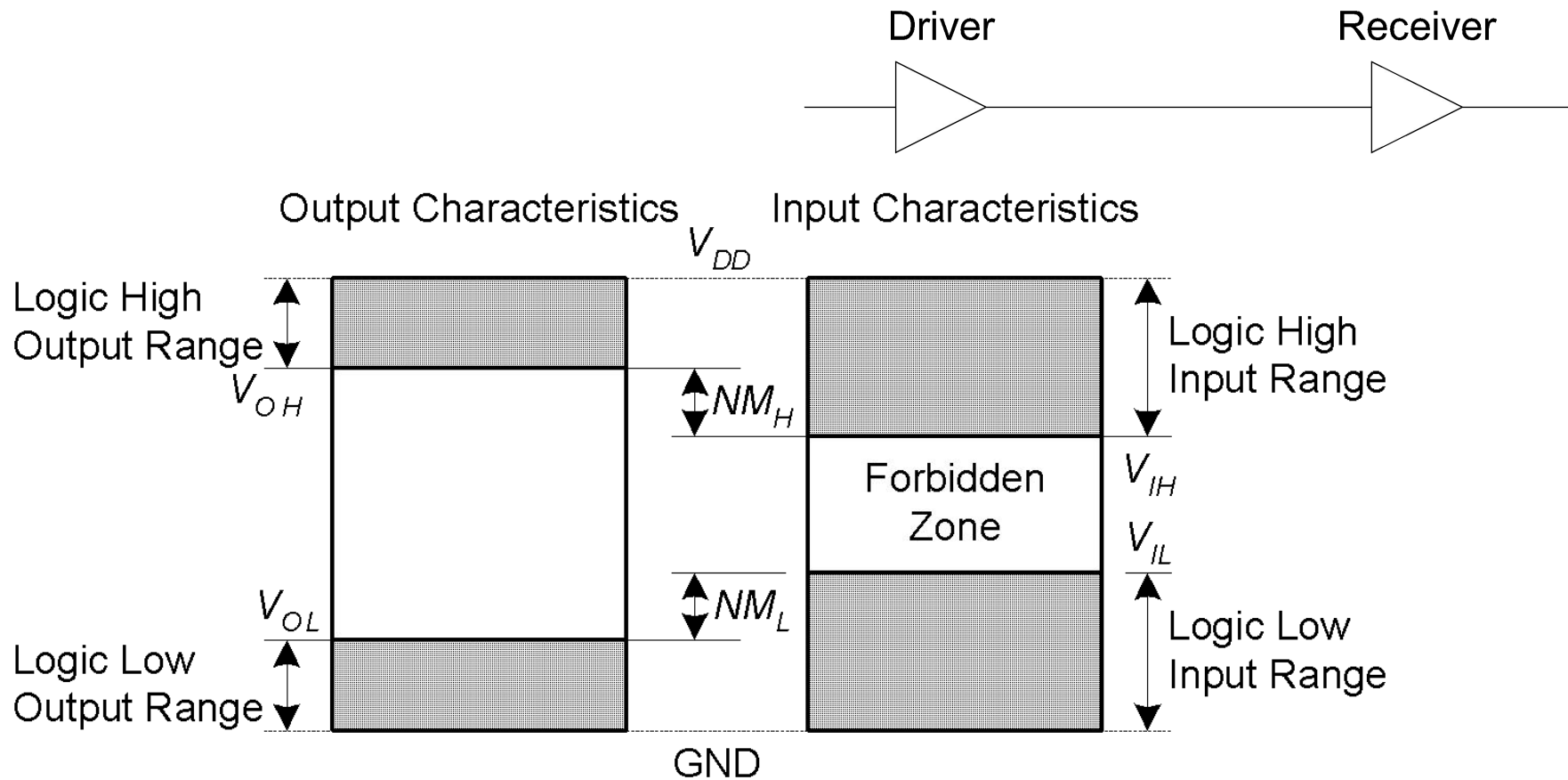
# Статическая дисциплина

- Если на вход элемента поступают корректные логические значения, на его выходе формируются корректные выходные сигналы
- Для представления дискретных величин используется ограниченный диапазон напряжений

# Логические уровни



# Допустимые уровни шумов

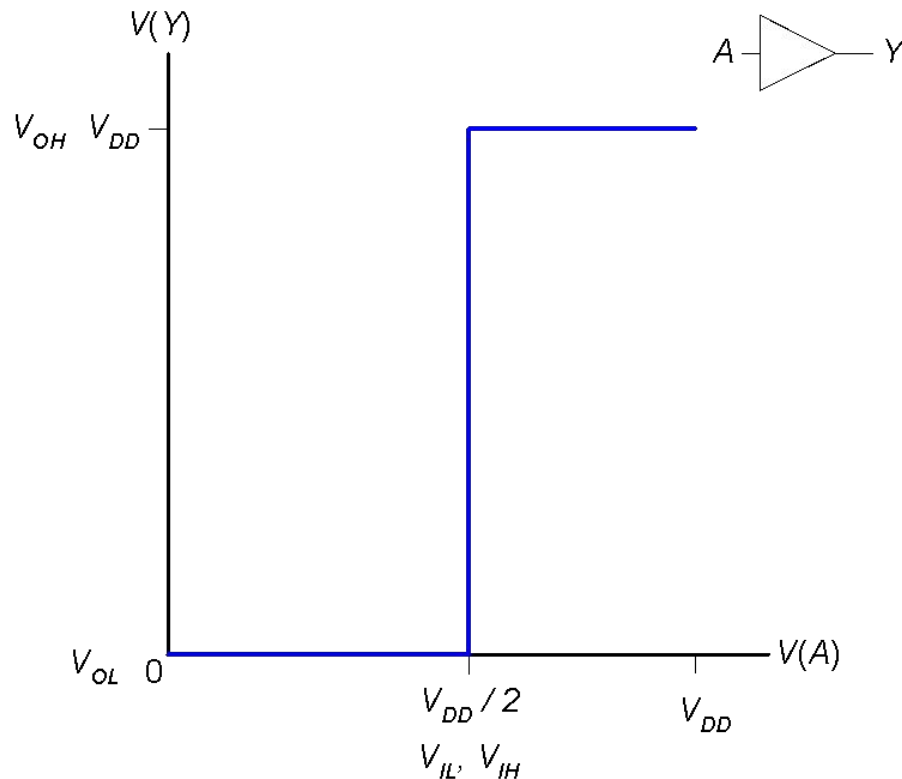


$$NM_H = V_{OH} - V_{IH}$$

$$NM_L = V_{IL} - V_{OL}$$

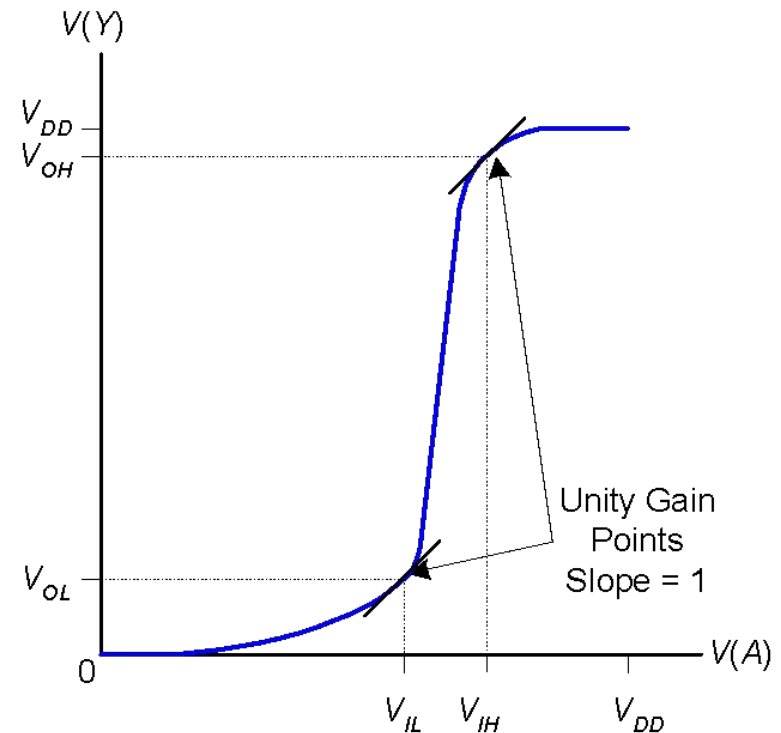
# Передаточная характеристика на постоянном токе

Идеальный буфер:



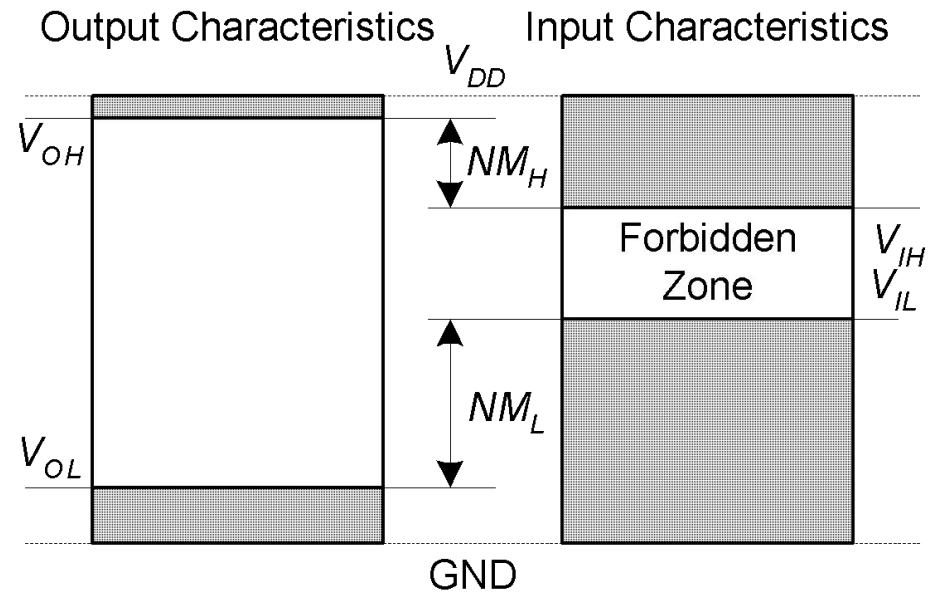
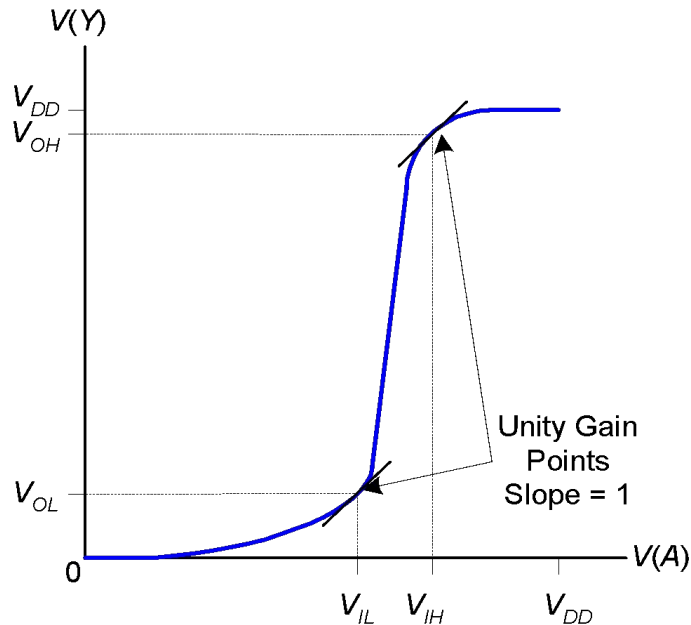
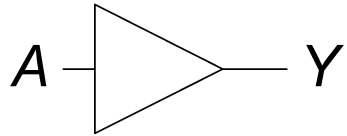
$$NM_H = NM_L = V_{DD}/2$$

Реальный буфер:



$$NM_H, NM_L < V_{DD}/2$$

# Передаточная характеристика на постоянном токе



# Изменение $V_{DD}$

- В 1970 и 1980 годы,  $V_{DD} = 5\text{ В}$
- В следующие годы  $V_{DD}$  уменьшается
  - Уменьшается нагрев транзисторов
  - Уменьшается энергопотребление
- 3.3 В, 2.5 В, 1.8 В, 1.5 В, 1.2 В, 1.0 В, ...
- При соединении микросхем с разными напряжениями питания нужно быть очень осторожным



Микросхемы работают, пока они содержат волшебный дым

Доказательство:

- Если волшебный дым покидает микросхему, она перестает работать

# Примеры логических

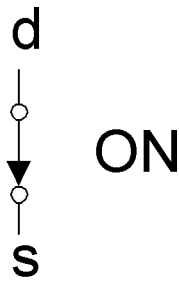
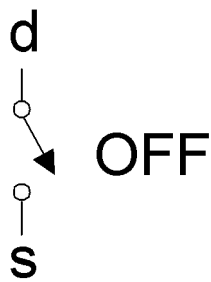
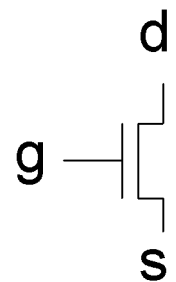
Логические семейства	$V_{DD}$	$V_{IL}$	$V_{IH}$	$V_{OL}$	$V_{OH}$
TTL	5 (4.75 - 5.25)	0.8	2.0	0.4	2.4
КМОП	5 (4.5 - 6)	1.35	3.15	0.33	3.84
LVTTL	3.3 (3 - 3.6)	0.8	2.0	0.4	2.4
LVC MOS	3.3 (3 - 3.6)	0.9	1.8	0.36	2.7

# Транзисторы

- Логические элементы состоят из транзисторов
- Трехходовый управляемый напряжением выключатель
  - Соединение двух входов зависит от напряжения на третьем
  - d и s соединены (ON) когда g равно 1

$g = 0$

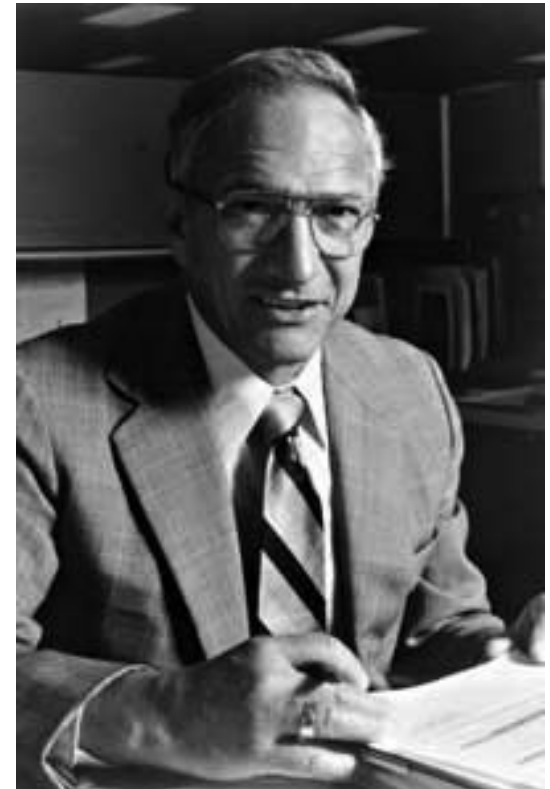
$g = 1$





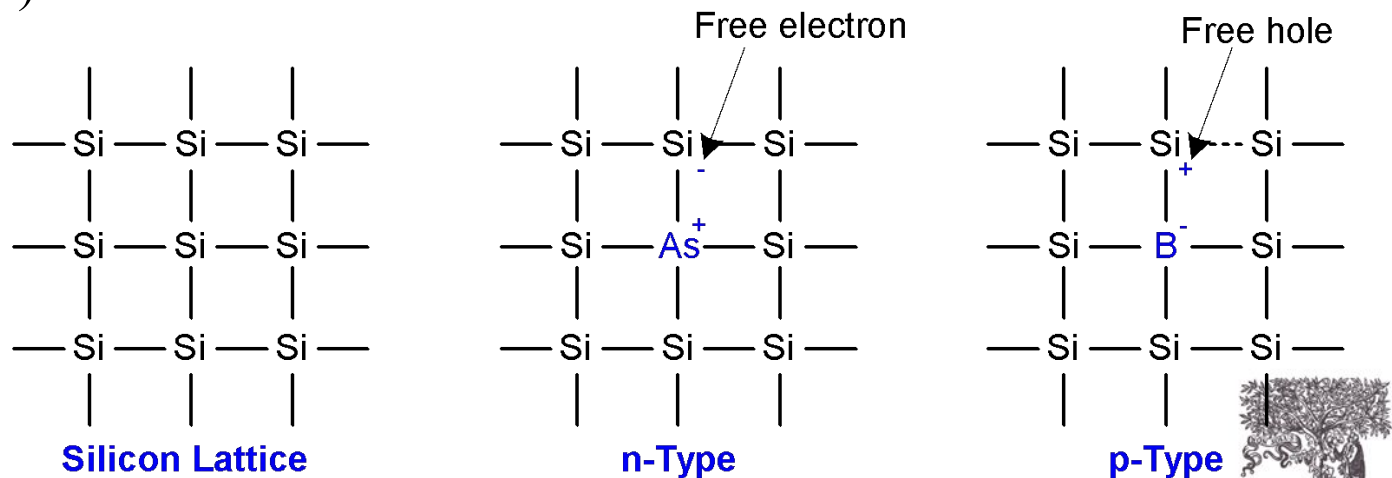
# Роберт Нойс, 1927-1990

- Прозвище - “Мэр Силиконовой долины”
- Со-основатель Fairchild Semiconductor в 1957 году
- Со-основатель Intel в 1968 году
- Одни из изобретателей интегральной микросхемы



# Кремний

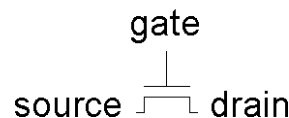
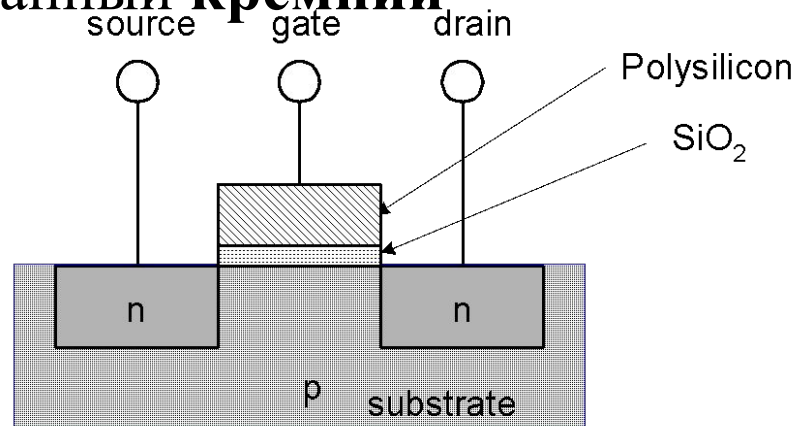
- Транзисторы создаются из полупроводникового материала, кремния
- Чистый кремний плохой проводник (свободные носители заряда отсутствуют)
- Легированный кремний хороший проводник (есть свободные носители заряда)
  - n-типа (свободные носители заряда отрицательные (*negative*), электроны)
  - p-типа (свободные носители заряда положительные (*positive*), дырки)



# МОП транзисторы

- **Метал-оксид-полупроводник (МОП) транзисторы:**

- Поликремниевый (используется как **метал**) затвор
- Оксидный (диоксид кремния) изолятор
- Легированный **кремний**

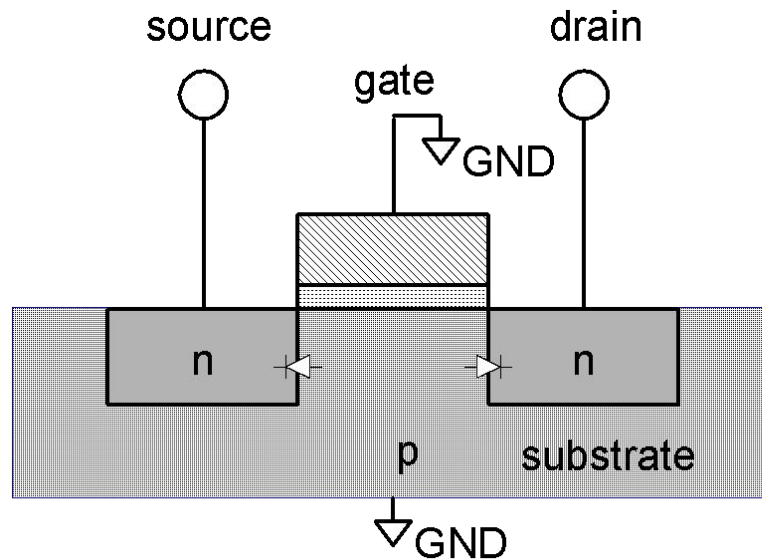


nMOS

# Транзисторы: n-MOP

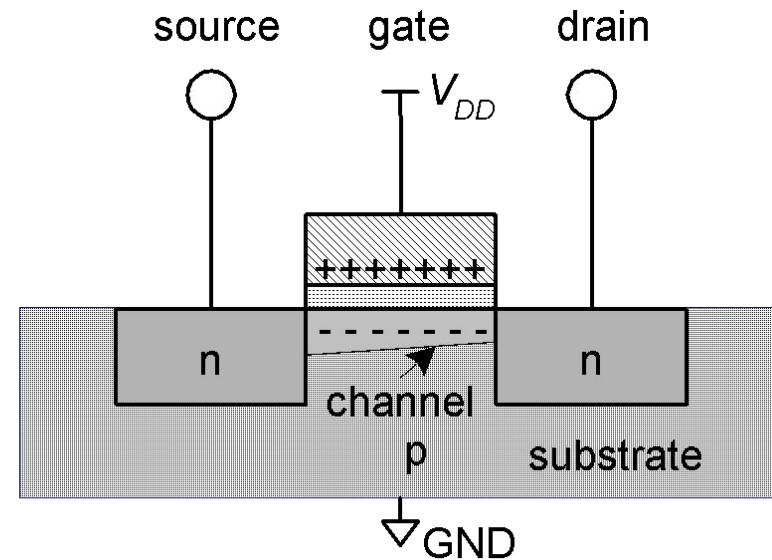
Gate = 0

OFF (исток и сток не соединены)



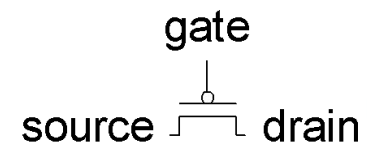
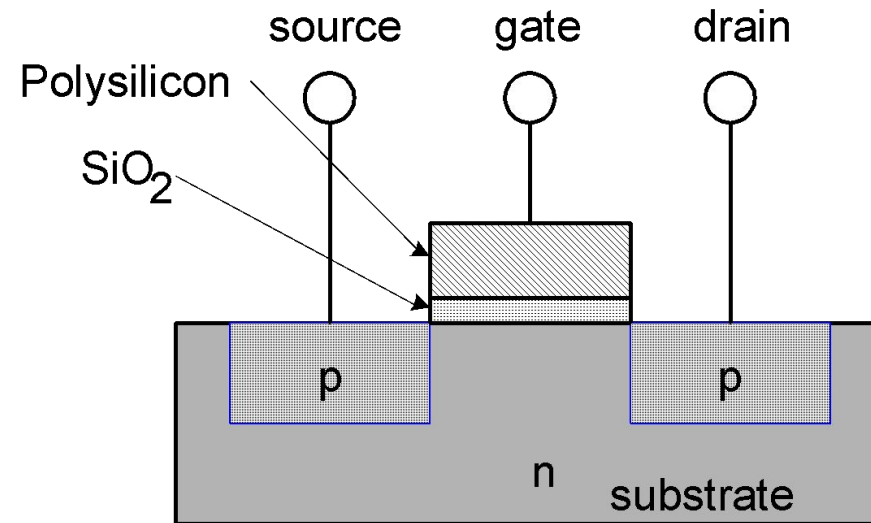
Gate = 1

ON (исток и сток соединены)

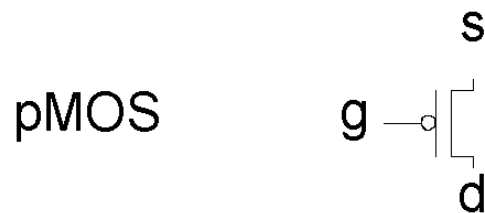
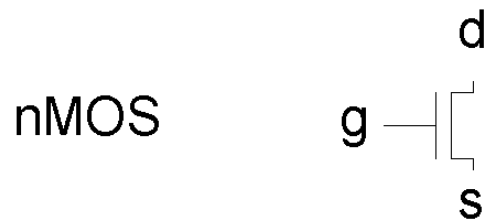


# Транзисторы: р-МОП

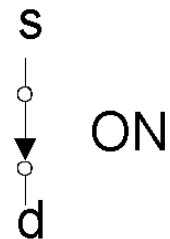
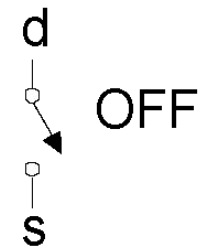
- р-МОП транзистор работает противоположным образом
  - ON, когда Gate = 0
  - OFF, когда Gate = 1



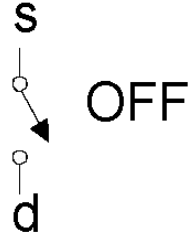
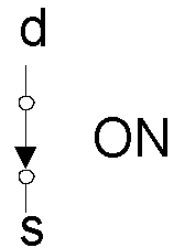
# Работа транзистора



$g = 0$

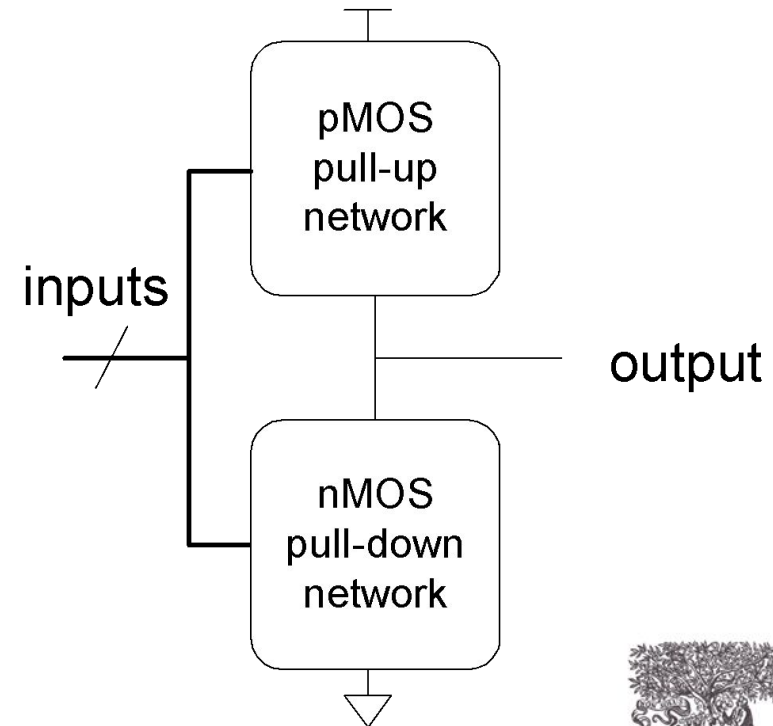


$g = 1$



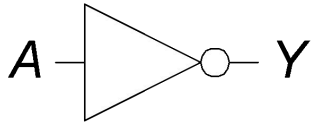
# Работа транзистора

- **n-МОП:** Хорошо передают 0, т.е. исток соединен с GND
- **p-МОП:** Хорошо передают 1, т.е. исток соединен с  $V_{DD}$



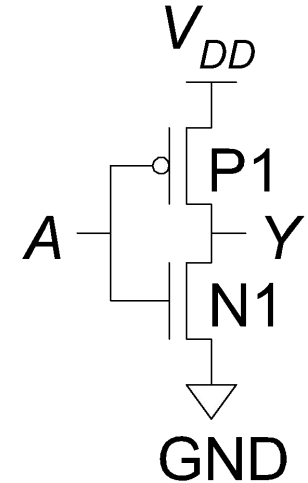
# Логические элементы КМОП: Логический элемент НЕ:

## NOT



$$Y = \overline{A}$$

A	Y
0	1
1	0

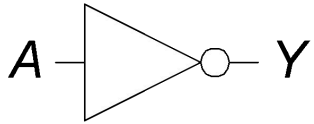


A	P1	N1	Y
0			
1			



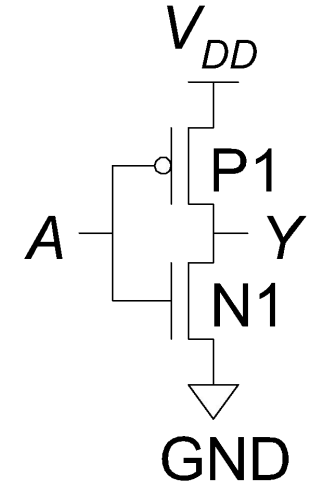
# Логические элементы КМОП: Логический элемент НЕ:

## NOT



$$Y = \overline{A}$$

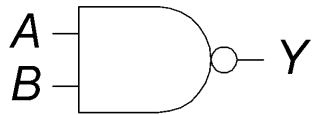
A	Y
0	1
1	0



A	P1	N1	Y
0	Вкл.	Выкл.	1
1	Выкл.	Вкл.	0

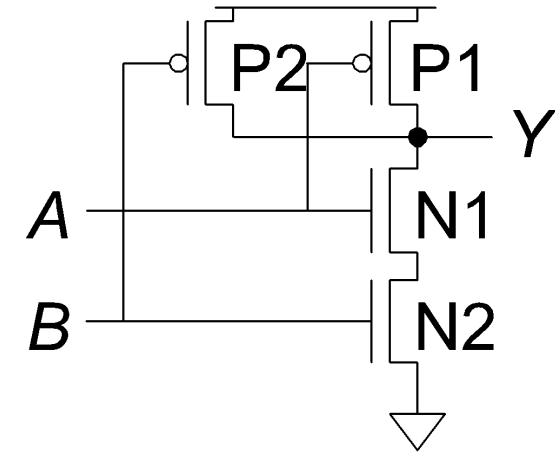
# Логические элементы КМОП: Логический элемент И-НЕ:

## NAND



$$Y = \overline{AB}$$

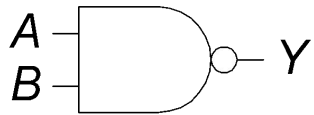
A	B	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0



A	B	P1	P2	N1	N2	Y
0	0					
0	1					
1	0					
1	1					

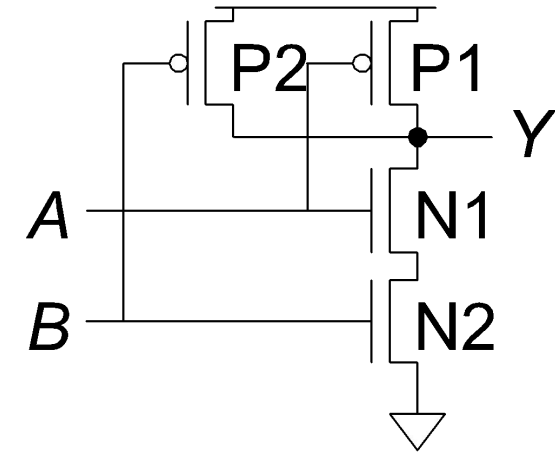
# Логические элементы КМОП: Логический элемент И-НЕ:

## NAND



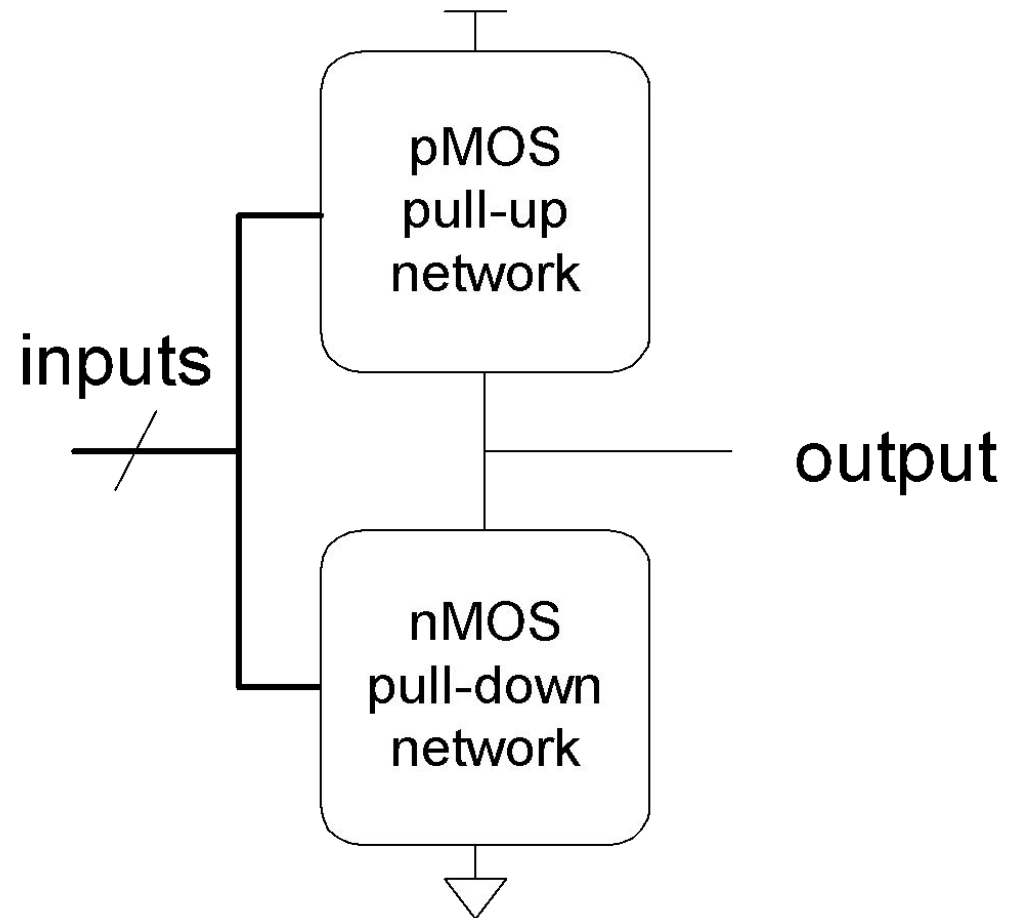
$$Y = \overline{AB}$$

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



A	B	P1	P2	N1	N2	Y
0	0	Вкл.	Вкл.	Выкл.	Выкл.	1
0	1	Вкл.	Выкл.	Выкл.	Вкл.	1
1	0	Выкл.	Вкл.	Вкл.	Выкл.	1
1	1	Выкл.	Выкл.	Вкл.	Вкл.	0

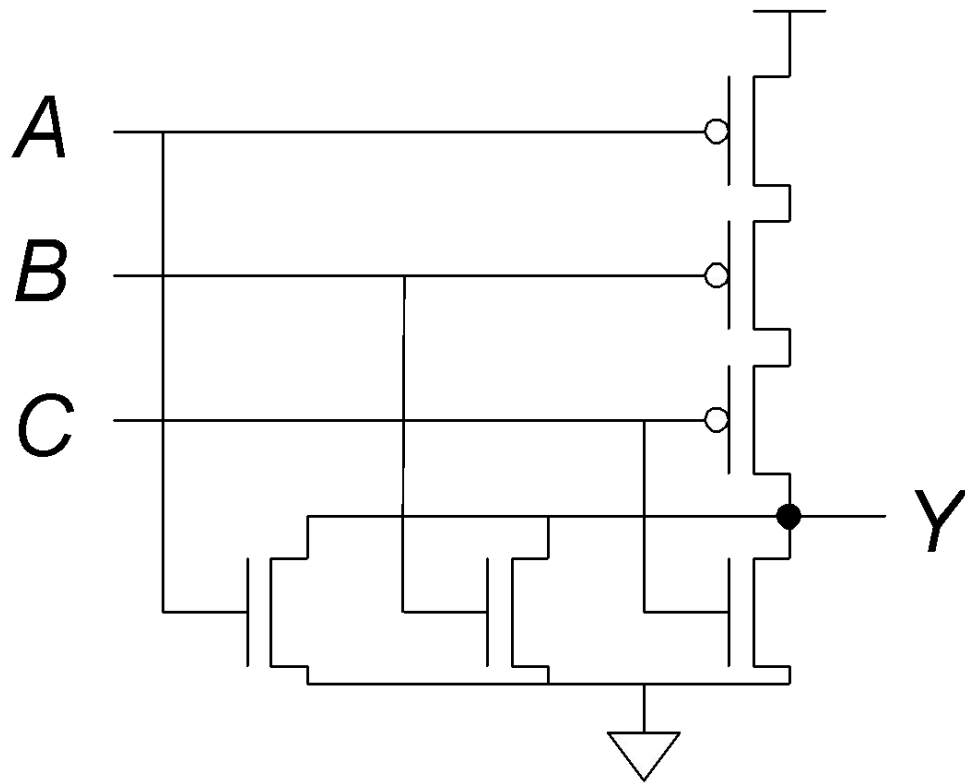
# Структура элемента КМОП



# Логический элемент ИЛИ-НЕ

Как построить элемент ИЛИ-НЕ?

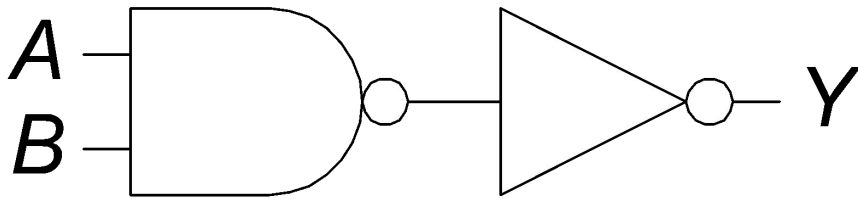
# Элемент ИЛИ-НЕ с тремя входами



# Другие элементы КМОП

Как построить элемент И с двумя входами?

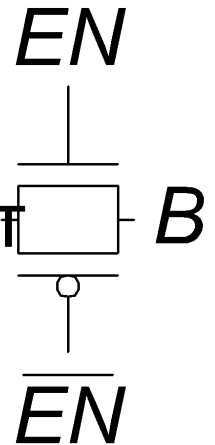
# Элемент И с двумя входами





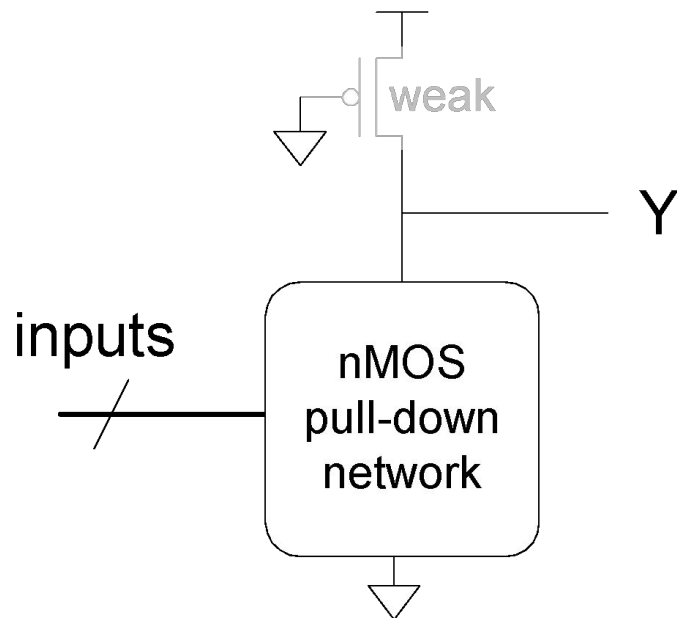
# Передаточный логический элемент

- n-МОП плохо передают 1
- p-МОП плохо передают 0
- Передаточный логический элемент — лучший выключатель
  - хорошо передает и 0 и 1
- Когда  $EN = 1$ , выключатель замкнут (ON):
  - $EN = 1$  и  $A$  соединен с  $B$
- Когда  $EN = 0$ , выключатель разомкнут (OFF):
  - $A$  и  $B$  не соединены



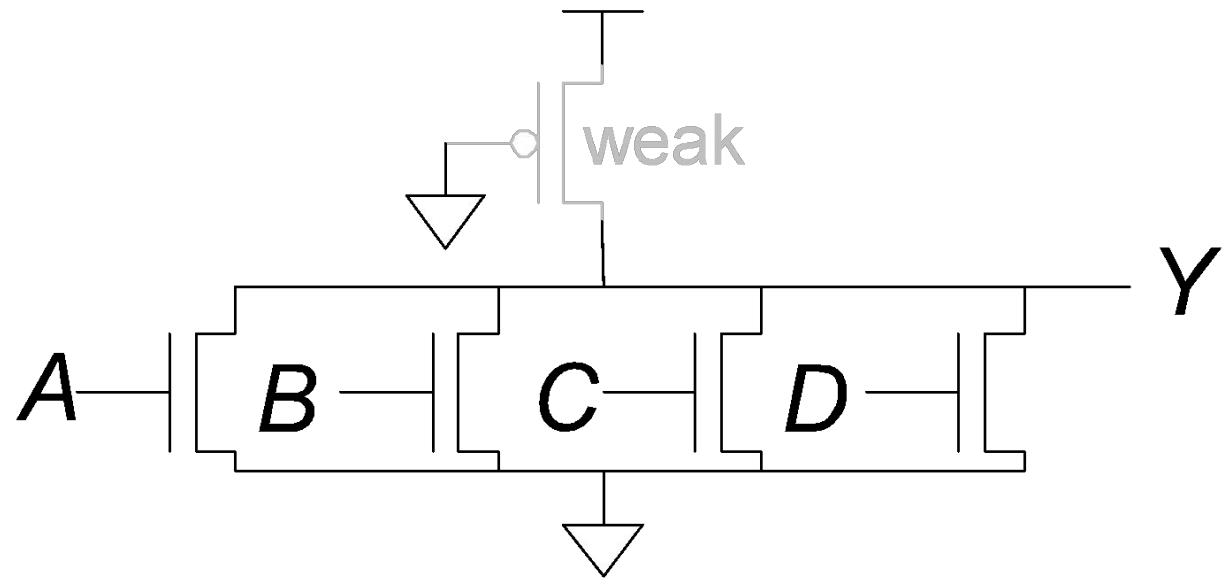
# Элементы Псевдо-n-МОП

- Заменить подтягивающую цепь слабым всегда включенным р-МОП транзистором
- р-МОП транзистор: подтягивает выход к высокому напряжению, только если n-МОП цепь не тянет его к низкому напряжению



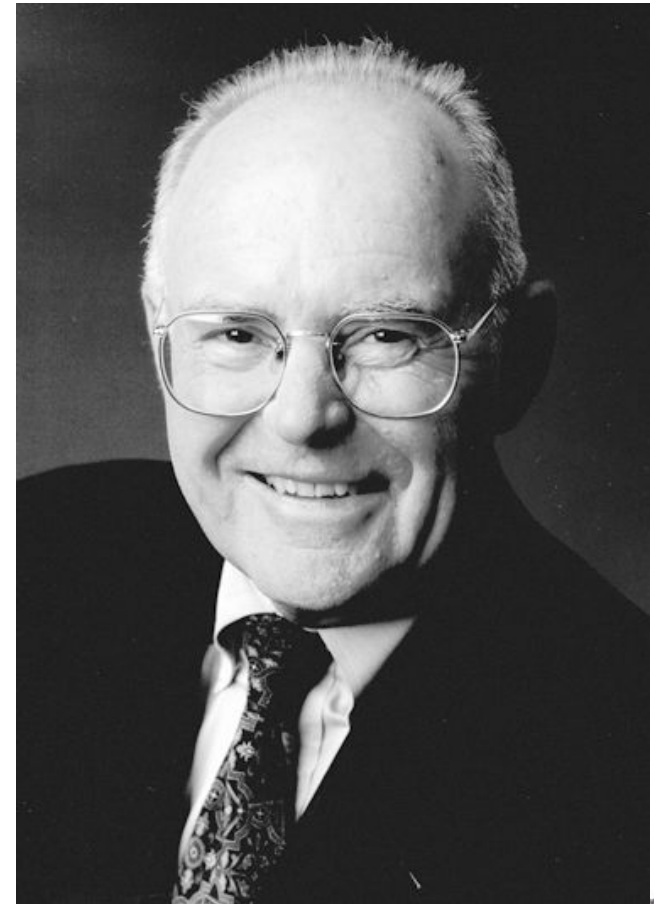
# Пример элемента Псевдо-n-МОП

## Псевдо-n-МОП элемент **NOR4**

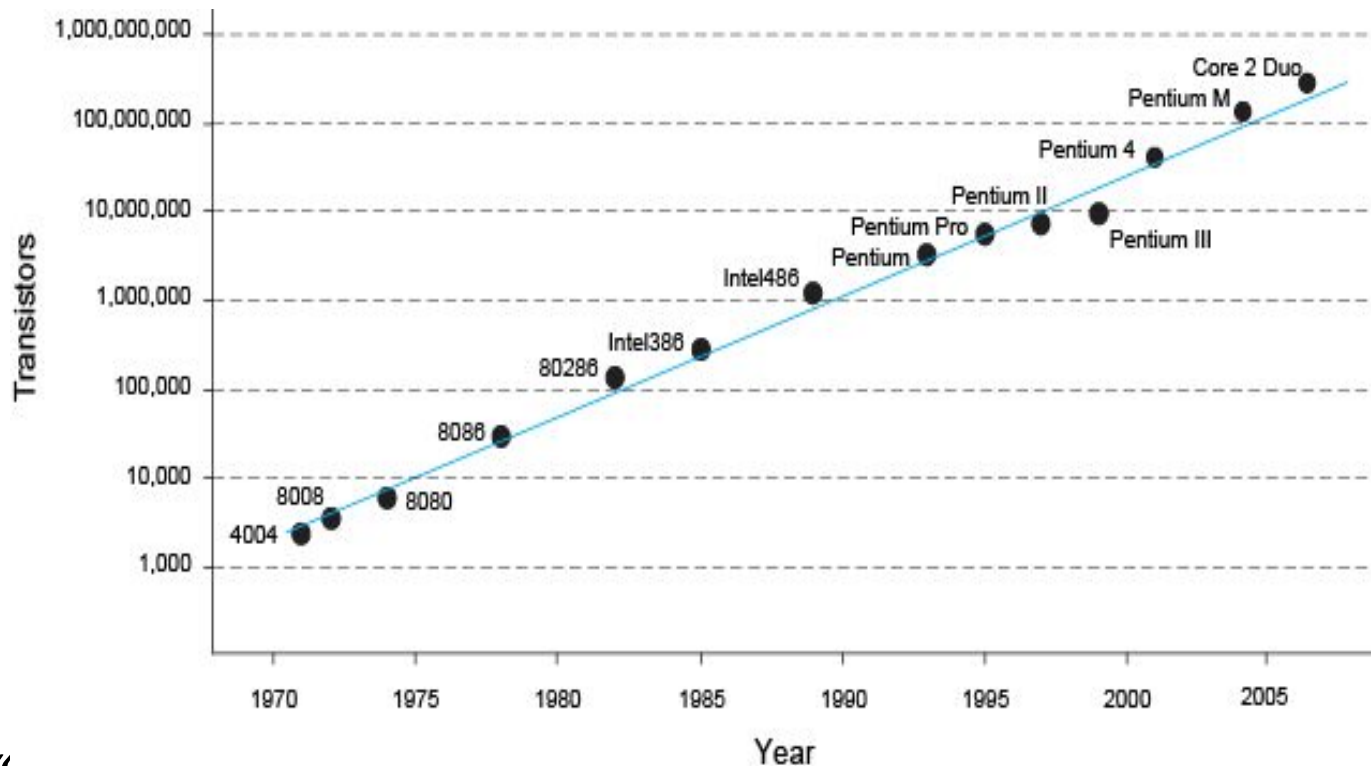


# Гордон Мур, 1929-

- Со-основатель (вместе с Робертом Нойсом) Intel в 1968 году
- **Закон Мура:** количество транзисторов на микросхеме удваивается каждый год (наблюдался в 1965 году)
- С 1975 года количество транзисторов удваивается каждые два года



# Закон Мура:



- “Если автомобильная промышленность поочинялась бы такому же циклу развития, как и компьютерная, Rolls-Royce стоил бы сейчас \$100, на одном галлоне бензина проезжал бы миллион миль и взрывался бы раз в году...”

— Robert Cringley

# Энергопотребление

- Мощность = Потребление энергии в единицу времени
  - Динамическая потребляемая мощность
  - Статическая потребляемая мощность

- **Мощность идет на зарядку емкостей затворов транзисторов**
  - Для зарядки конденсатора емкостью  $C$  до напряжения  $V_{DD}$  необходима энергия  $CV_{DD}^2$
  - Ток переключается с частотой  $f$ : транзистор переключается (от 0 в 1 или наоборот) с такой частотой
  - Конденсатор заряжается  $f/2$  раз за секунду (разрядка из 1 в 0 не требует энергии)
- Динамическая потребляемая мощность:

# Статическая потребляемая

## мощности

- Мощность, потребляемая, когда элементы не переключаются
- Обусловлена *токами покоя (токами утечки)*,  $I_{DD}$
- Статическая потребляемая мощность:

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



# Пример оценки

- Оцените мощность, потребляемую беспроводным переносным компьютером
  - $V_{DD} = 1.2 \text{ В}$
  - $C = 20 \text{ нФ}$
  - $f = 1 \text{ ГГц}$
  - $I_{DD} = 20 \text{ мА}$

# Пример оценки

- Оцените мощность, потребляемую беспроводным переносным компьютером

- $V_{DD} = 1.2 \text{ В}$

- $C = 20 \text{ нФ}$

- $f = 1 \text{ ГГц}$

- $I_{DD} = 20 \text{ мА}$

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2} C V_{DD}^2 f + I_{DD} V_{DD} \\ &= \frac{1}{2} (20 \text{ нФ}) (1.2 \text{ В})^2 (1 \text{ ГГц}) + \\ &\quad (20 \text{ мА}) (1.2 \text{ В}) \\ &= \mathbf{14.4 \text{ W}} \end{aligned}$$