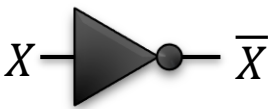
PROJETOS DIGITAIS E MICROPROCESSADORES
TRANSISTORES CMOS

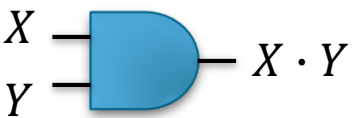
Marco A. Zanata Alves

PORTAS LÓGICAS

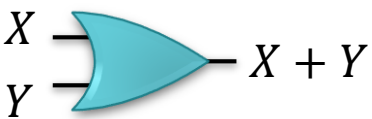
Afinal, como essas portas são construídas em um nível mais baixo?



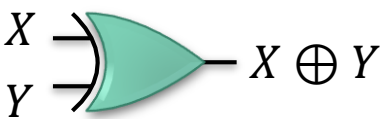
Porta **not**



Porta **and**



Porta **or**



Porta **xor**

INTRODUÇÃO SOBRE TRANSISTORES

Os tipos de transistores mais utilizados são do tipo TTL e CMOS.

Os transistores do tipo CMOS são os mais utilizados em circuitos digitais.

Esses transistores CMOS são implementados com semicondutores (ex. silício).

Os semicondutores dependendo da circunstância se comportam como isolantes ou condutores.

Semicondutores podem ser utilizados para implementar chaves (ON/OFF). Tais chaves podem ser controladas por circuitos digitais.

INTRODUÇÃO SOBRE TRANSISTORES

CMOS significa *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*

O "complementary" em seu nome vem do fato dessa tecnologia utilizar dois tipos de transistores MOSFET.

MOSFET de canal N ou P, de tal modo que um deles "complementa" o outro na necessidade de se produzir funções lógicas.

MOSFET significa *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*

Esse é o tipo mais comum de transístores de efeito de campo.

BREVE PASSEIO PELO REINO DA QUÍMICA

ÁTOMO

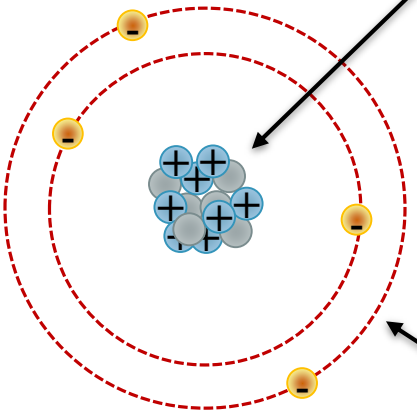
Prótons possuem carga **positiva**

Elétrons possuem carga **negativa**

A **perda ou ganho de elétrons,** por parte de um átomo irá transformá-lo num **íon** positivo ou negativo.

Quando um átomo **ganha** elétrons, ele se torna um **íon negativo,** também chamado **ânion.**

Quando um átomo **perde** elétrons, ele se torna um **íon positivo,** também chamado **cátion.**



Núcleo
Formado por prótons e nêutrons

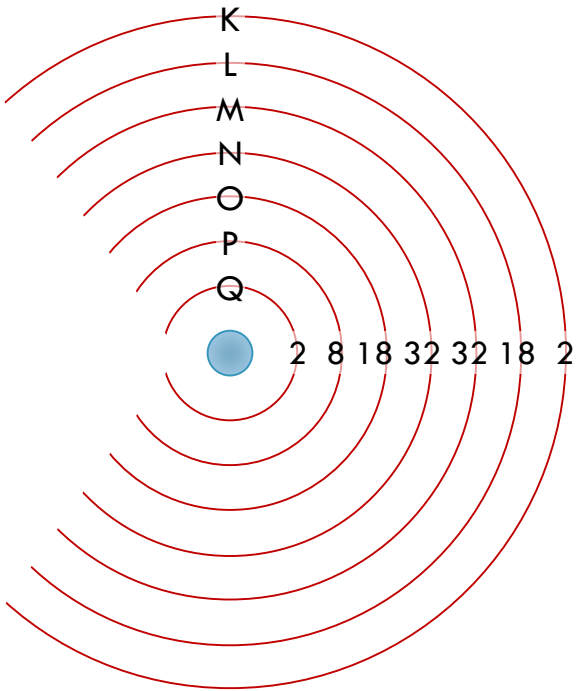
Eletrosfera
Formada por elétrons distribuídos em várias camadas

ELÉTRONS

As órbitas eletrônicas de todos os átomos conhecidos se agrupam em 7 camadas eletrônicas e 4 subníveis {2,6,10,14}.

Um átomo adquire estabilidade quando possui 8 elétrons na camada eletrônica mais externa, ou 2 elétrons quando possui apenas a camada *K*.

Daí surge o nome **camada de valência**, última camada eletrônica de um átomo.



UNIÃO DE ÁTOMOS

Quando dois átomos vão se unir, eles "**trocam elétrons entre si**" ou "**usam elétrons em parceria**"

O objetivo é atingir a configuração eletrônica de um gás nobre. Com 8 elétrons na camada de valência.

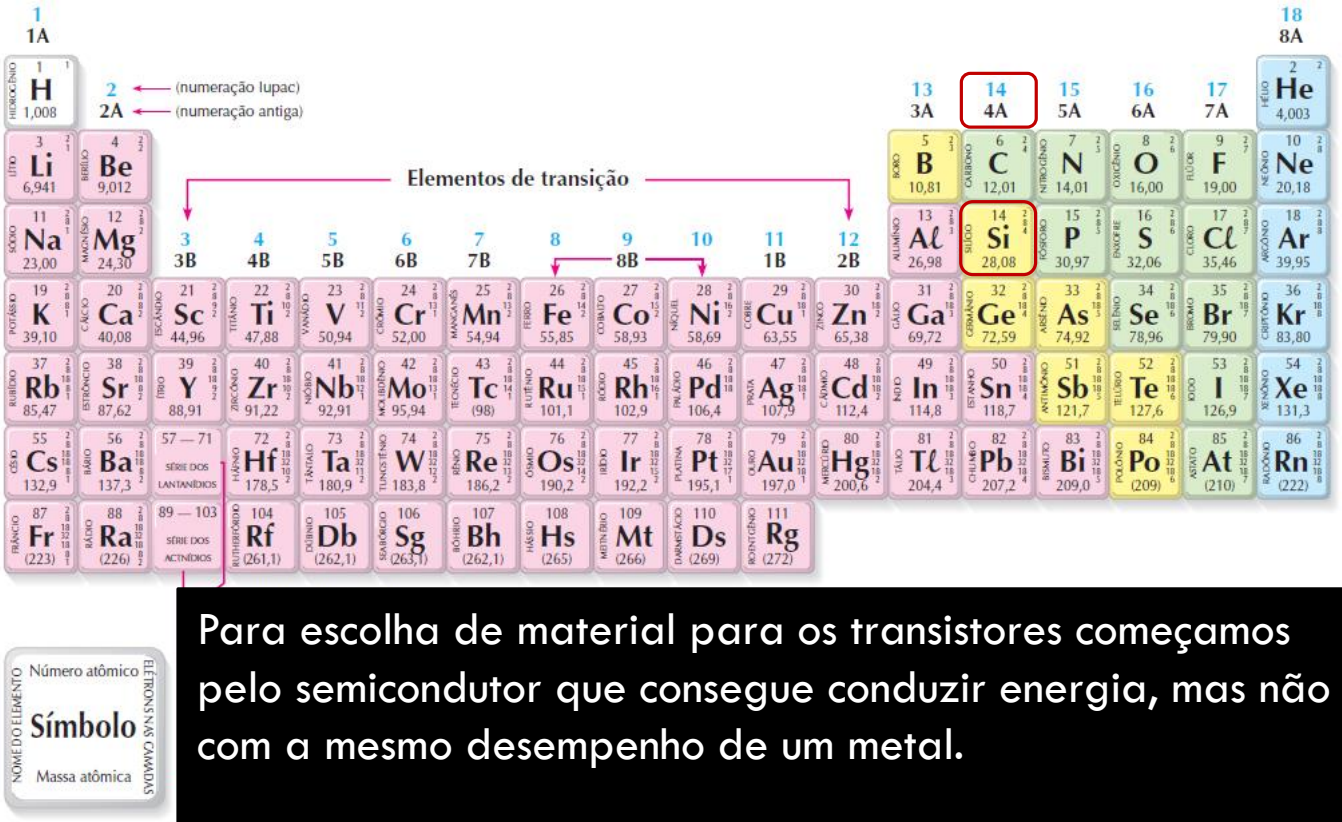
Surgem daí os três tipos comuns de ligação química:

Ligação iônica: é a força que mantém os íons unidos, depois que um átomo cede definitivamente um, dois ou mais elétrons para outro átomo.

Ligação covalente: é a união entre átomos que compartilham elétrons entre sí.

Ligação metálica: é o agrupamento entre átomos estabelecida através de uma grande quantidade de elétrons livres.

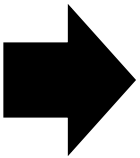
ESCOLHA DO MATERIAL PARA O CORPO

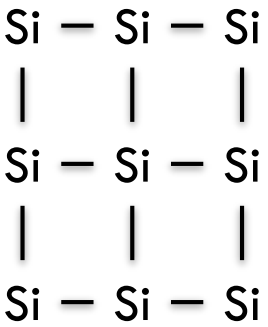


Para escolha de material para os transistores começamos pelo semicondutor que consegue conduzir energia, mas não com a mesmo desempenho de um metal.

MATERIAIS USADOS EM TRANSISTORES

Semimetal (semicondutor)
Possúi 4 elétrons na camada de valência





Tendência de ser Isolante, pois costuma atingir estabilidade (sem elétrons ou buracos soltos)

MATERIAIS USADOS EM TRANSISTORES

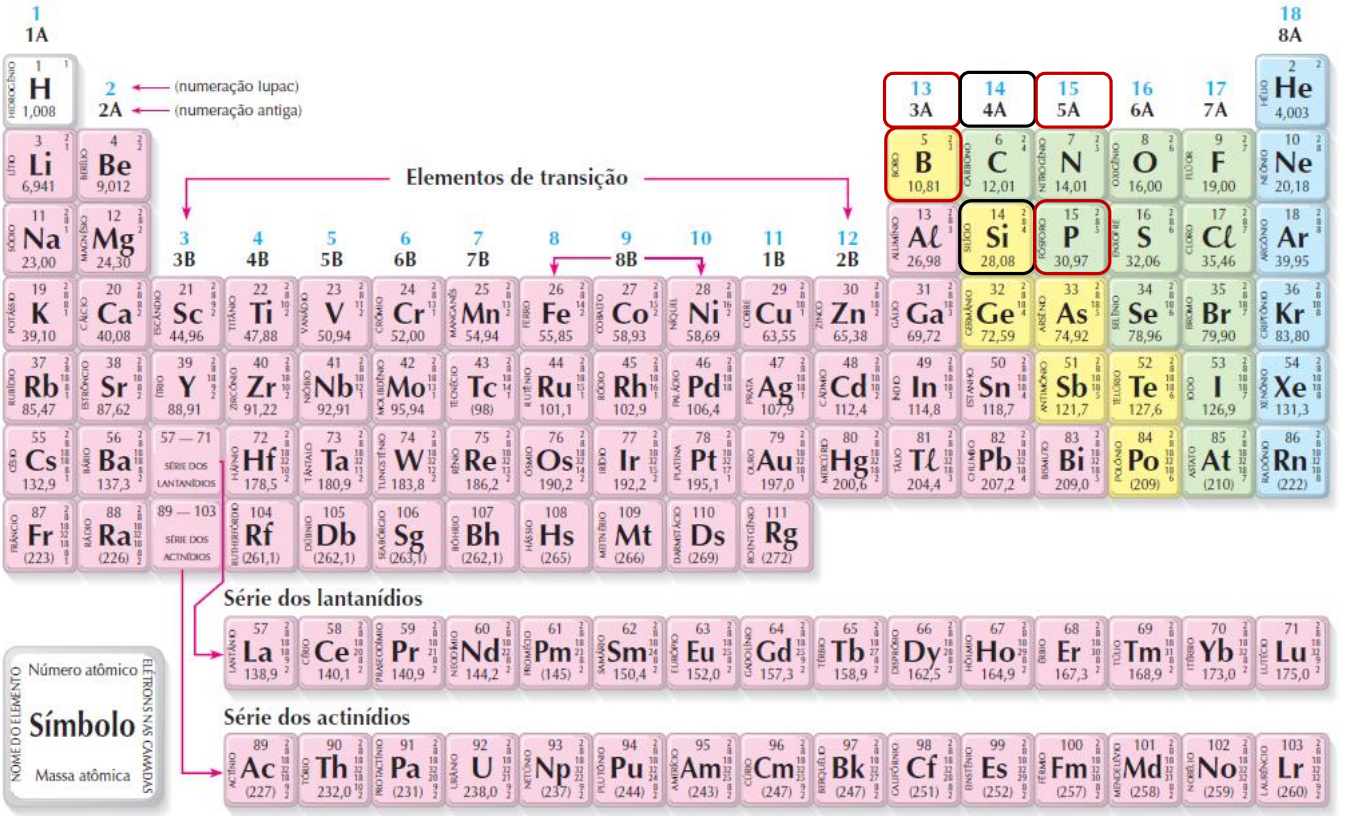
Depois, escolhemos os dopantes (materiais para aumentar a performance)

Dopantes com estruturas parecidas são preferidos, pois assim eles se encaixam melhor na estrutura do semicondutor.

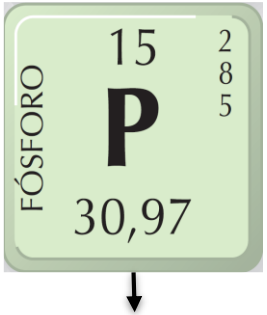
Dopantes vão deixar o material ricos em elétrons ou buracos (falta de elétrons)

Esses elétrons ou buracos soltos podem se mover pela estrutura.

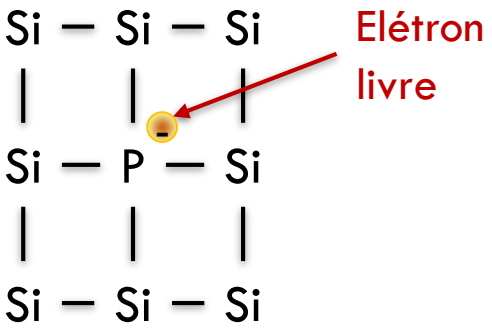
ESCOLHA DO MATERIAL DOPANTE



MATERIAIS DOPANTES

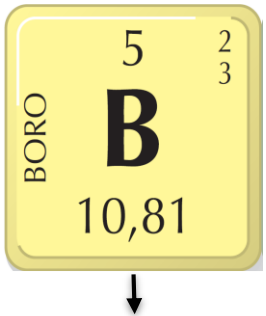


Não metal
Possúi 5 elétrons na camada de valência

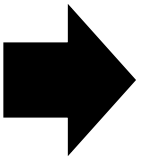


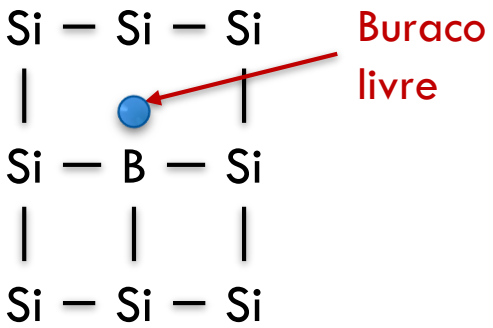
A estrutura atinge estabilidade e fica com **elétrons sobrando (-)**

MATERIAIS DOPANTES



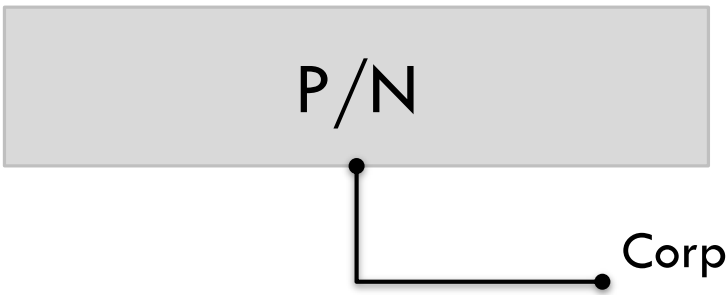
Semimetal
Possúi 3 elétrons na camada de valência





A estrutura atinge estabilidade e fica com **falta de elétrons, ou seja um buraco sobrando (+)**

MATERIAIS USADOS EM TRANSISTORES COMPLEMENTARY M+O+S



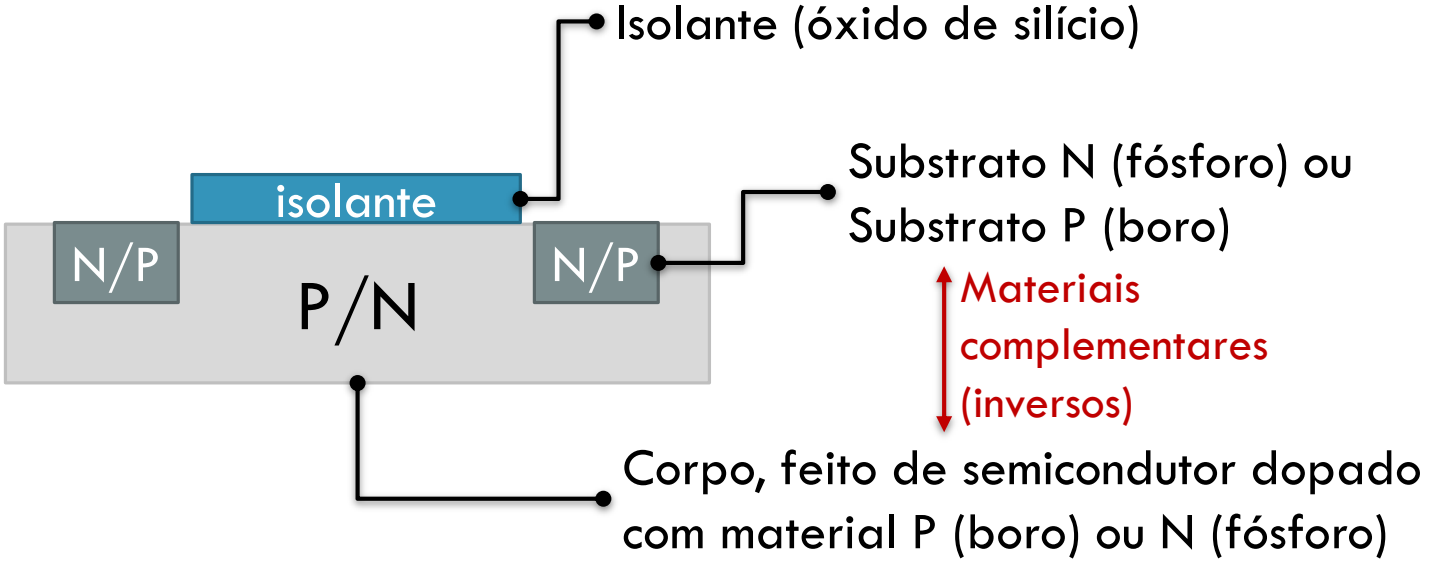
MATERIAIS USADOS EM TRANSISTORES COMPLEMENTARY M+O+S

Substrato N (fósforo) ou
Substrato P (boro)

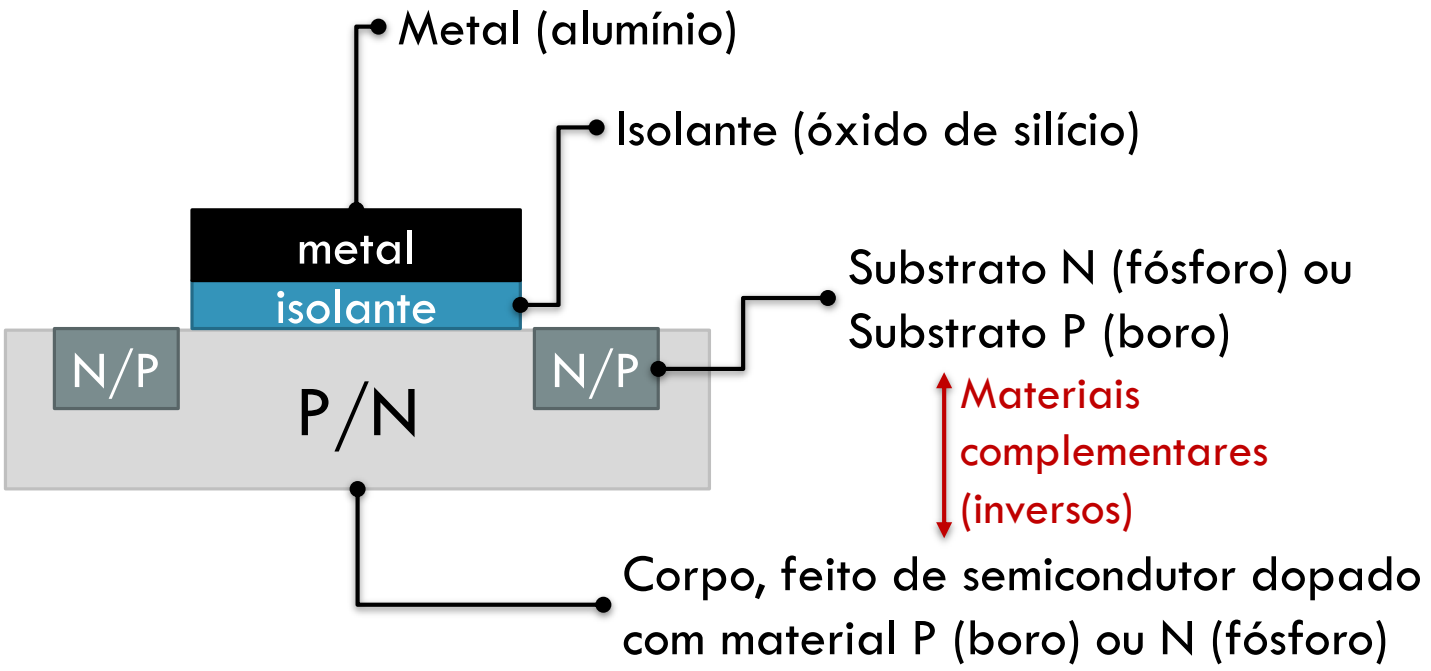
Materiais complementares (inversos)

Corpo, feito de semicondutor dopado com material P (boro) ou N (fósforo)

MATERIAIS USADOS EM TRANSISTORES COMPLEMENTARY M+O+S



MATERIAIS USADOS EM TRANSISTORES COMPLEMENTARY M+O+S



MOSFET

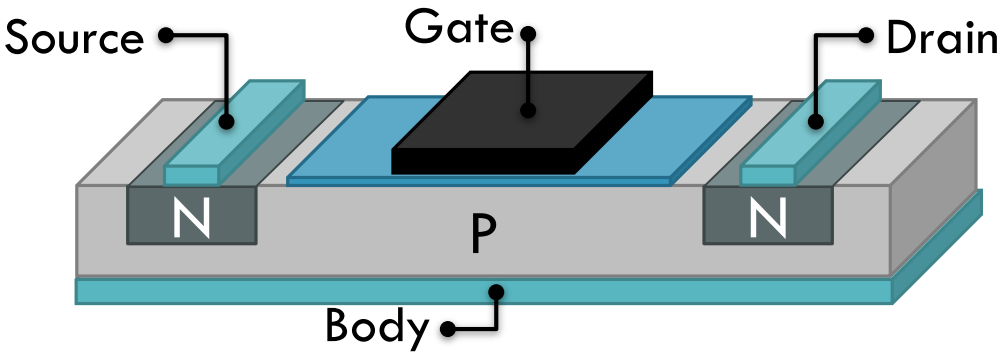
MOSFET

O MOSFET é composto de um material semicondutor no Source e Drain.

Se o source/drain for de material tipo N, ele é chamado de nMOS

Caso seja feito de material tipo P, ele se chamará pMOS

O MOSFET possui quatro terminais: Dreno (Drain), Fonte (Source), Porta (Gate), Substrato (Body)

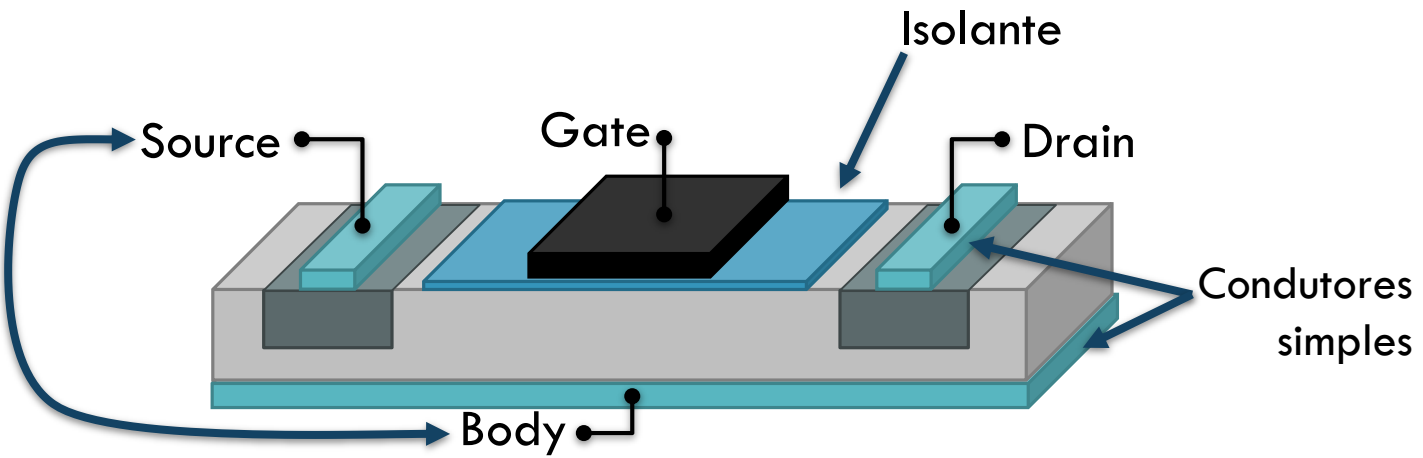


MOSFET

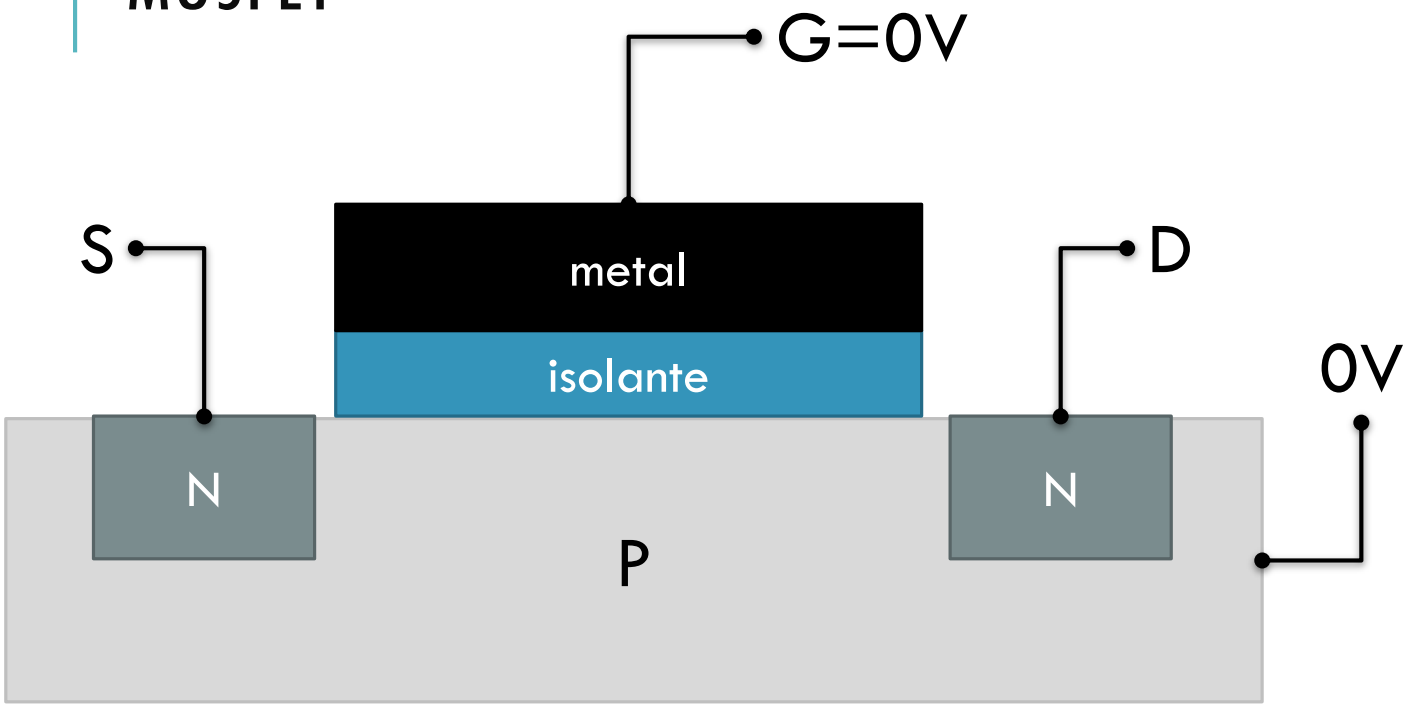
Normalmente os terminais Body e o Source estão conectados entre si.

Assim, apenas 3 terminais estão disponíveis (Source, Gate, Drain)

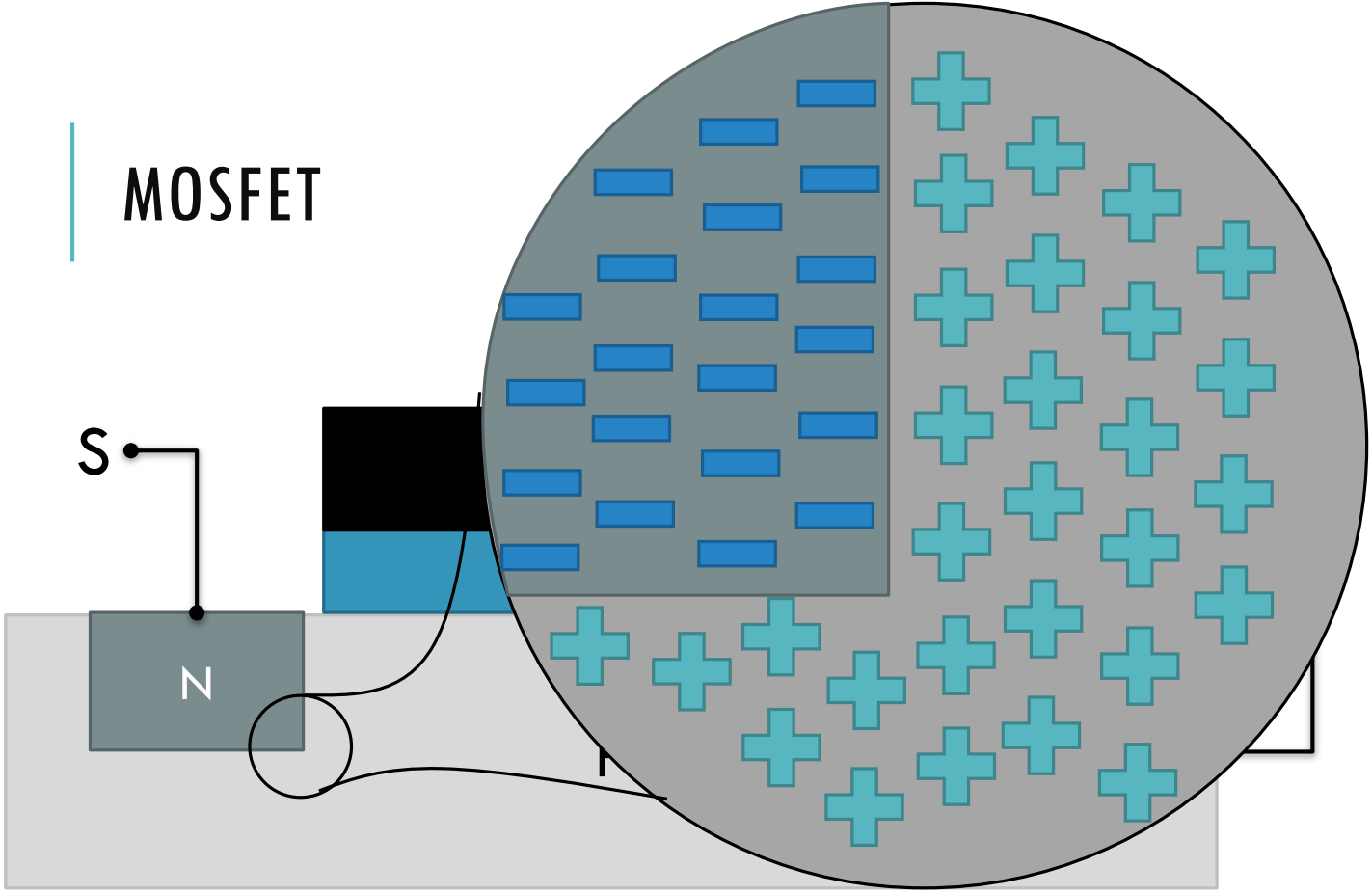
O Gate é separado do resto por uma camada isolante (azul)



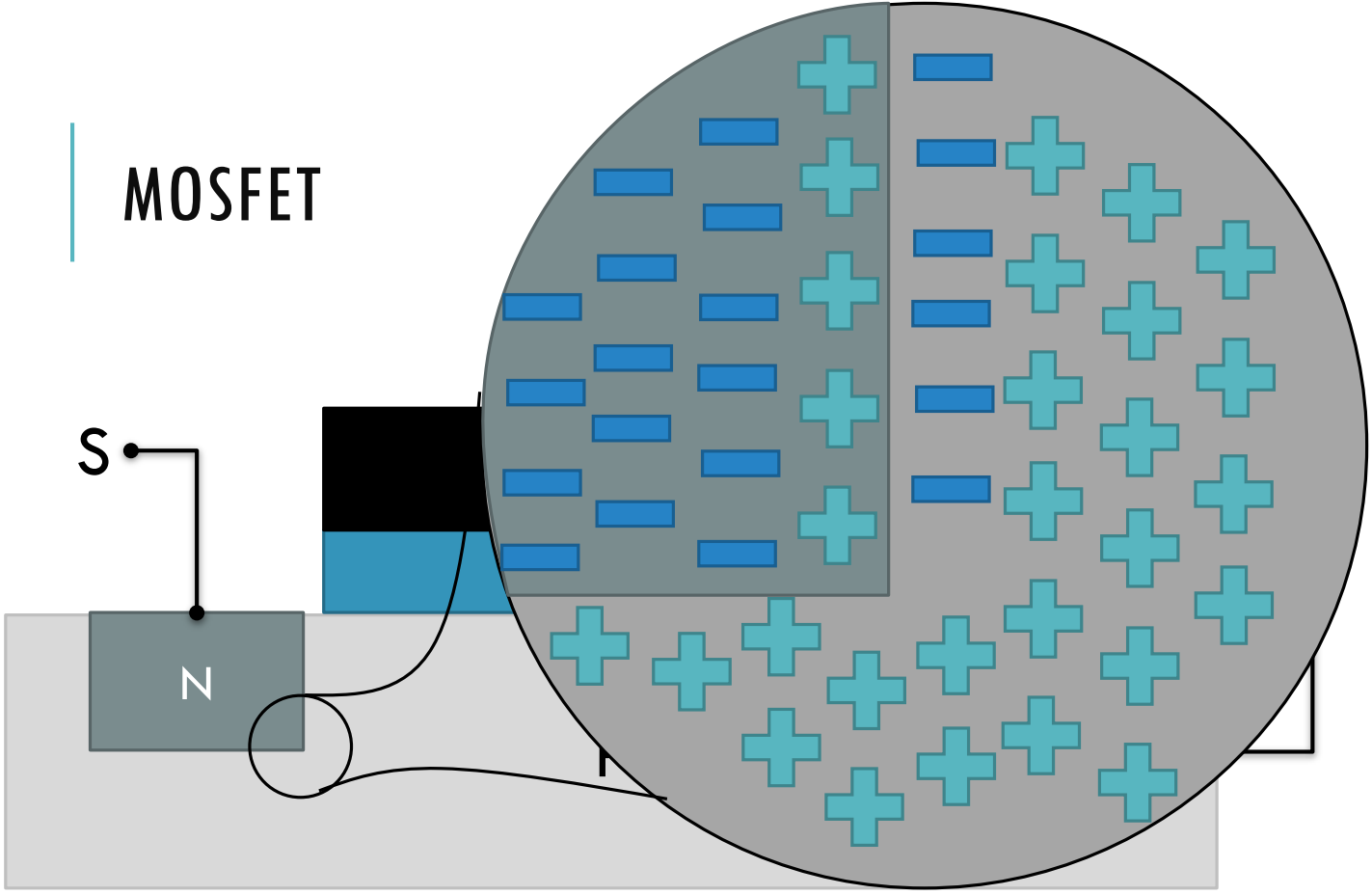
MOSFET



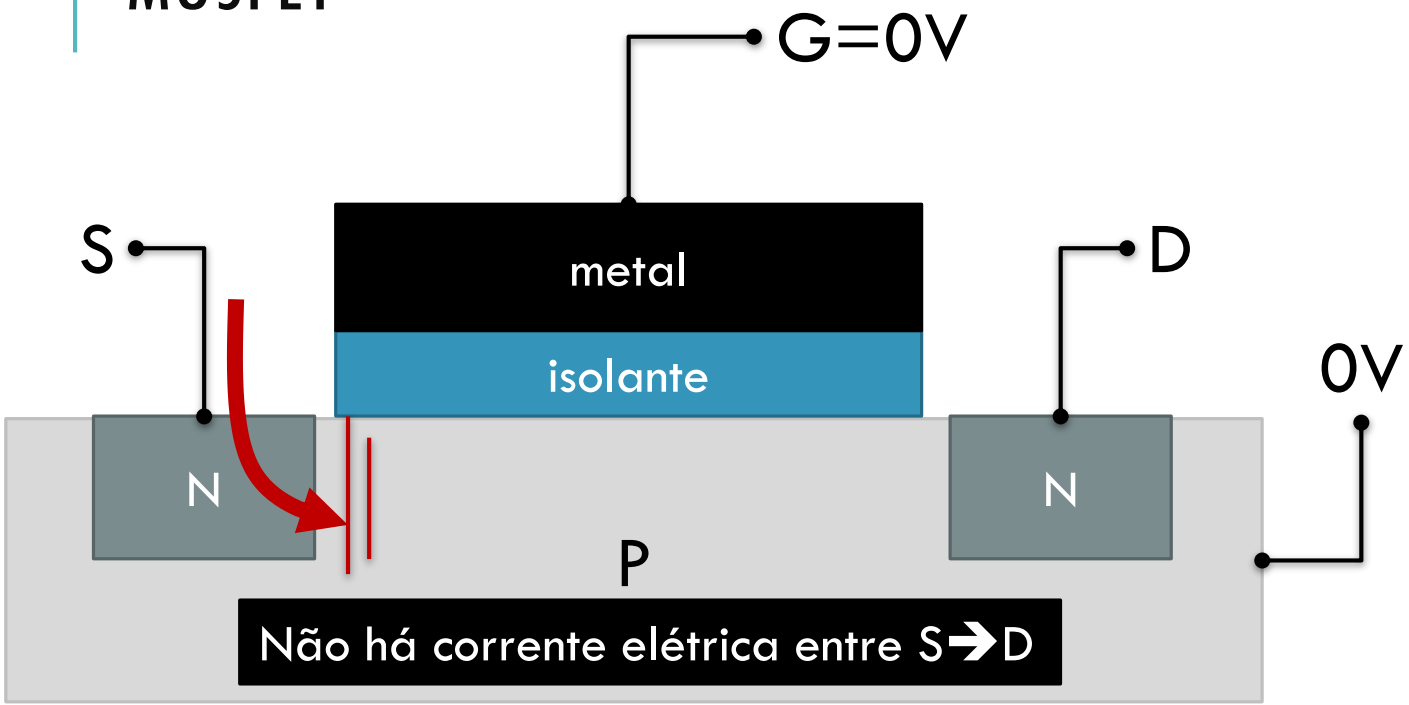
MOSFET



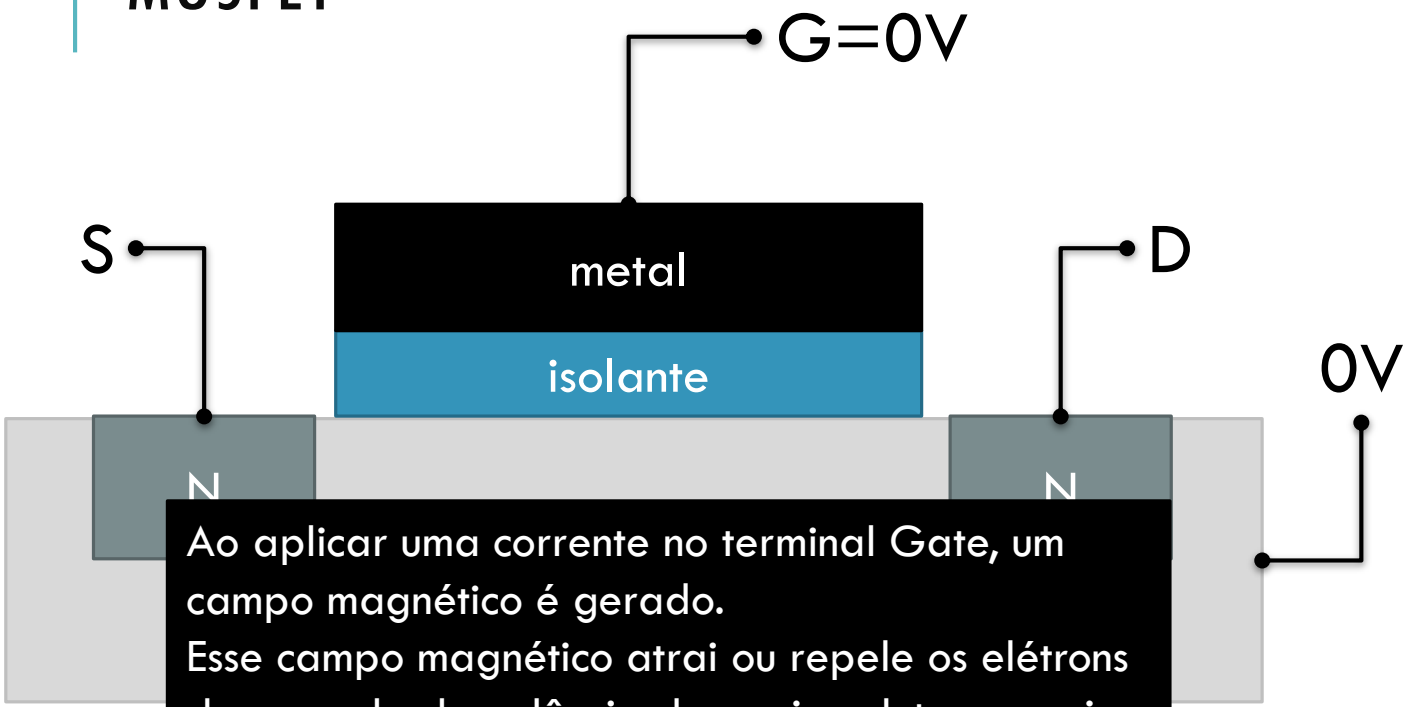
MOSFET



MOSFET

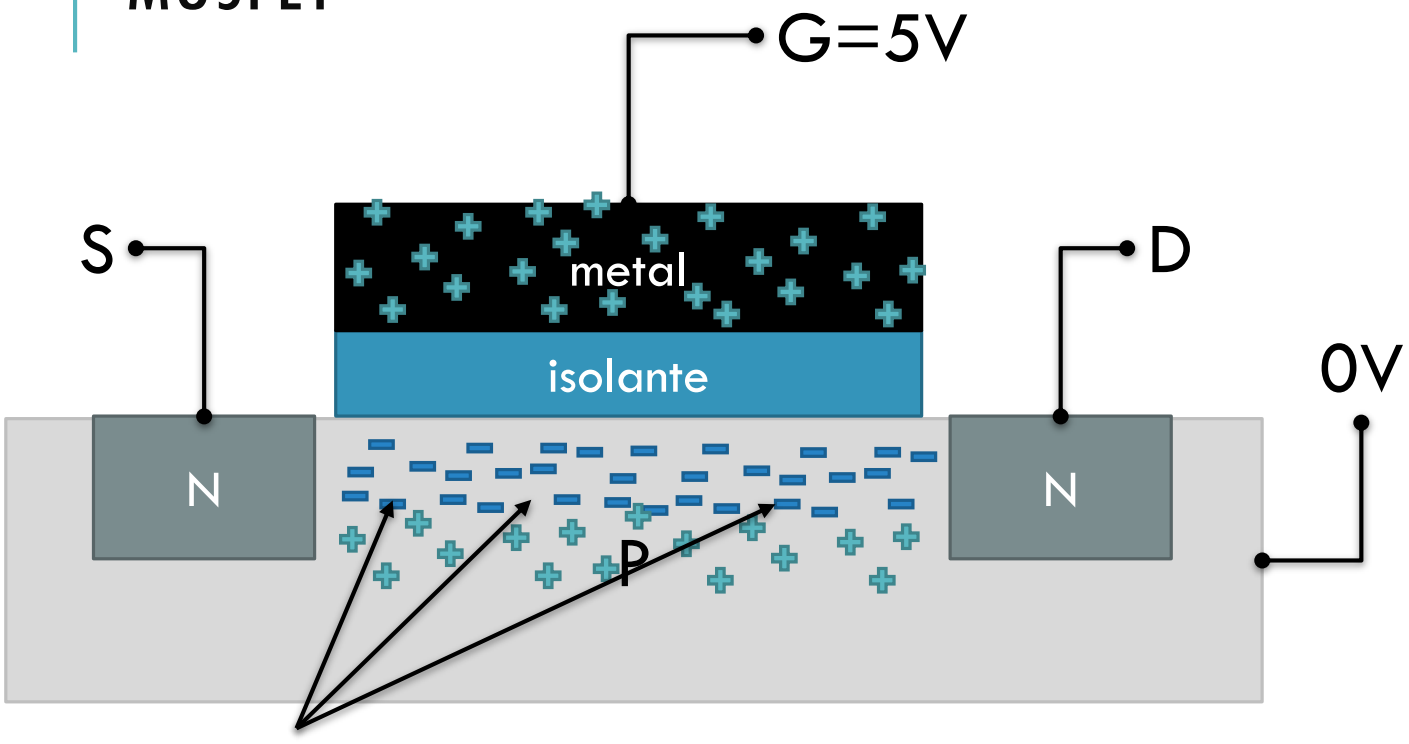

G=0V
S
metal
isolante
D
0V
N
N
P
Não há corrente elétrica entre S→D

MOSFET



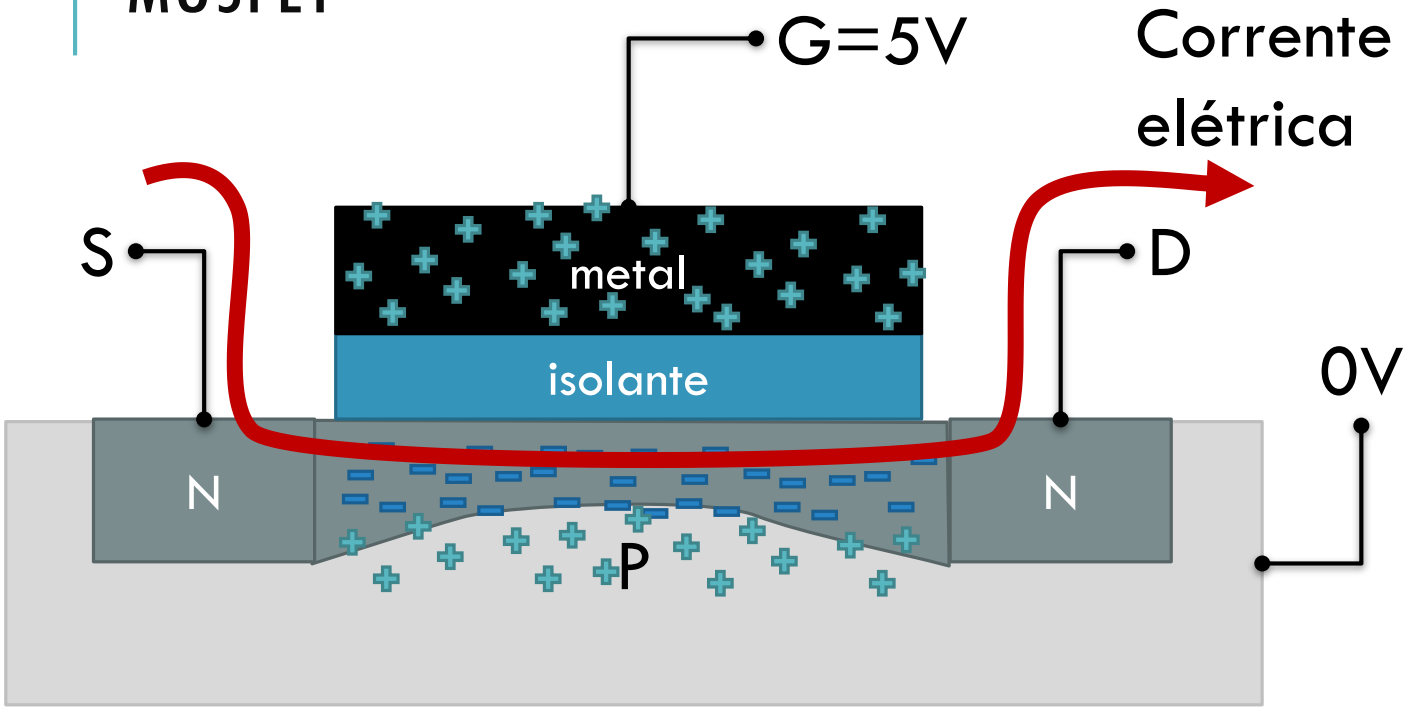
Ao aplicar uma corrente no terminal Gate, um campo magnético é gerado.
Esse campo magnético atrai ou repele os elétrons da camada de valência do semicondutor, ou seja, as partículas que carregam carga elétrica na região entre os terminais Source e Drain.

MOSFET



Canal negativo se forma

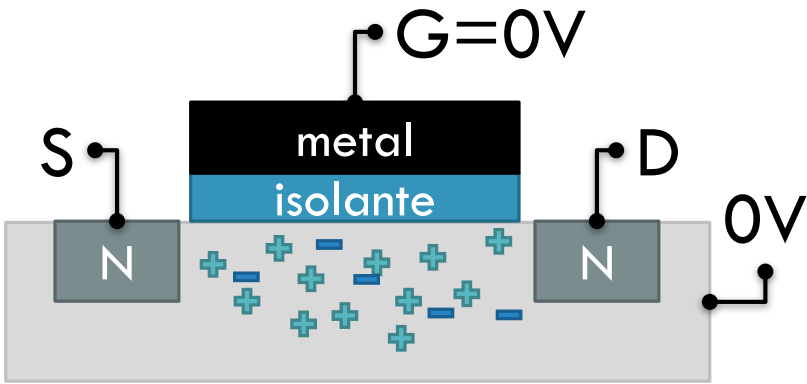
MOSFET



MOSFET TIPO N

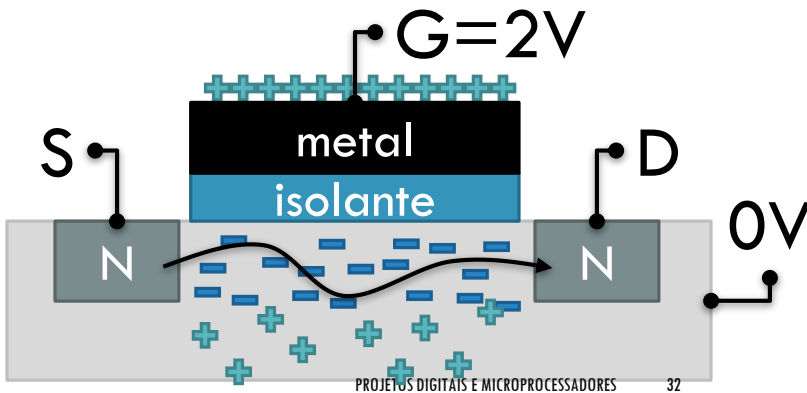
Se Gate em 0 Volt (lógico 0)

- Não há corrente entre Source e Drain
- Chave aberta



Se Gate em 2 Volts (lógico 1)

- Há corrente entre Source e Drain
- Chave fechada

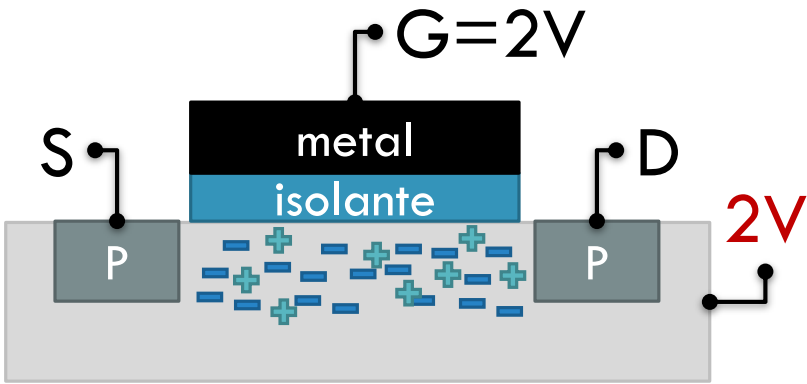


MOSFET TIPO P

Tipo P funciona de forma análoga invertendo as cargas e polaridade

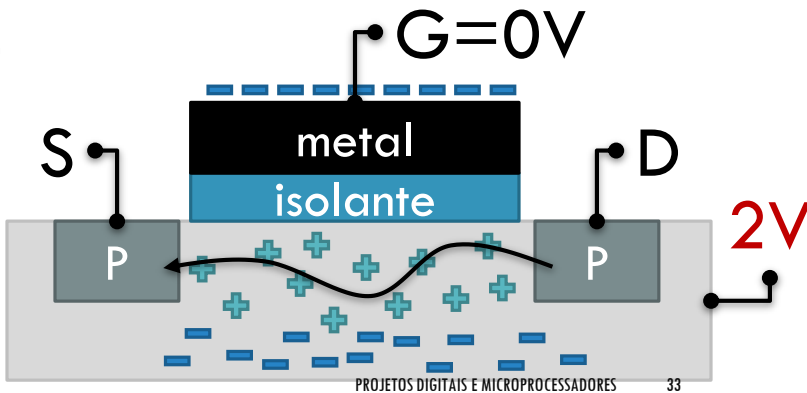
Se Substrato em 0 Volt (lógico 0)

- Não há corrente entre Source e Drain
- Chave aberta



Se Substrado em 2 Volts (lógico 1)

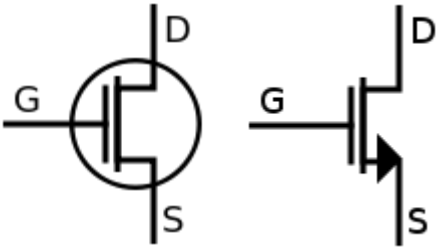
- Há corrente entre Source e Drain
- Chave fechada



SIMBOLOGIA DE CMOS

Boa condução de cargas **negativas**

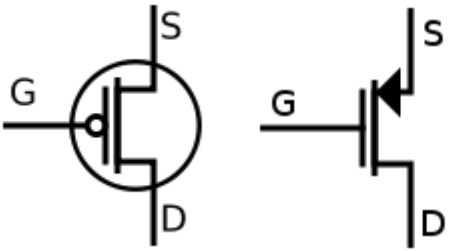
nMOS



G=1 ➔ S=D

Chave fechada

pMOS

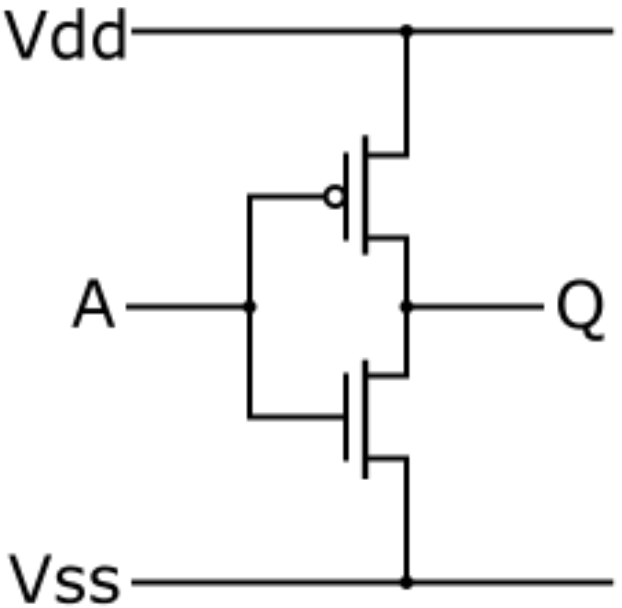


G=0 ➔ S=D

Chave fechada

Boa condução de cargas **positivas**

NOSSA PRIMEIRA PORTA LÓGICA... O QUE ELA FAZ?

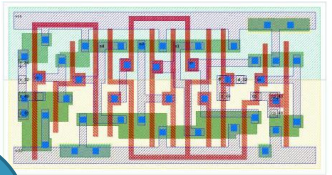


FABRICAÇÃO DE CMOS

CONSTRUÇÃO DE UM CMOS

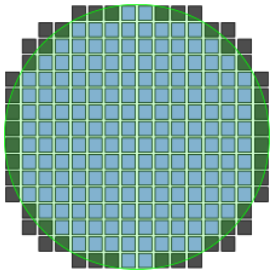
Waffer de silício
$200\mu m$

Polimento
$Defeitos < 1\ por\ cm^2$
99.9999999% pureza



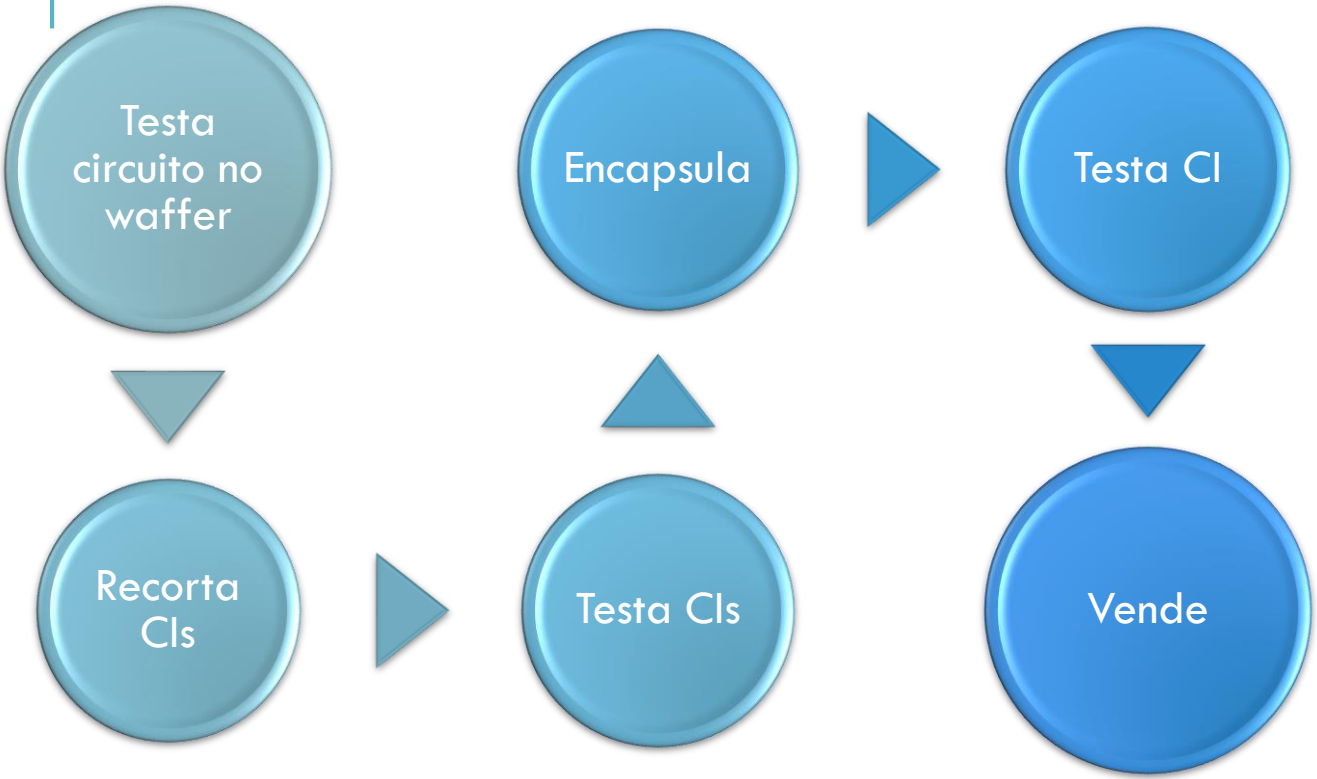
Forno 1000°C, com aplicação de máscaras + dopagem com Boro(B), Fósforo (P), Arsênio (As), Antimônio (Sb)
99.9999% pureza

+10x

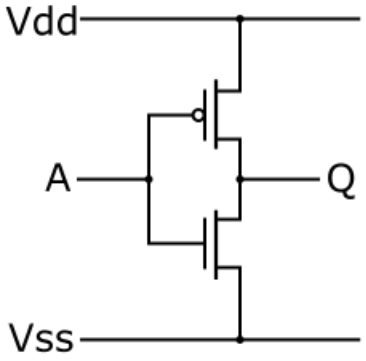


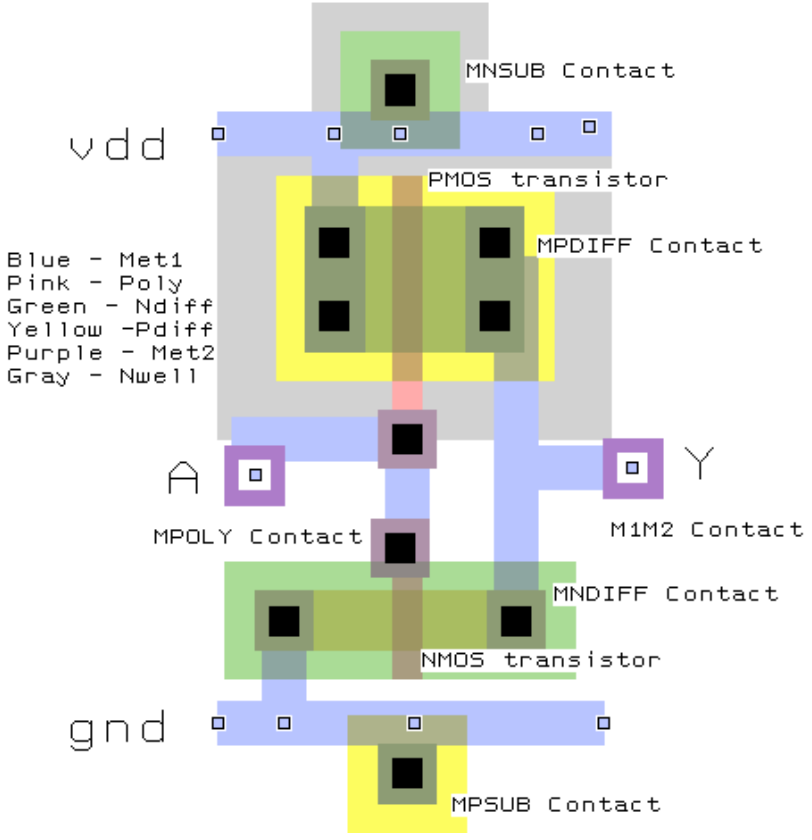
400
μprocessadores

TESTE DE UM CMOS

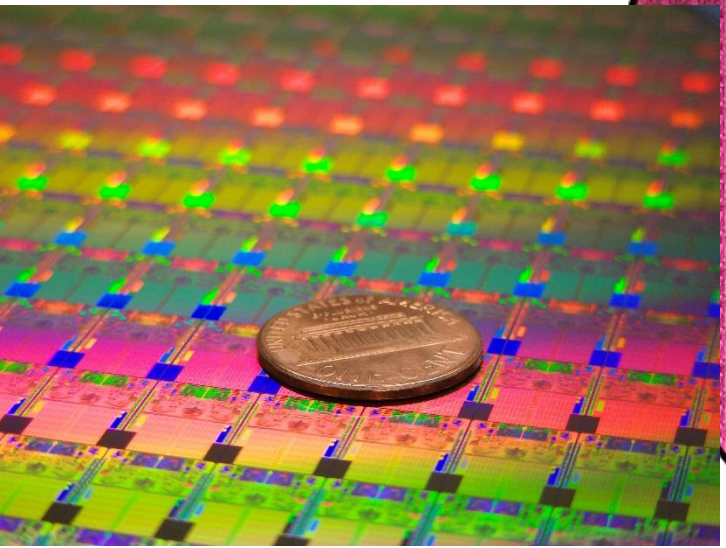


MÁSCARA DE UM INVERSOR CMOS



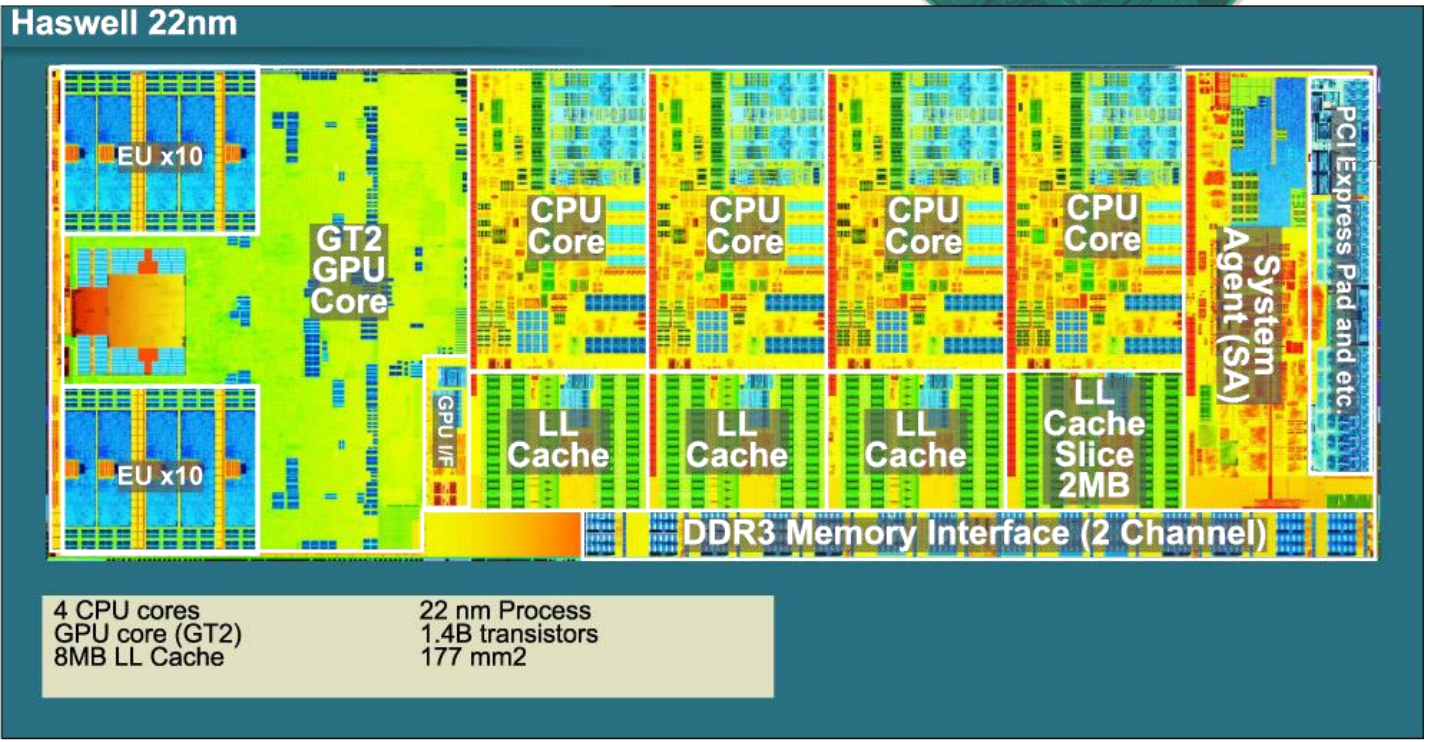


WAFFER PRONTO



PROCESSADOR (DIE)

Haswell Die Layout

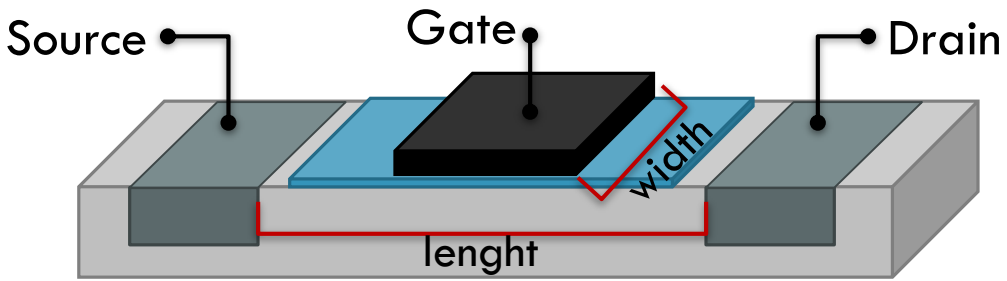


Copyright (c) 2013 Hiroshige Goto All rights reserved.

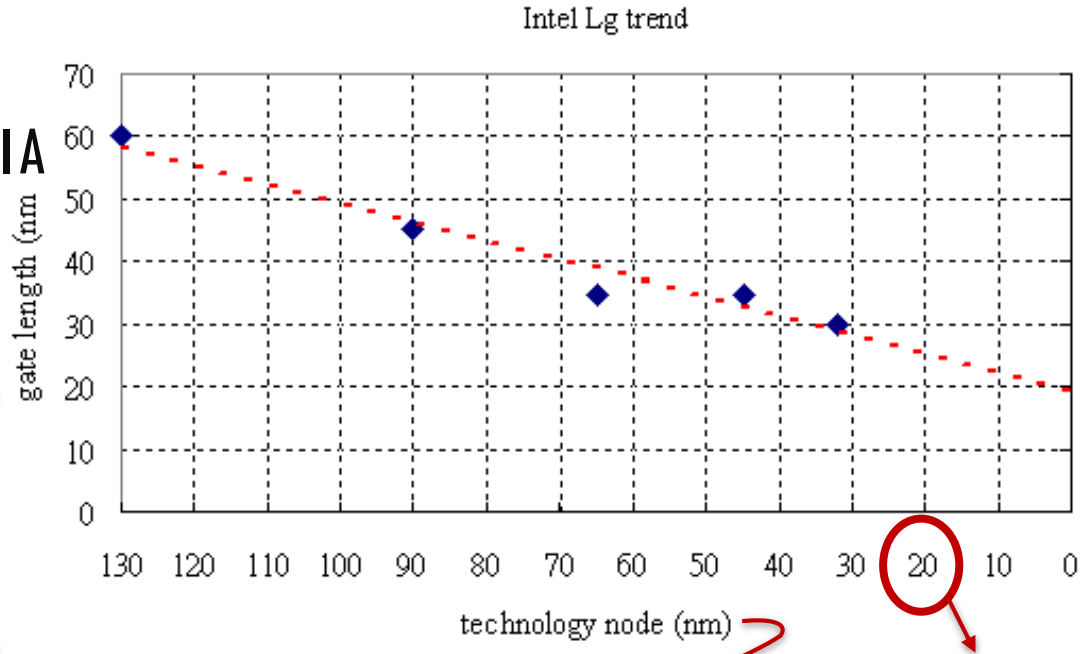
ESCALANDO MOSFETS

Reduzir o tamanho dos transistores é útil por diversos fatores:

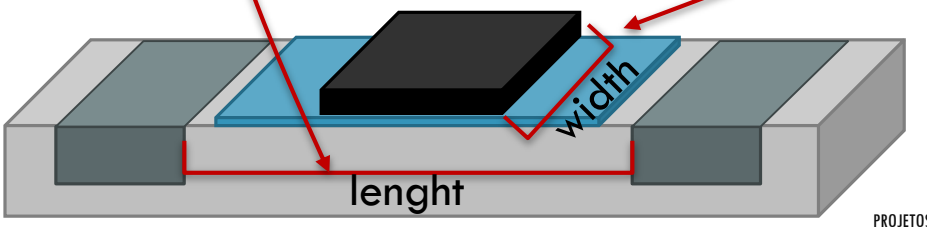
- Produzir mais transistores na mesma área, ou implementar a mesma funcionalidade em uma área menor.
- Aumentar o número de circuitos por waffer, aumentando assim o lucro.
- Transistores menores conseguem chavear (ativar/desativar) mais rápido.
- Redução na capacitância por isso redução no consumo de potência ($P = CV^2f$)
- Lenght é a distância entre S e D, essa distância influencia na frequência máxima de operação



TENDÊNCIA



+/- 50 átomos



QUAIS AS IMPLICAÇÕES DESSA MINIATURIZAÇÃO?

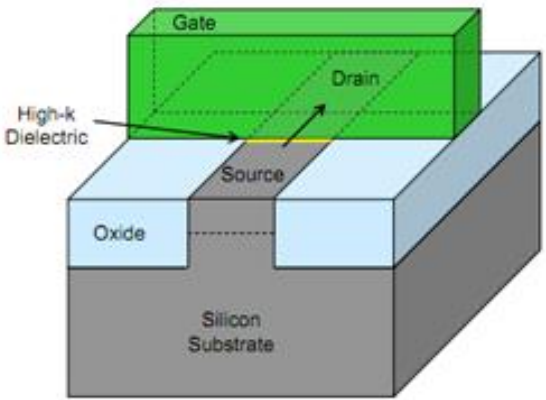
Transistores mais rápidos

Maior corrente de fuga (energia estática)

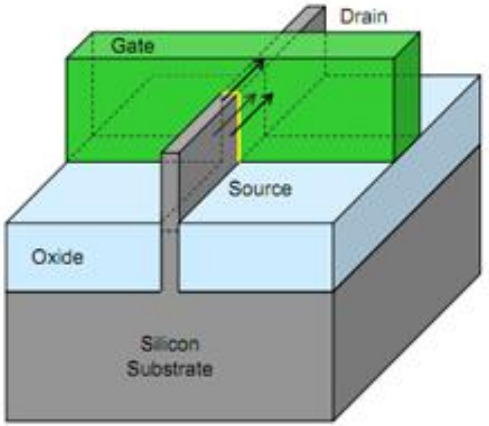
Lei de Moore (número de transistores deve dobrar a cada 18 meses)

TRANSISTORES TRI-GATE

Traditional Planar Transistor



22 nm Tri-Gate Transistor



CONSUMO DE POTÊNCIA (WATTS)

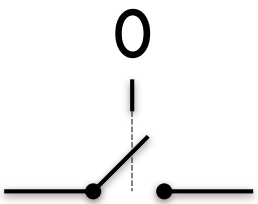
$$P = \underbrace{CV^2}_{\text{Energia para chavear (joules)}} f$$

Chaveamentos por segundo (hertz)

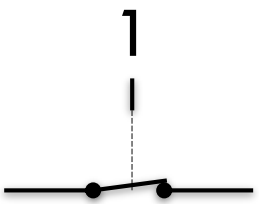
PORTAS LÓGICAS IMPLEMENTADAS CHAVES

INTRODUÇÃO A CIRCUITOS COM CHAVES

Antes de considerar os transistores, vamos ver a implementação usando chaves simples.



Controle=0
Circuito aberto
(interrompido)

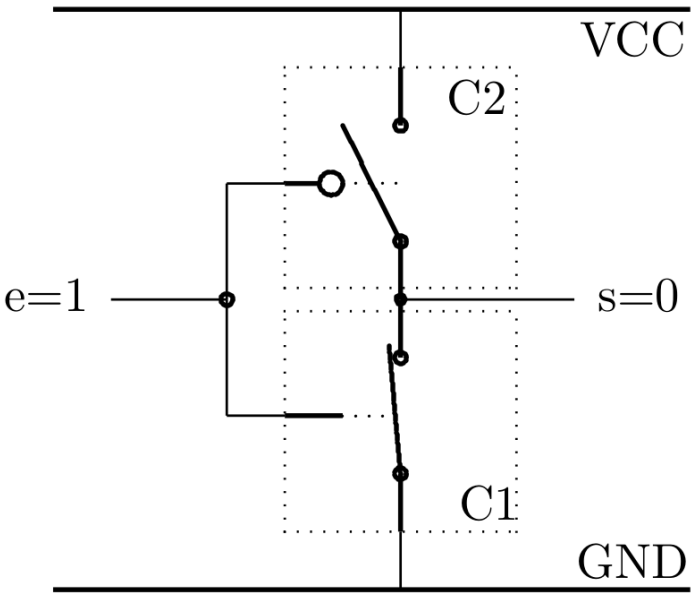


Controle=1
Circuito fechado

INVERSOR COM CHAVES

Caso nenhuma chave esteja fechada, o estado da saída é indefinido.

Caso ambas as chaves sejam fechadas, um curto circuito ocorrerá entre VDD e GND.



LIGAÇÃO EM SÉRIE

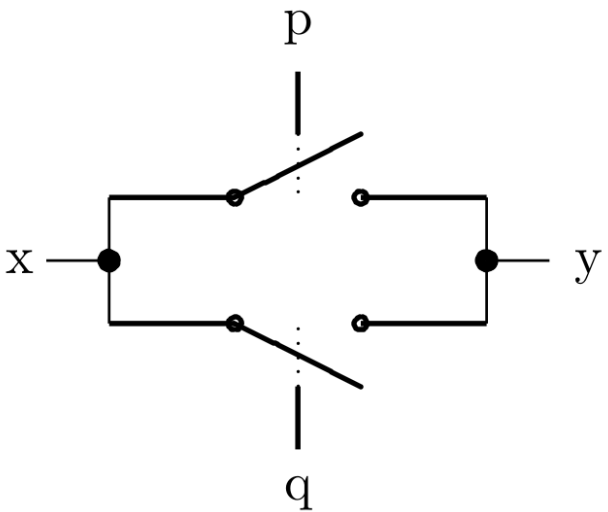
X só é transmitido até Y caso as chaves P e Q estejam ativas.

Caso apenas uma das chaves ou nenhuma esteja ativa, nada pode-se dizer sobre o estado da saída Y.

LIGAÇÃO EM PARALELO

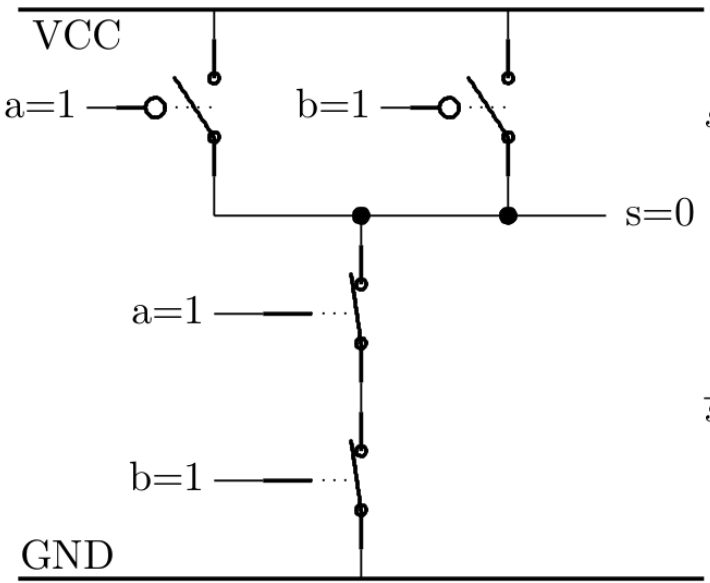
X só é transmitido até Y caso uma das chaves P ou Q estejam ativas.

Caso nenhuma chave esteja ativa, nada pode-se dizer sobre o estado da saída Y.



EXEMPLO DE PORTA LÓGICA COM CHAVES

Que porta lógica é essa?

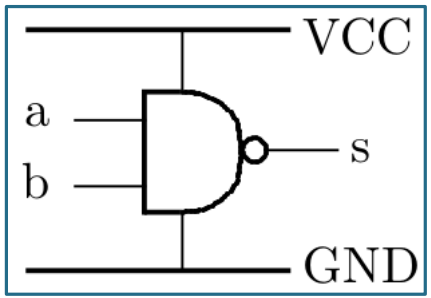


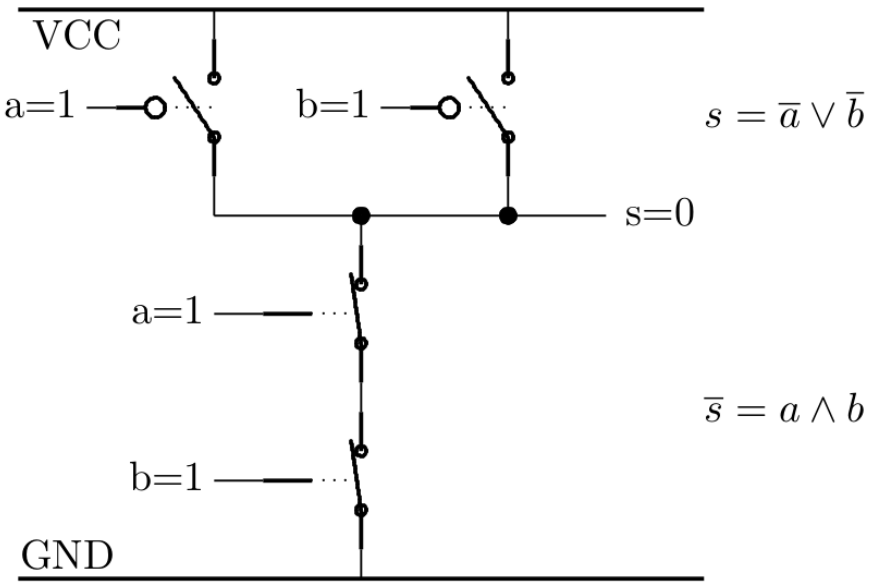
$$s = \overline{a} \vee \overline{b}$$

$$\overline{s} = a \wedge b$$

EXEMPLO DE PORTA LÓGICA COM CHAVES

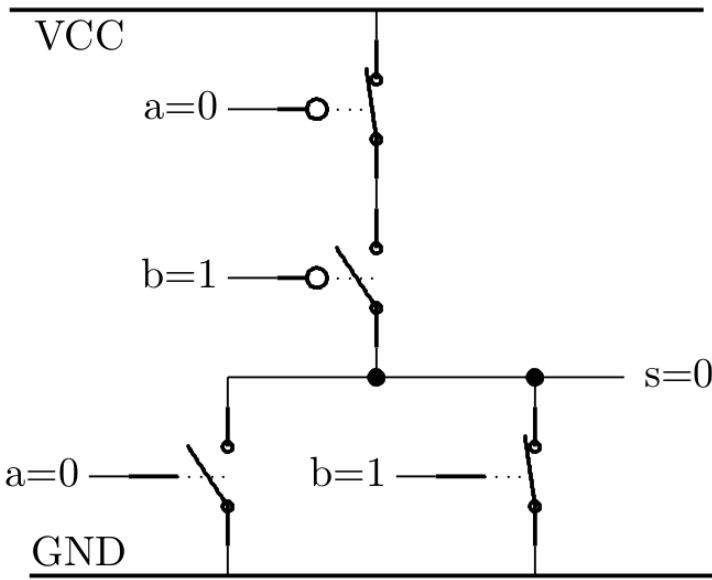
Que porta lógica é essa?





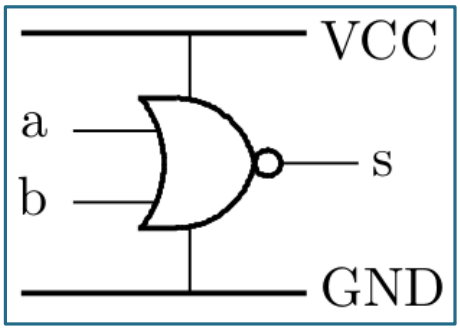
EXEMPLO DE PORTA LÓGICA COM CHAVES

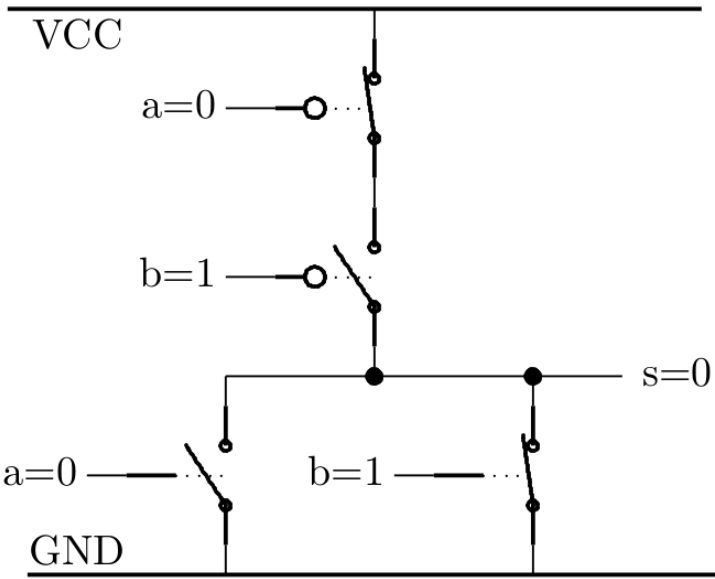
Que porta lógica é essa?



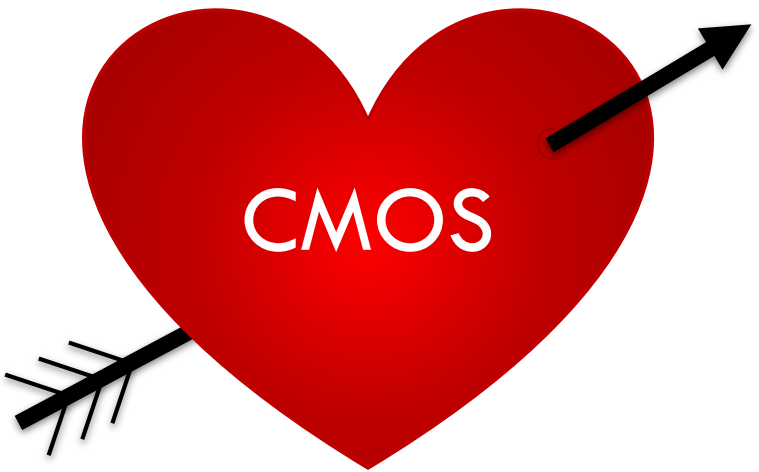
EXEMPLO DE PORTA LÓGICA COM CHAVES

Que porta lógica é essa?





$s = \overline{a} \wedge \overline{b}$

$\overline{s} = a \vee b$

A REVOLUÇÃO DIGITAL FOI FEITA DE CMOS!