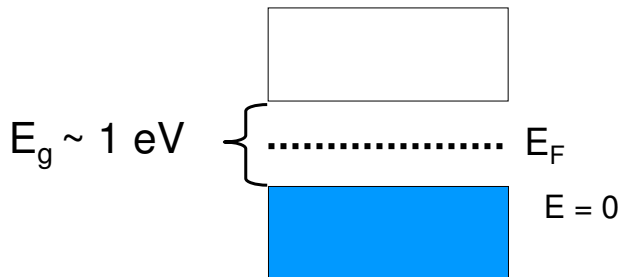


Unidade 3

# SEMICONDUCTORES



Elétron pode saltar da banda de valência para a banda de condução por simples agitação térmica

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## Concentração de portadores de carga:

**Para metais:** elétrons de condução (= n<sup>o</sup> de elétrons de valência por átomo)

$$n_{Cu} = 9 \times 10^{28} \text{ (m}^{-3}\text{) em temperatura ambiente}$$

**Para semicondutores:** portadores de carga surgem apenas por agitação térmica

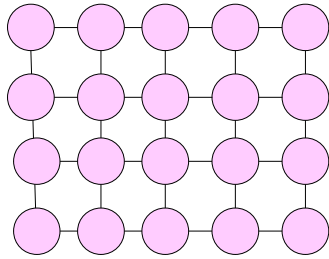
Elétrons saltam da banda de valência para a banda de condução, gerando

espaços vazios na banda de valência

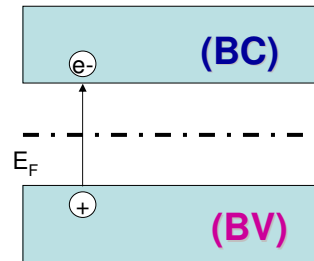
**BURACOS**

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

### Semicondutor Intrínseco



● = Si



$$N(\text{buracos}) = N(\text{elétrons})$$

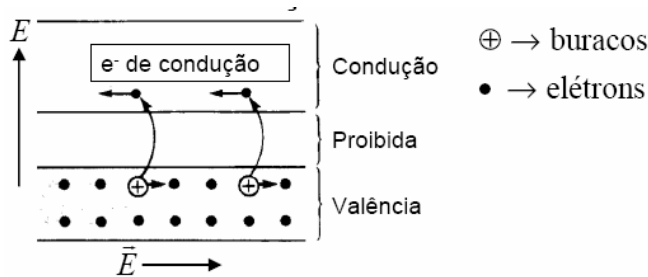
2 tipos de portadores de carga:

**Elétrons** na banda de condução (BC)

**Buracos** na banda de valência (BV)

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## Condução elétrica em



Um campo elétrico aplicado a um semicondutor produz condução elétrica devido ao movimento dos  $e^-$  na banda de condução, bem como dos buracos na banda de valência. No caso dos buracos, o movimento também se deve aos  $e^-$ , que, devido ao campo, ocupam sucessivamente a vacância deixada pelo  $e^-$  promovido à banda de condução, fazendo com que a vacância se desloque no sentido oposto.

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## SEMICONDUCTORES: como varia a resistividade com o aumento da temperatura?

$$\rho = \frac{m}{ne^2\tau}$$

- Concentração de portadores de carga ( $n$ ) aumenta rapidamente com a temperatura (elétrons e buracos);
- Tempo de relaxação  $\tau$  tem uma diminuição pequena frente ao aumento de ( $n$ )

$\rho$  DIMINUI com a temperatura

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} = \alpha \quad \alpha = \text{coeficiente de temperatura da resistividade é NEGATIVO!}$$

$\alpha_{Si} = -70 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## RESUMO:

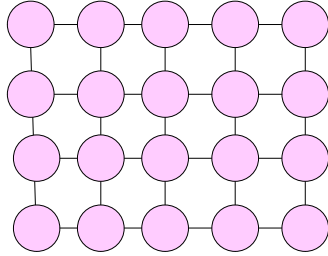
<i>Propriedade</i>	<i>Metais (M)</i>	<i>Semicondutores (S)</i>	<i>Observações</i>
<b>Portadores de carga (<math>n</math>)</b>	Elétrons de condução	Elétrons + Buracos	$n_M > n_S$
<b>Resistividade</b> $\rho = \frac{m}{ne^2\tau}$	Pequena	Grande	$\rho_M < \rho_S$
<b>Coefficiente de temperatura da resistividade</b> $\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} = \alpha$	$\frac{d\rho}{dT} > 0 \Rightarrow \alpha > 0$ • $\tau$ diminui com T • $n$ independe de T	$\frac{d\rho}{dT} < 0 \Rightarrow \alpha < 0$ • $\tau$ diminui pouco comparado ao aumento de $n$ com T • $n$ aumenta de T	$\alpha_M > 0$ $\alpha_S < 0$

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

# Dopagem de Semicondutores

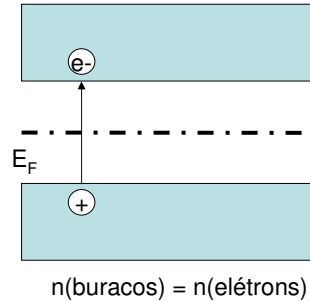
- Objetivo: aumentar a condutividade do SC pela adição de uma pequena quantidade de outro material, denominado de **dopante**

## Semicondutor Intrínseco



○ = Si

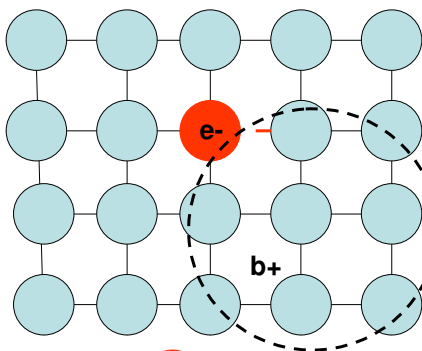
Valência do Si +4



Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## Semicondutor Extrínseco Tipo p (positivo): Portadores majoritários: buracos (BV)

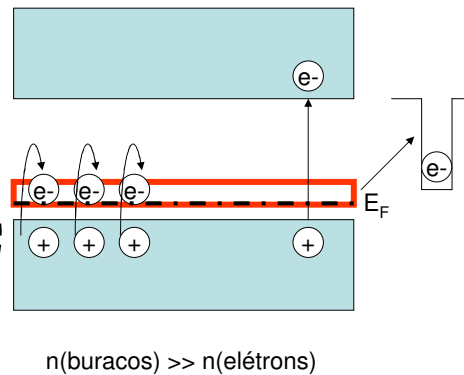
→Dopagem substitucional: 1 átomo de Si é substituído por um átomo de B (valência +3)



● = B

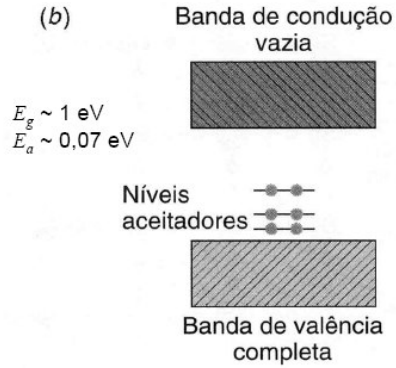
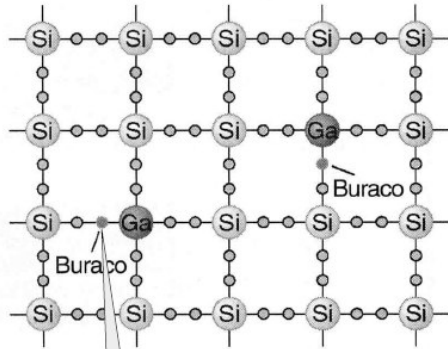
○ = Si

Márcia Russman Gallas (FIS01184)



**Banda receptora (vazia)  
(recebe elétrons da banda de valência)**

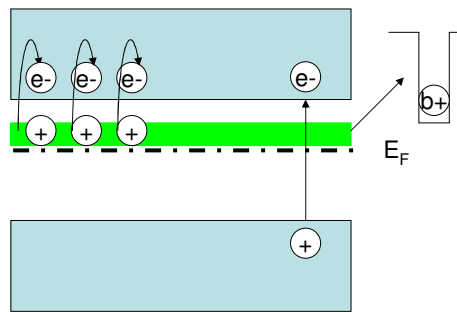
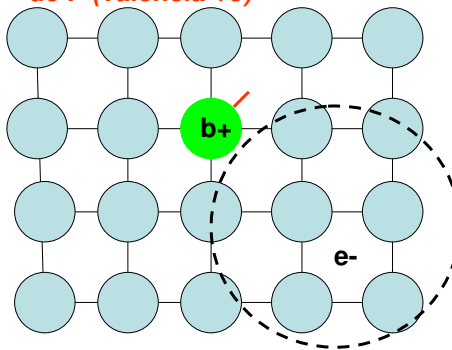
**Tipo p** – Si dopado com Ga (que tem valência 3)



Márcia Russman Gallas (FIS01184)

**Semicondutor Extrínseco Tipo n (negativo):  
Portadores majoritários: elétrons (BC)**

→Dopagem substitucional: 1 átomo de Si é substituído por 1 átomo de P (valência +5)



$n(\text{buracos}) \ll n(\text{elétrons})$

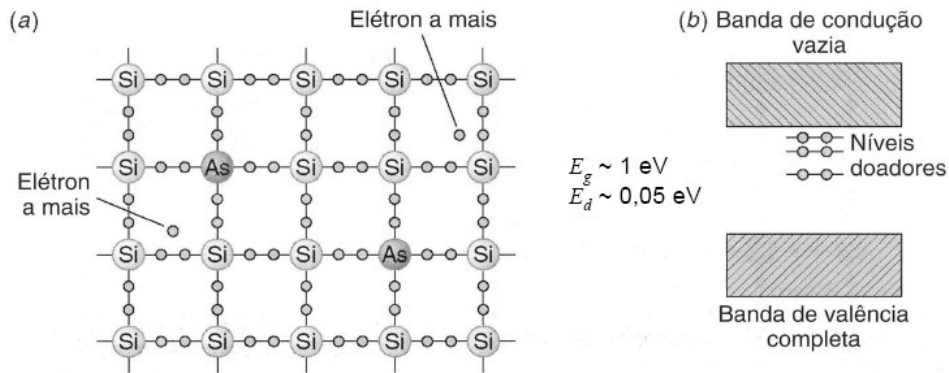
**Banda doadora  
(cheia de elétrons – doa elétrons  
para a banda de condução)**

= P

= Si

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

**Tipo *n*** – Si dopado com As (que tem valência 5)

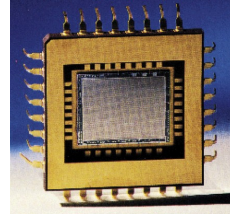


Márcia Russman Gallas (FIS01184)

- [Carrier Concentration vs. Fermi Level](#) and the doping of donor and acceptor impurities.
- [Carrier Concentration vs. Fermi Level and the Density of States](#)

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## Semicondutores:



- Junção p-n
- Diodo retificador
- Diodo Emissor de Luz (LED's e OLED's)
- Transistor

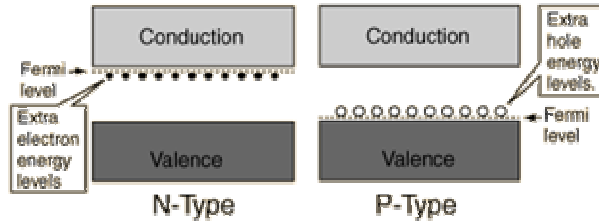
Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## Wafer de silício (300 mm)



Márcia Russman Gallas (FIS01184)

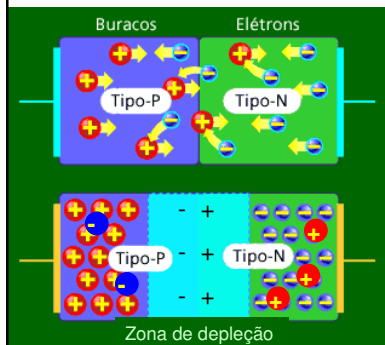
## Revisão: Semicondutores dopados



- A aplicação da teoria de bandas aos semicondutores do tipo n e tipo p mostra que níveis extras de energia são adicionados pelas impurezas.
- **Tipo n:** existem níveis de energia para os elétrons perto do topo do gap de energia, e estes elétrons podem ser facilmente excitados para a banda de condução. (átomos de impurezas: com 5 elétrons de valência)
- **Tipo p:** buracos no fundo do gap de energia permitem que elétrons de valência sejam excitados para este nível, gerando buracos extras na banda de valência. (átomos de impurezas: com 3 elétrons de valência)

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## Junção p-n: DIODO



- diferença nas concentrações de buracos e elétrons gera um processo de difusão na junção entre os dois tipos de semicondutores.

- 1) movimento de portadores majoritários:  
Buracos difundem do lado p para o lado n  
Elétrons difundem do lado n para o lado p
- 2) movimento de portadores minoritários:  
Buracos difundem do lado n para o lado p  
Elétrons difundem do lado p para o lado n

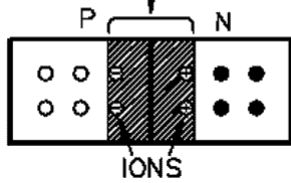
Equilíbrio: elétrons do material tipo-n preenchem os buracos do material tipo-p ao longo da **junção** entre as camadas, formando uma **zona de depleção**, onde temos cargas fixas e não há mais portadores de carga nesta região.

Márcia Russman Gallas (FIS01184)



## Zona de Depleção

CAMADA DE DEPLEÇÃO



Cada vez que um elétron atravessa a junção ele cria um par de íons. À medida que o número de íons aumenta, a região próxima à junção fica sem elétrons livres e buracos.

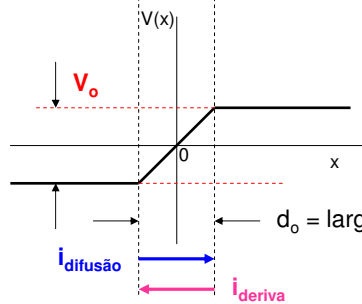
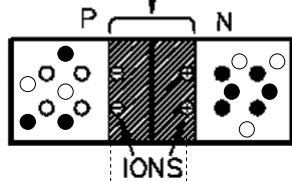
**Como os pares de íons são gerados:** lado n contém impurezas doadoras, quando o elétron passa para o lado p, esta impureza perde um elétron e vira um íon positivo perto da junção, no lado n. No lado p, este elétron que passou, vai ocupar o buraco da impureza receptora e vai torná-la um íon negativo, perto da junção, mas no lado p. Estes íons acabam se atraindo e formando pares fixos, na junção, que é chamada de zona de depleção!

- Zona de depleção age como uma barreira (resistência alta) impedindo a continuação da difusão dos elétrons.
- É estabelecida uma diferença de potencial  $V_0$  (potencial de contato) através da junção.

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## Potencial de Contato $V_0$

CAMADA DE DEPLEÇÃO



- Inibe **corrente de difusão** (gerada por portadores de carga majoritários)
- Não impede movimento dos portadores de carga minoritários, que geram uma corrente chamada de **corrente de deriva** (sentido oposto a corrente de difusão)
- No equilíbrio:  $i_{\text{deriva}} = i_{\text{difusão}}$

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## Símbolo do Diodo



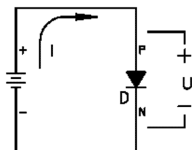
## Polarização do Diodo

Significa aplicar uma diferença de potencial às suas extremidades.

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## Polarização do Diodo

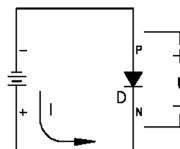
Supondo uma bateria sobre os terminais do diodo, há uma **polarização direta** se o pólo positivo (+) da bateria for colocado em contato com o material tipo  $p$  e o pólo negativo (-) em contato com o material tipo  $n$ .



Idealmente: chave fechada ( $R=0$ )

**LIGADO**

Invertendo-se as conexões entre a bateria e a junção  $pn$ , isto é, ligando o pólo positivo (+) no material tipo  $n$  e o pólo negativo (-) no material tipo  $p$ , dizemos que a junção está com **polarização inversa (reversa)**.



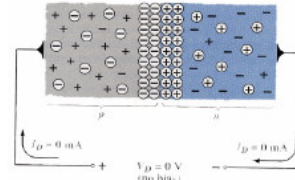
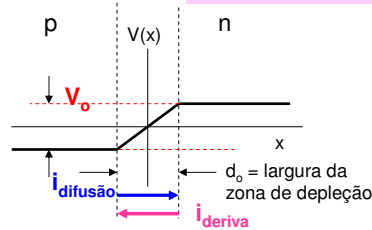
Idealmente: chave aberta ( $R=\infty$ )

**DESLIGADO**

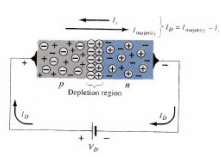
Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## Análise dos circuitos com as duas polarizações:

Junção pn no equilíbrio ( $V_{ext} = 0$ )

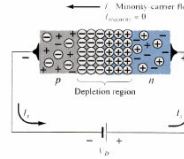


**Polarização Direta**

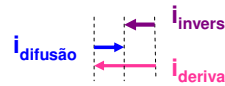
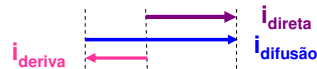


$V_{ext}$  é subtraído de  $V_0$   
 Diminui a barreira para portadores majoritários  
 Aumenta  $i_{difusão}$   
 $d_0$  diminui,  $i_{deriva} =$  constante

**Polarização Inversa**



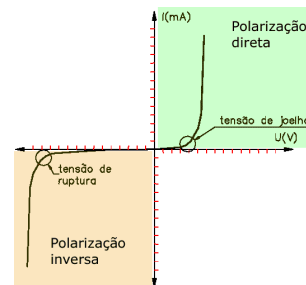
$V_{ext}$  é somado a  $V_0$   
 Aumenta a barreira para portadores majoritários  
 Diminui  $i_{difusão}$   
 $d_0$  aumenta,  $i_{deriva} =$  constante



Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## Curva característica para o diodo

A curva característica de um diodo é um gráfico que relaciona cada valor da *tensão* aplicada ( $V_{ext}$ ) com a respectiva *corrente* elétrica que atravessa o diodo.

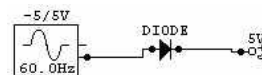


Aplicação

**Diodo Retificador**

→ Transforma tensão alternada em tensão contínua

rede elétrica: alternada ⇒ aparelhos domésticos: contínua



Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## POTÊNCIA DE UM DIODO

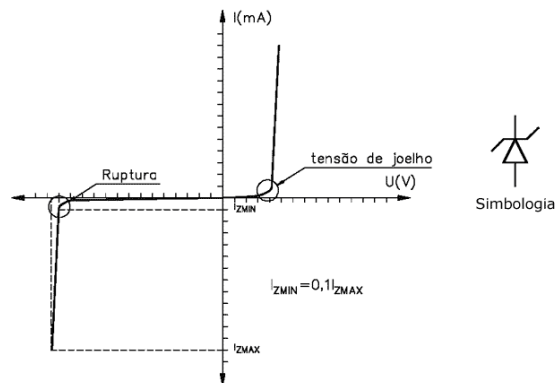
- Em qualquer componente, a potência dissipada é a tensão aplicada multiplicada pela corrente que o atravessa e isto vale para o diodo:
  - $P = U \cdot I$
- Não se pode ultrapassar a potência máxima, especificada pelo fabricante, pois haverá um aquecimento excessivo. Os fabricantes em geral indicam a potência máxima ou corrente máxima suportada por um diodo.
  - Ex.: **1N914** →  $P_{MAX} = 250\text{mW}$
  - **1N4001** →  $I_{MAX} = 1\text{A}$
- Usualmente os diodos são divididos em duas categorias, os diodos para pequenos sinais (potência especificada abaixo de  $0,5\text{W}$ ) e os retificadores ( $P_{MAX} > 0,5\text{W}$ ).

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## Tipos de diodos

**DIODO ZENER** - é um diodo construído especialmente para trabalhar na tensão de ruptura.

- Seu comportamento é o de um diodo comum quando polarizado diretamente.
- Quando polarizado inversamente ao contrário de um diodo convencional, ele suporta tensões reversas próximas a tensão de ruptura.



Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## REGULADOR DE TENSÃO COM ZENER

- Objetivo: manter a tensão sobre a carga constante e de valor  $V_Z$ .

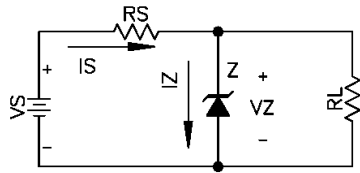
Cálculo do resistor de carga  $R_S$ :

- garante a corrente mínima para a carga:

$$R_S < \frac{V_{S\text{MIN}} - V_Z}{I_{L\text{MAX}} + I_{Z\text{MIN}}}$$

- garante que sob o zener não circule uma corrente maior que  $I_{Z\text{MAX}}$

$$R_S > \frac{V_{S\text{MAX}} - V_Z}{I_{L\text{MIN}} + I_{Z\text{MAX}}}$$

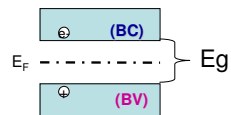


Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## Diodo Emissor de Luz Light-emitting diode (LED)

- Como a junção pn emite luz?

Elétron no fundo da banda de condução cai num buraco no topo da banda de valência: **processo de recombinação elétron+buraco.**



Energia liberada =  $E_g$

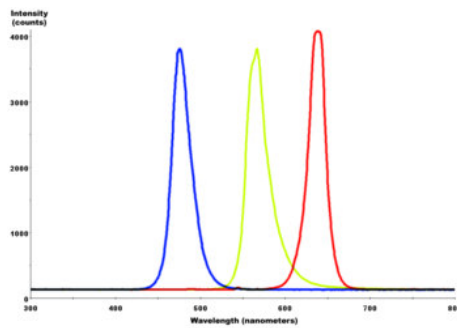
$$E_g = \frac{hc}{\lambda}$$

- Forma de calor: energia térmica, vibração na estrutura
- Forma de radiação eletromagnética: luz

Depende dos semicondutores utilizados: precisa de um grande número de recombinações

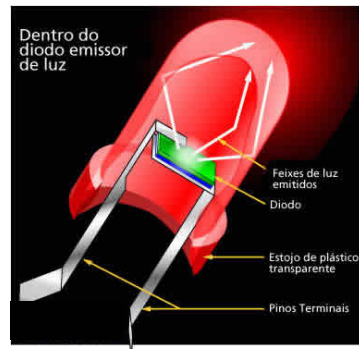
LED's comerciais: Ga-As-P proporção entre fósforo e arsênio ajusta a largura do  $gap$  ( $E_g$ ) de modo a haver emissão no visível

Márcia Russman Gallas (FIS01184)



LED's comerciais: Ga-As-P  
proporção entre fósforo e  
arsênio ajusta a largura do  $gap$   
( $E_g$ ) de modo a haver emissão  
no visível.

Márcia Russman Gallas (FIS01184)



## OLEDs - Organic light-emitting diodes

LED que possui um composto orgânico como camada emissora de luz. Estes materiais orgânicos podem ser moléculas numa fase cristalina, ou um polímero.

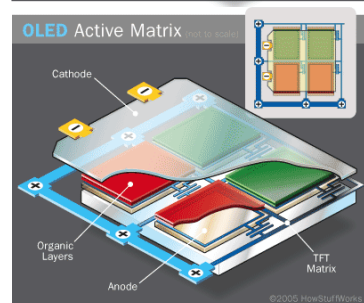
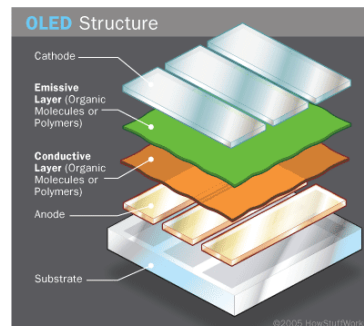
OLEDs feitos com polímeros são bastante flexíveis e leves.

Possíveis aplicações:

- Monitores flexíveis a baixo custo
- Fontes de luz
- Decorações em paredes
- Roupas luminosas

OLEDs tem sido usados para produzir displays para dispositivos eletrônicos portáteis, como celulares, câmeras digitais e tocadores de MP3. Monitores maiores tem sido desenvolvidos, mas sua vida útil ainda é muito baixa (< 1000 horas).

Márcia Russman Gallas (FIS01184)



**SAMSUNG Electronics Develops World's First 40-inch a-Si-based OLED for Ultra-slim, Ultra-sharp Large TVs**  
**19 May 2005**



Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## Fotodiodo: inverso do LED



- tipo de fotodetector: uma junção pn designada para responder a uma entrada ótica.
- possuem uma "janela" ou uma conexão de fibra ótica, responsável por deixar a luz passar e incidir na parte sensível do dispositivo.
- pode ser usado sem a "janela" para detectar raios ultravioleta ou raios-x.
- podem ser usados tanto na polarização reversa quanto na polarização direta.
- na polarização direta, a luz que incide sobre o fotodiodo faz a corrente passar através do dispositivo (efeito fotoelétrico), e é a base das células de captação de energia solar - aliás, uma célula de captação de energia solar é apenas um monte de grandes, e baratos, fotodiodos.
- são usados em controles remotos: pulsos de infravermelho são emitidos e recebidos por um fotodiodo na TV, são amplificados, transformados em sinais elétricos e podem ser usados para diferentes tarefas.



Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## Lasers Semicondutores (de Diodo)

Inversão de população  
Emissão estimulada



Junção pn  $\Rightarrow$  maior número de elétrons na BC (lado n) do que na BV (lado p)

OBS: comprimentos de onda de laser de diodo tem largura de linha bem menor que os comprimentos de onda de um LED

Cavidade ressonante



Faces dos cristais p e n devem ser planas e paralelas para que a luz seja refletida diversas vezes na junção

Quando ocorre recombinação temos emissão de fótons que podem estimular outros elétrons a se recombinarem, emitindo mais fótons

$\Rightarrow$  corrente grande na junção

$\Rightarrow$  reação em cadeia  $\Rightarrow$  laser

**Aplicações:** leitores e gravadores de CD e DVD ; sistemas de comunicação

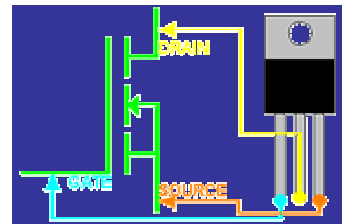
Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## TRANSISTOR: dispositivo semicondutor com 3 terminais



Amplifica sinais

Porta – G Dreno – D Fonte – S



Transistor de efeito de campo: FET

• elétrons vão de S para D: corrente  $I_{DS}$  depende do campo elétrico produzido por uma tensão em G

Diversos tipos de transistores: vamos discutir **MOSFET**  
(Metal – Oxide – Semiconductor – Field - Effect – Transistor)

Márcia Russman Gallas (FIS01184)



## MOSFET

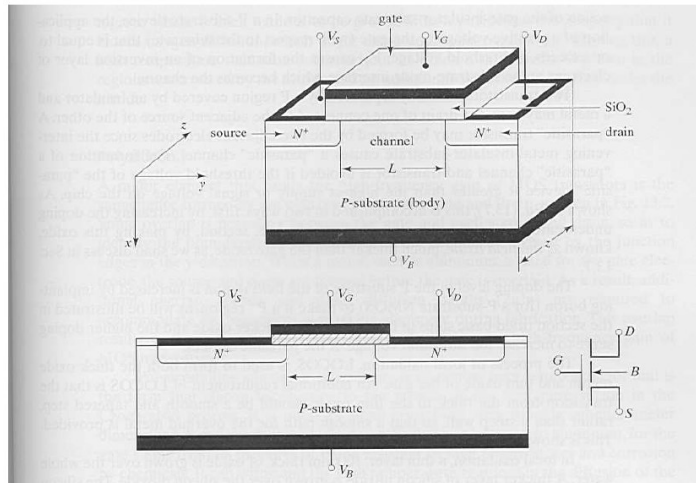


Fig 2 Desenho esquemático da estrutura moderna do transistor MOSFET em perspectiva, corte em secção transversal e o símbolo do transistor nMOS

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

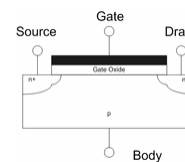
## MOSFET

- Opera somente em dois estados: lógica binária  $\Rightarrow$  circuitos elétricos digitais

$$I_{DS} \neq 0 \text{ (porta aberta)} \Rightarrow 1$$

$$I_{DS} = 0 \text{ (porta fechada)} \Rightarrow 0$$

- Comutação rápida entre ON e OFF
- Comprimento: 500 nm (extremamente pequeno!)
- Composição: estrutura básica

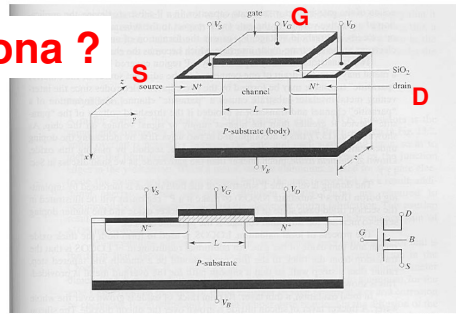


- substrato: semiconductor tipo p - monocristal de Si fracamente dopado
- ilhas são criadas no substrato com alta dopagem tipo n (fonte e dreno)
- ligação entre F e D através de uma camada estreita (canal) tipo n
- fina camada de  $\text{SiO}_2$  é depositada sobre o canal
- uma camada de metal é depositada sobre o óxido para fazer o papel de porta
- camadas metálicas sobre a fonte e o dreno

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## MOSFET: Como funciona ?

- inicial: S e substrato aterrados ( $V=0$ )
  - G "no ar" (não está ligada a nenhuma fonte externa)
- aplica-se uma tensão  $V_{DS}$  entre fonte (S) e dreno (D) (+)



- elétrons se movem através do canal n de S  $\Rightarrow$  D : corrente convencional  $I_{DS}$
- liga-se uma fonte de tensão  $V_{GS}$  entre porta (G) e fonte (S): terminal negativo (G)
- isto cria um campo elétrico que repele os elétrons do canal n para p:
  - $\Rightarrow$  alarga a zona de depleção  $\Rightarrow$  diminui a largura de n (canal)  $\Rightarrow$  diminui o número de portadores de carga  $\Rightarrow$  aumenta a resistência  $\Rightarrow$  reduz  $I_{DS}$
- para valores grandes de  $V_{GS}$ ,  $I_{DS} = 0 \Rightarrow$  portanto  $V_{GS}$  pode ser usado para comutar o MOSFET em ON e OFF

OBS: milhares de transistores e outros componentes eletrônicos, como capacitores, resistores formam um CHIP (basicamente material semiconductor); vários CHIPS: circuitos integrados  $\Rightarrow$  microeletrônica

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## Applets para Semicondutores

<http://jas.eng.buffalo.edu/>

Márcia Russman Gallas (FIS01184)