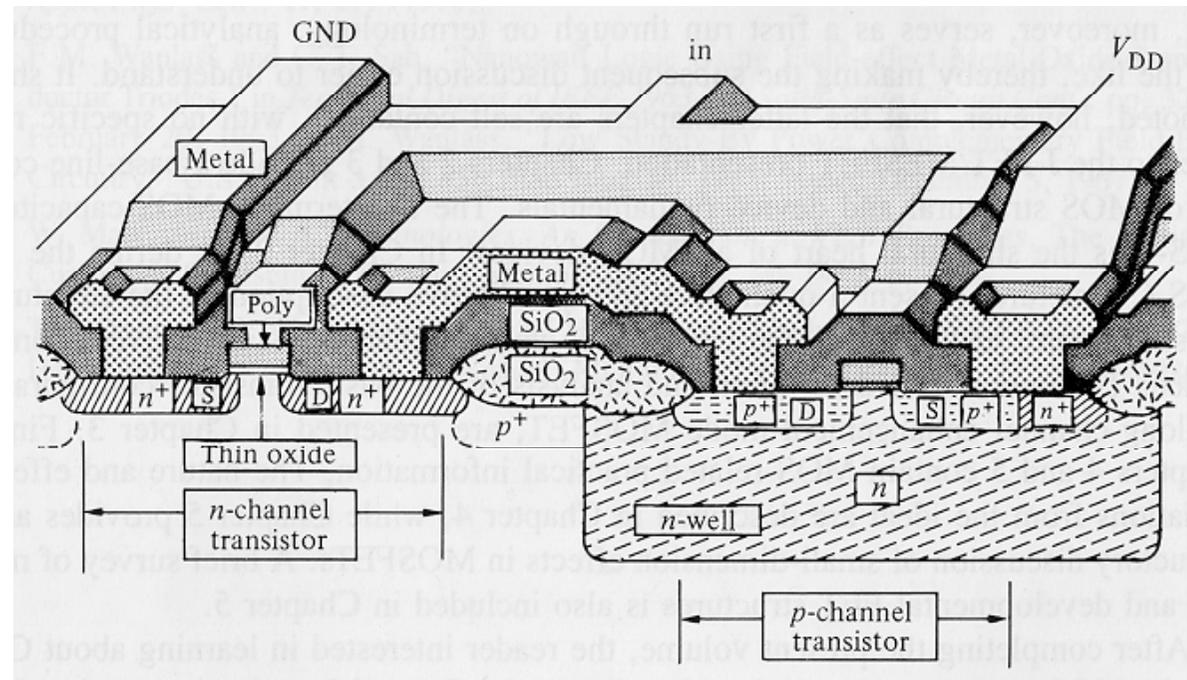
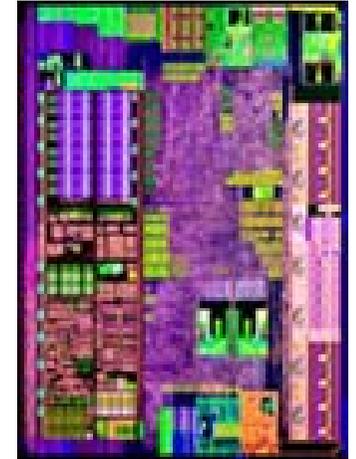
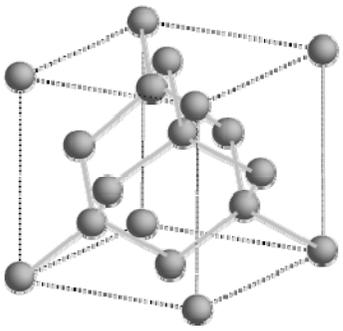


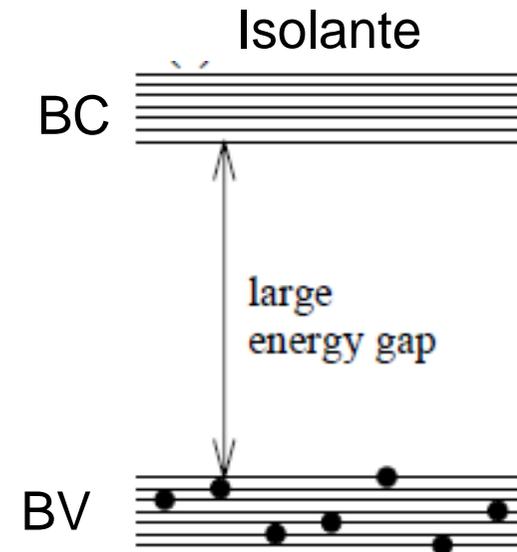
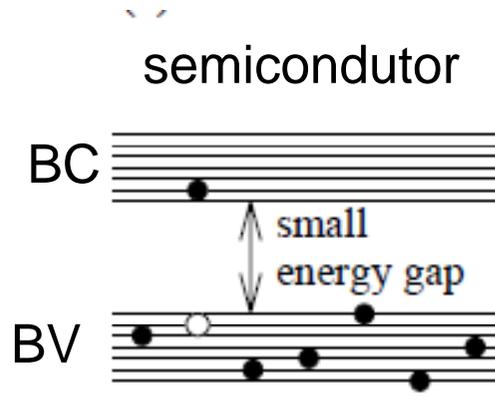
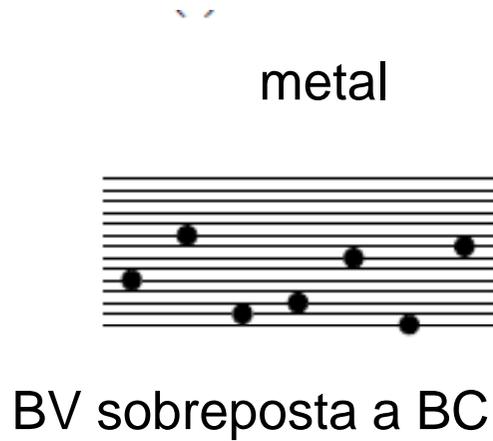
Materiais e dispositivos semicondutores

PMT3200



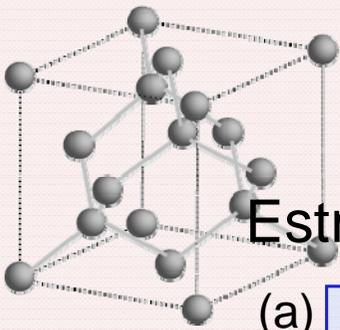


Semicondutores? Lembrando PMT 3100



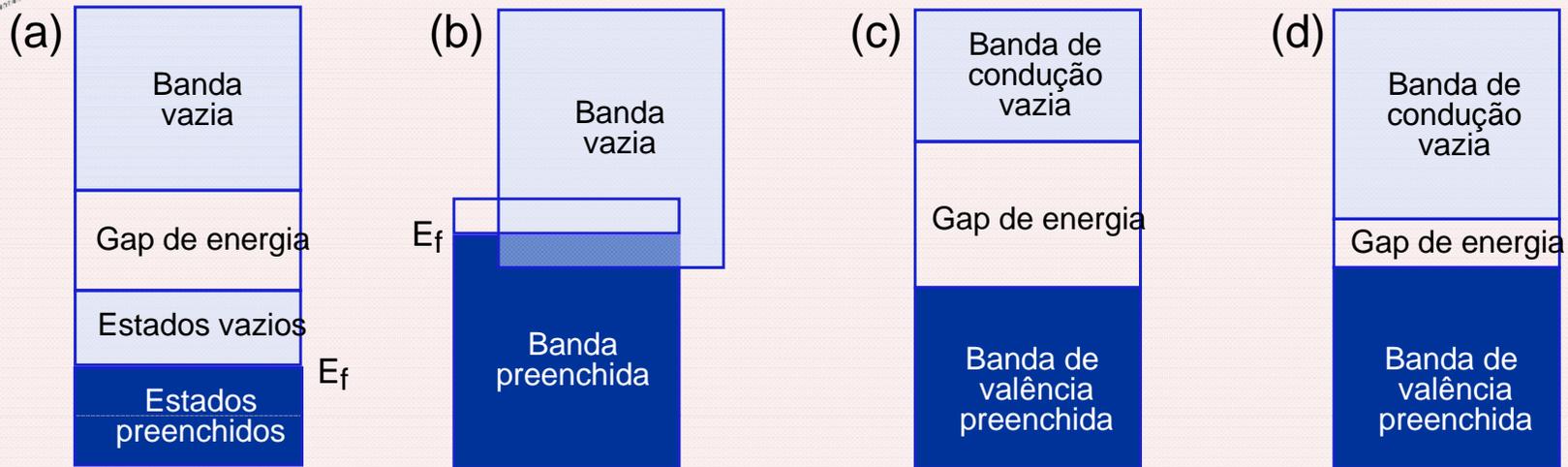
BV - Banda de Valência
BC - Banda de Condução
Gap - Banda Proibida

Energia de gap E_g
 $E_g(\text{Si}) = 1,11\text{eV}$
 $E_g(\text{Ge}) = 0,67\text{eV}$
 $E_g(\text{SiO}_2) = 8\text{eV}$

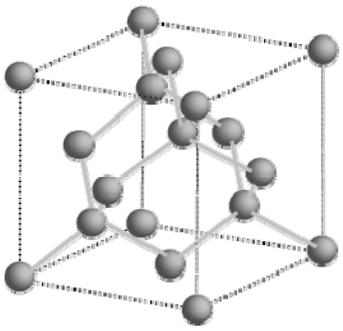


ESTRUTURAS DE BANDAS DE ENERGIA NOS SÓLIDOS

Estruturas de bandas de energia possíveis para sólidos a 0 K.



- (a) Bandas de energia de **METAIS** tais como o cobre ($Z = 29, \dots 3d^{10} 4s^1$) nos quais se encontram disponíveis, na mesma banda de energia, estados eletrônicos não preenchidos acima e adjacentes a estados eletrônicos preenchidos.
- (b) Bandas de energia de **METAIS** tais como o magnésio ($Z = 12, 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$) nos quais ocorre a superposição das bandas de energia mais externas, a preenchida e a não-preenchida.
- (c) Bandas de energia típicas de **ISOLANTES**: a BANDA DE VALÊNCIA (banda de energia preenchida) é separada da BANDA DE CONDUÇÃO (banda de energia não-preenchida) por um **GAP DE ENERGIA** (banda de energia proibida, ou seja, barreira de energia) de largura relativamente grande (>2 eV).
- (d) Bandas de energia de **SEMICONDUTORES**: a estrutura de bandas de energia é semelhante à dos isolantes, mas com gaps de energia de larguras menores (<2 eV).

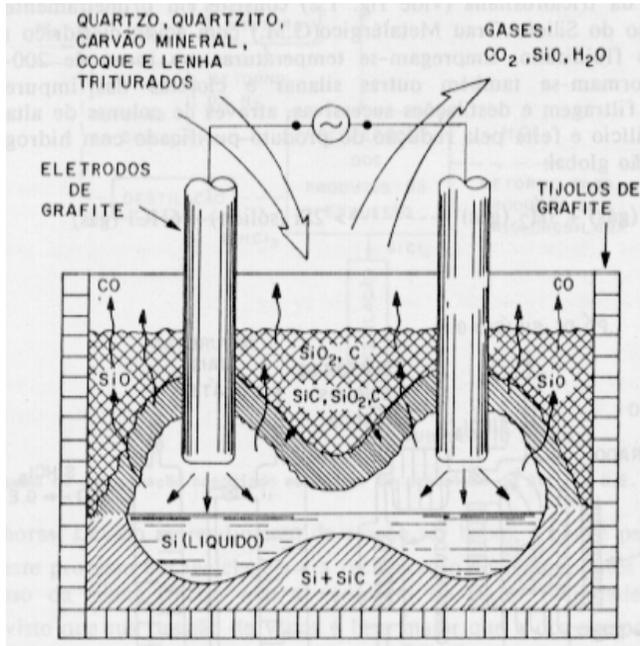


Etapas de Processo para Obtenção de Silício Grau Eletrônico

Grau Eletrônico

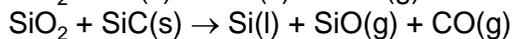


Obtenção de Silício Grau metalúrgico

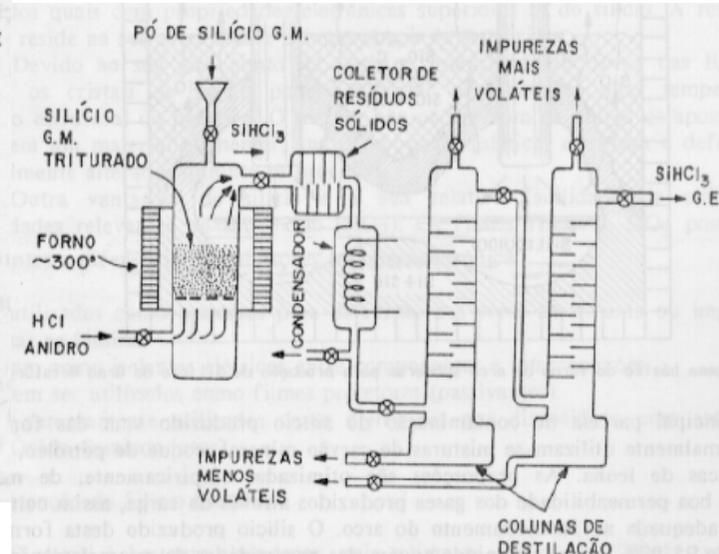


Reação com carvão

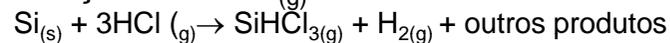
Redução:



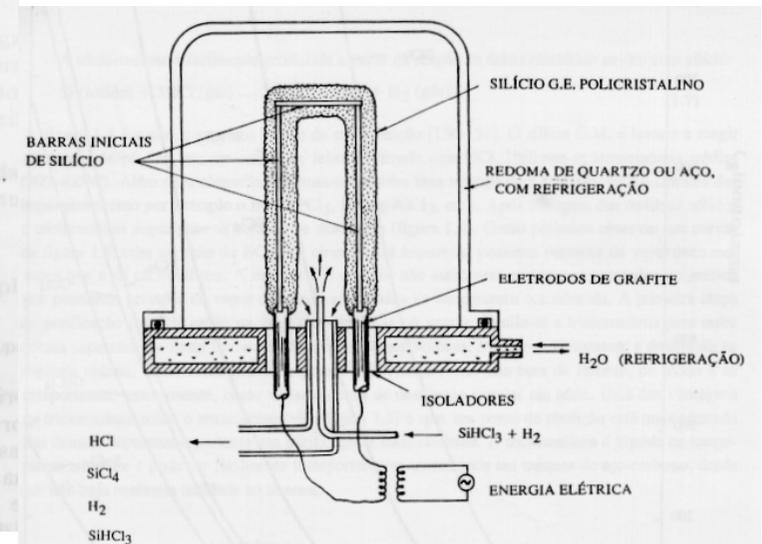
Purificação do Silício Grau Metalúrgico



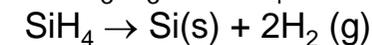
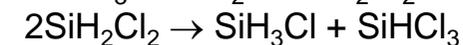
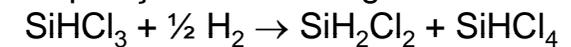
Reação com $\text{HCl}(\text{g})$

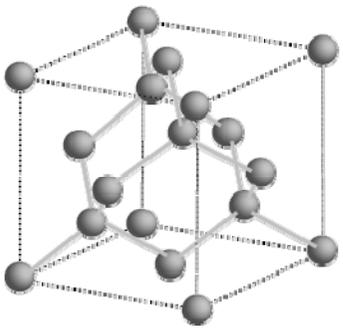


Obtenção de Silício Policristalino Grau Eletrônico (processo Siemens)



Deposição de Silício grau eletrônico:

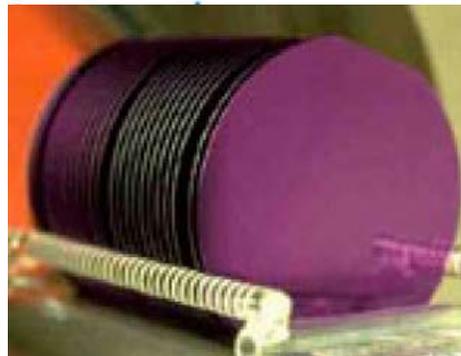
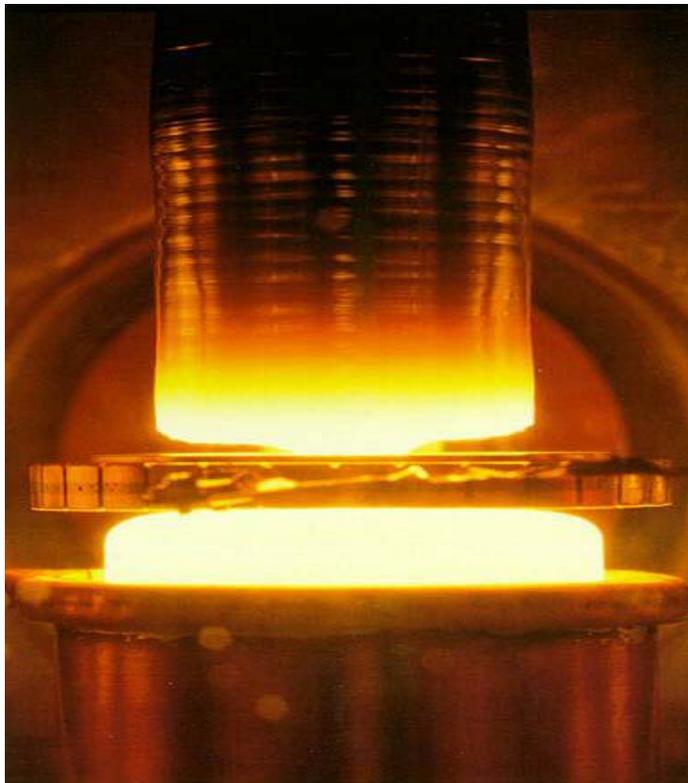




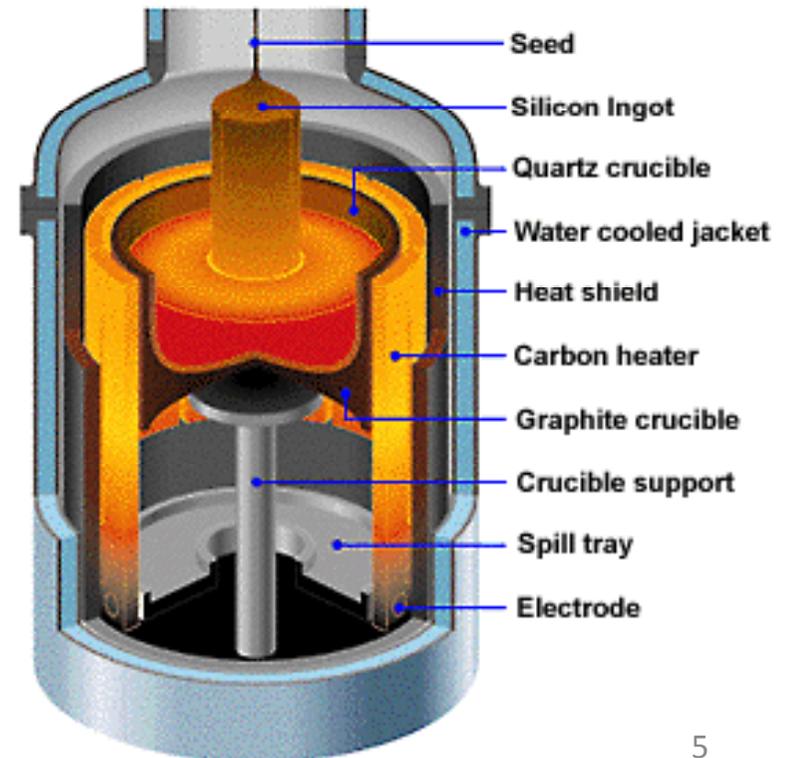
Materiais e dispositivos semicondutores

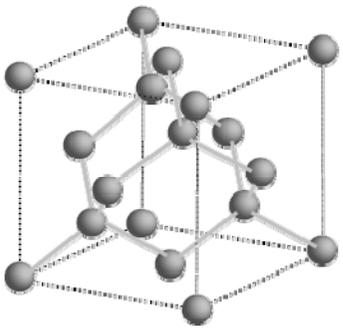
Métodos de obtenção de Silício para aplicações em microeletrônica.

Processo Float Zone



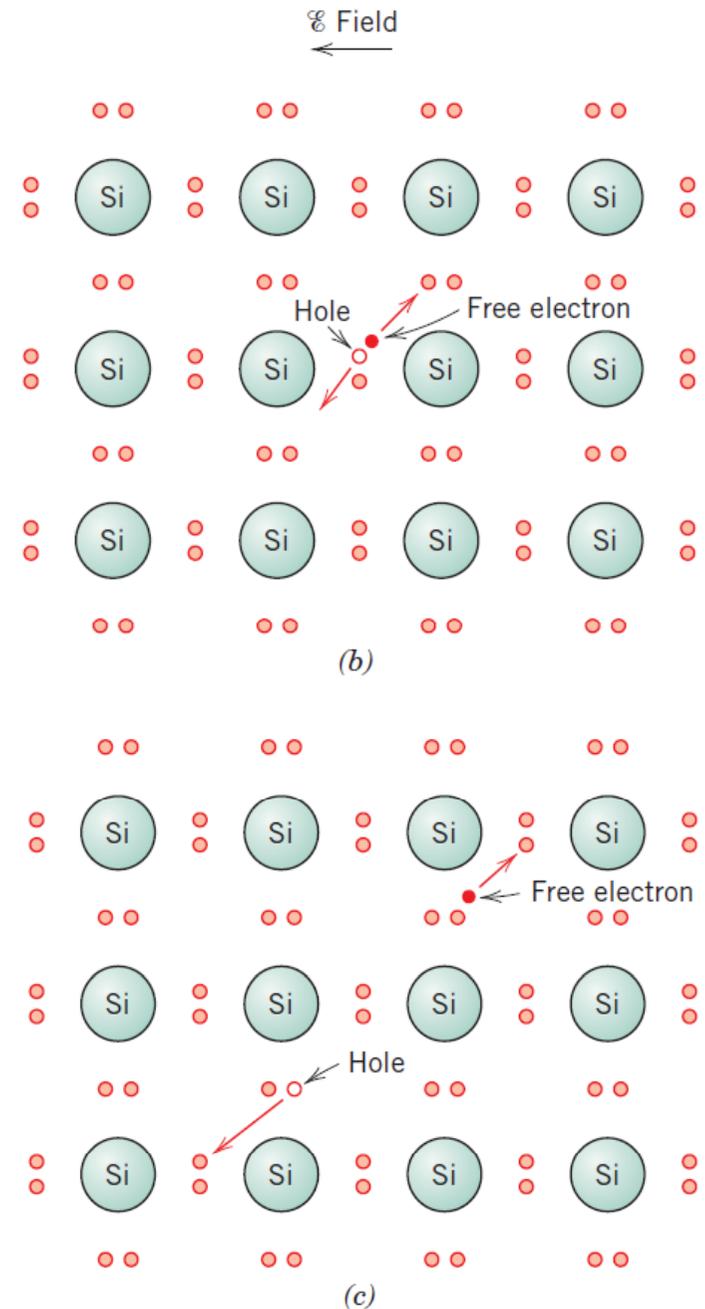
Processo de Czochralski

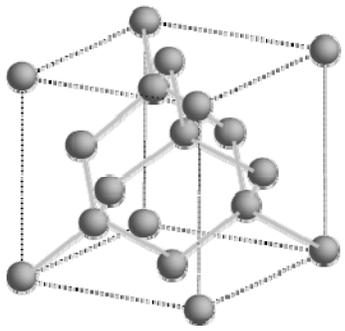




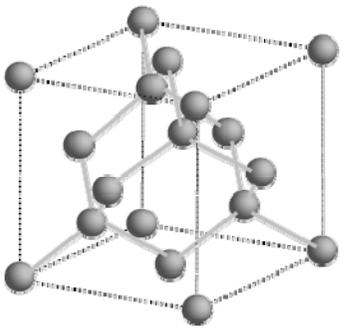
Semicondutor intrínseco

- A zero kelvin, a banda de valência está completa e a banda de condução vazia.
- Excitação térmica produz **ionização**: elétron salta da BV para BC e cria buraco eletrônico.
- Numa situação de equilíbrio, existem **n** elétrons na banda de condução e **p** buracos na banda de valência.
 $n = p = n_i = n^0$ portadores intrínsecos
- Continuamente ocorre Ionização e recombinação (volta de elétron para BV).

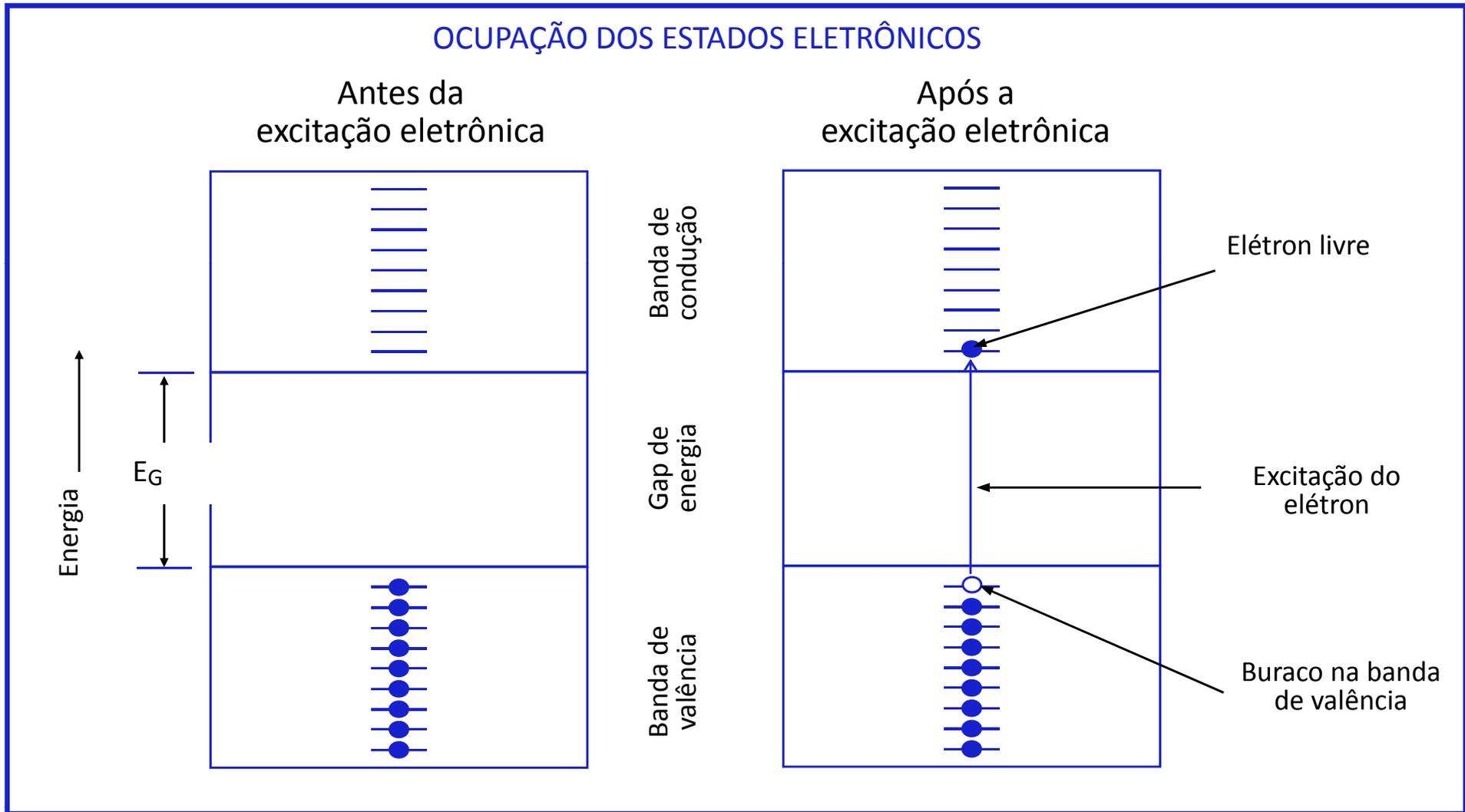


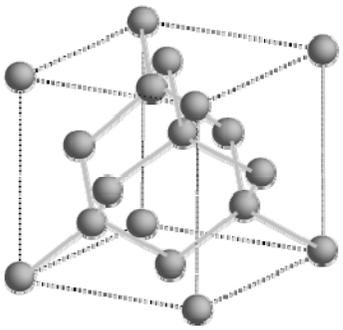


Gap de energia:
foi dado em PMT 3100:



Gap de energia: foi dado em PMT 3100:





n_i

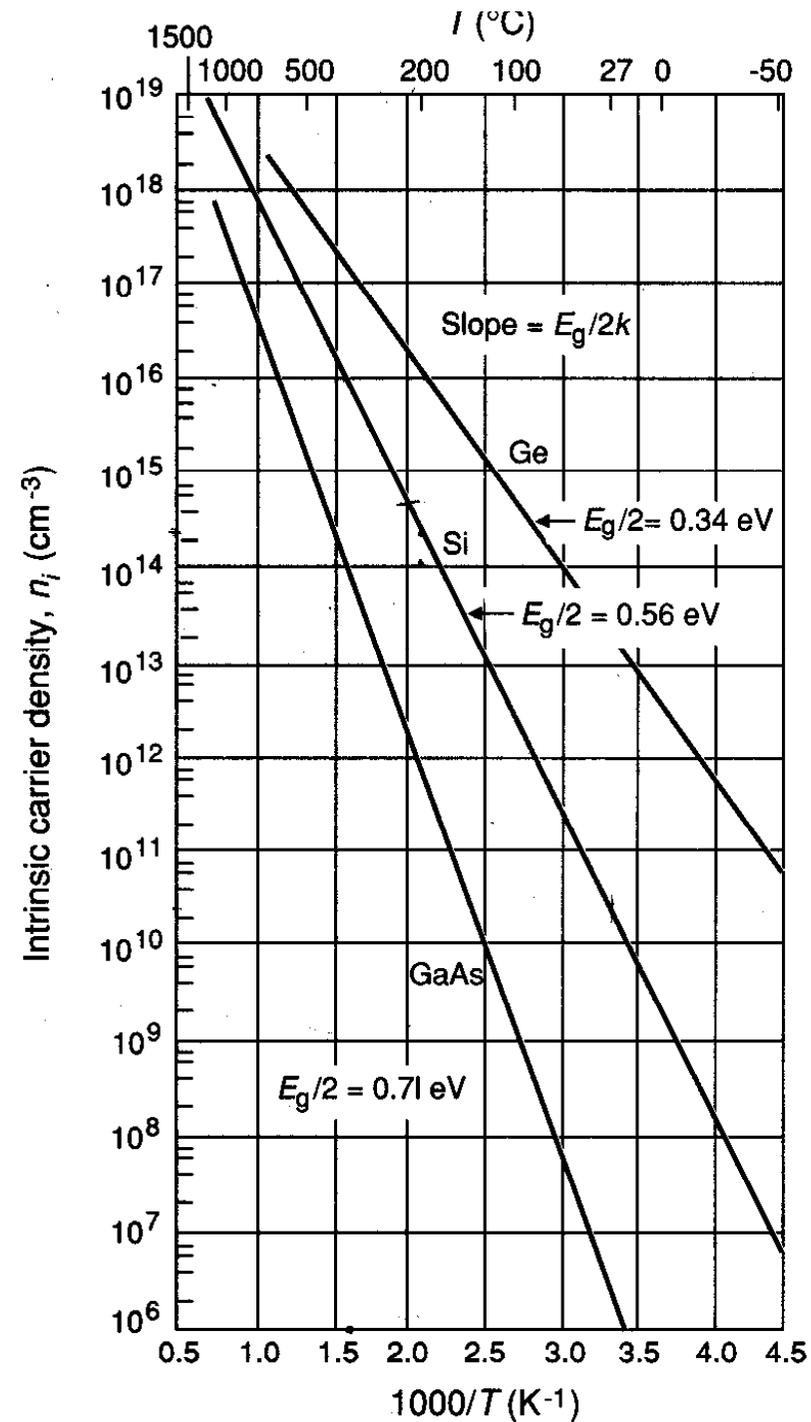
$$n_i = A e^{-E_{\text{gap}} / 2kT}$$

n_i é a densidade de portadores intrínsecos (intrinsic carrier density), em cm^{-3}

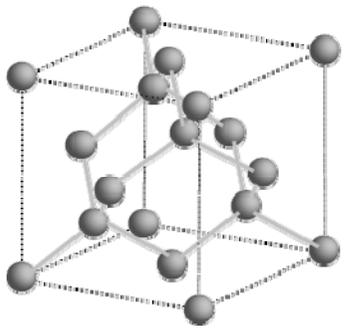
Aumento de T aumenta n_i

Silício não dopado, a T_{amb} tem $1,5 \times 10^{10}$ portadores/ cm^3

Relembrando, Silício tem 8×10^{22} átomos/ cm^3
aprox. 2 portadores/ 10^{13} átomos



Intrinsic carrier densities versus $1/T$ K in Si, Ge, and GaAs.



Dopagem de Materiais semicondutores

Existem basicamente dois métodos para dopagem para semicondutores

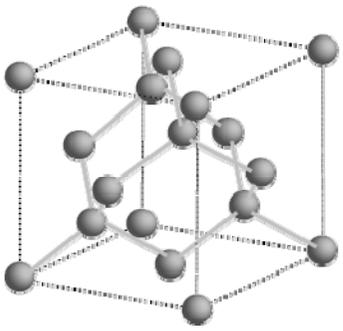
•Difusão térmica

- A fonte de impureza pode estar no estado gasoso ou sólido
- Temperaturas entre 800 e 1200°C
- Utilizadas para obtenção de junções profundas

•Implantação Iônica

- O elemento dopante é acelerado contra o substrato
- Após o processo de implantação é realizado um tratamento térmico (recozimento) para ativação da impureza
- Utilizada para obtenção de junções rasas





Dopagem

- Adição de elementos químicos tri ou pentavalentes aumenta quantidade de lacunas ou elétrons no semicondutor, que passa a ser

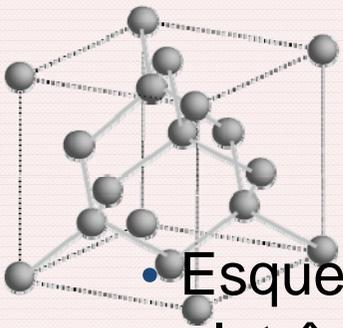
“extrínseco do tipo p ou n”.

- Cada átomo de dopante trivalente (“aceitador de elétrons”) introduz um buraco na BV. Como o portador majoritário passa a ser o buraco, esse material é chamado “tipo p”. O dopante trivalente mais utilizado em tecnologias de Silício é o **Boro**.
- Para obtenção de Silício tipo n o dopante pentavalente é o **Fósforo**.

$$p_p = N_A$$

nº de buracos(p) do material tipo p = nº de átomos dopantes aceitadores.

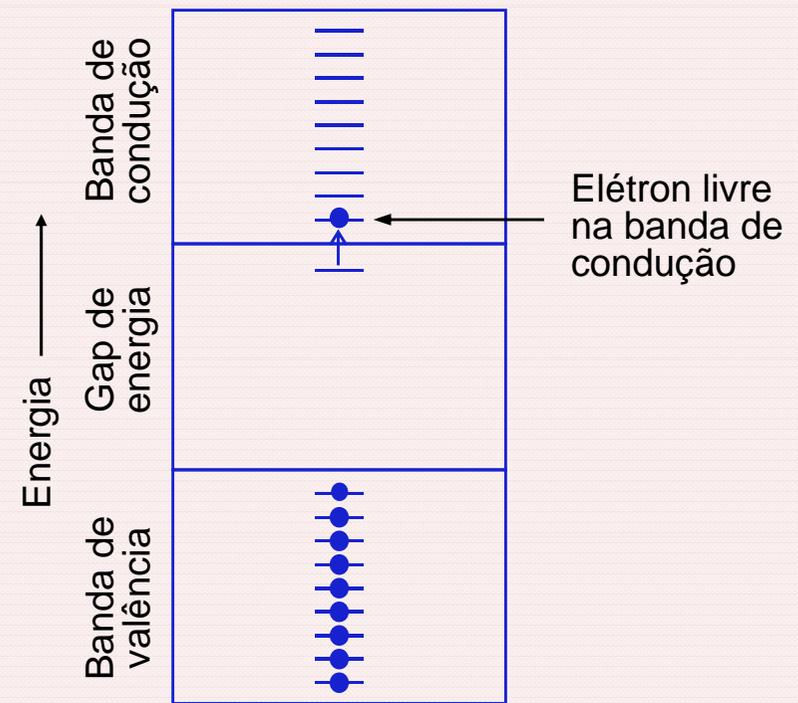
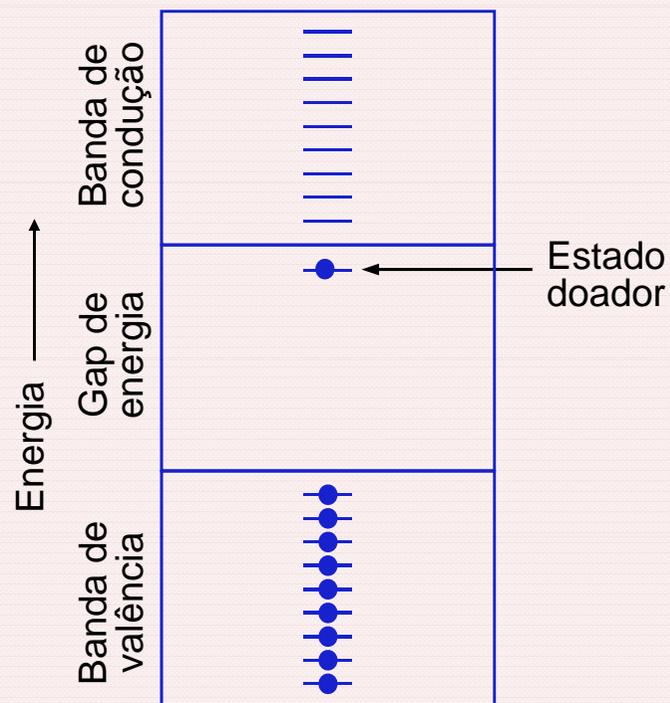
- Material continua neutro, o portador é que é + ou -

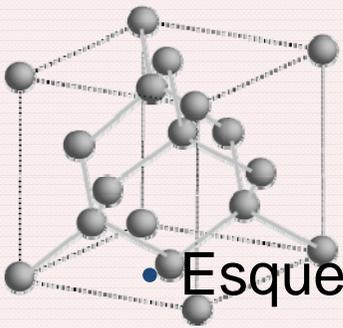


SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS DO TIPO n

- Esquema da banda de energia eletrônica para um nível de impureza doadora localizado dentro do gap de energia, imediatamente abaixo da parte inferior da banda de condução.

- Excitação de um estado doador em que um elétron livre é gerado na banda de condução.

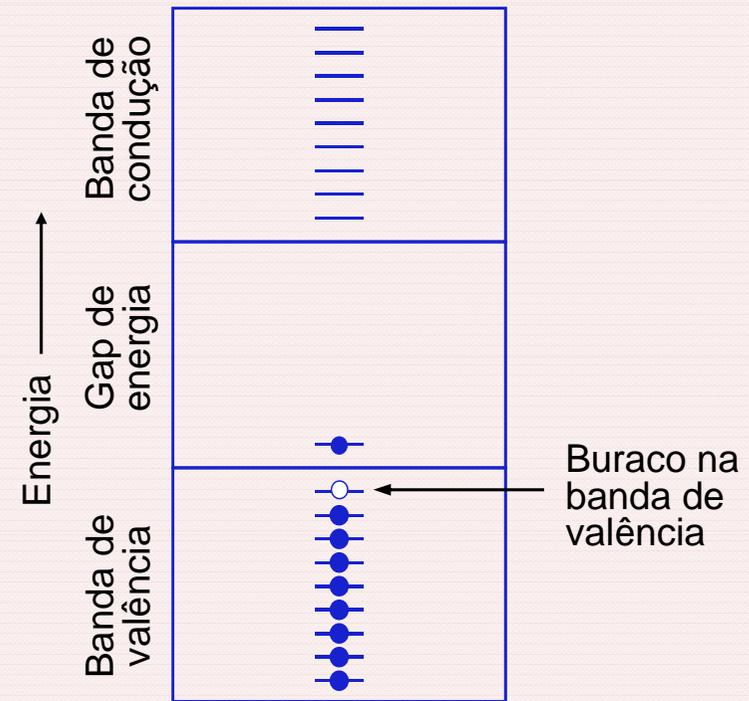
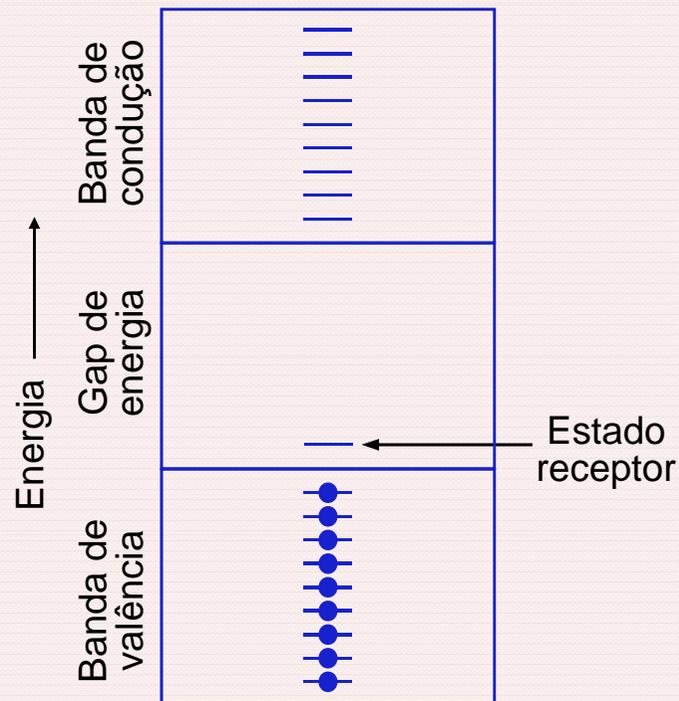


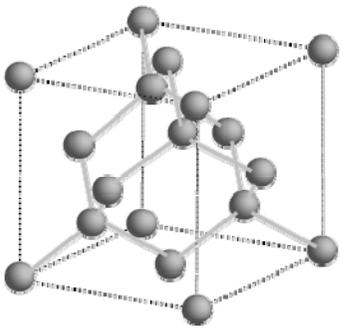


SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS DO TIPO p

- Esquema da banda de energia para um nível de impureza receptora localizado dentro do gap de energia, imediatamente acima da parte superior da banda de valência.

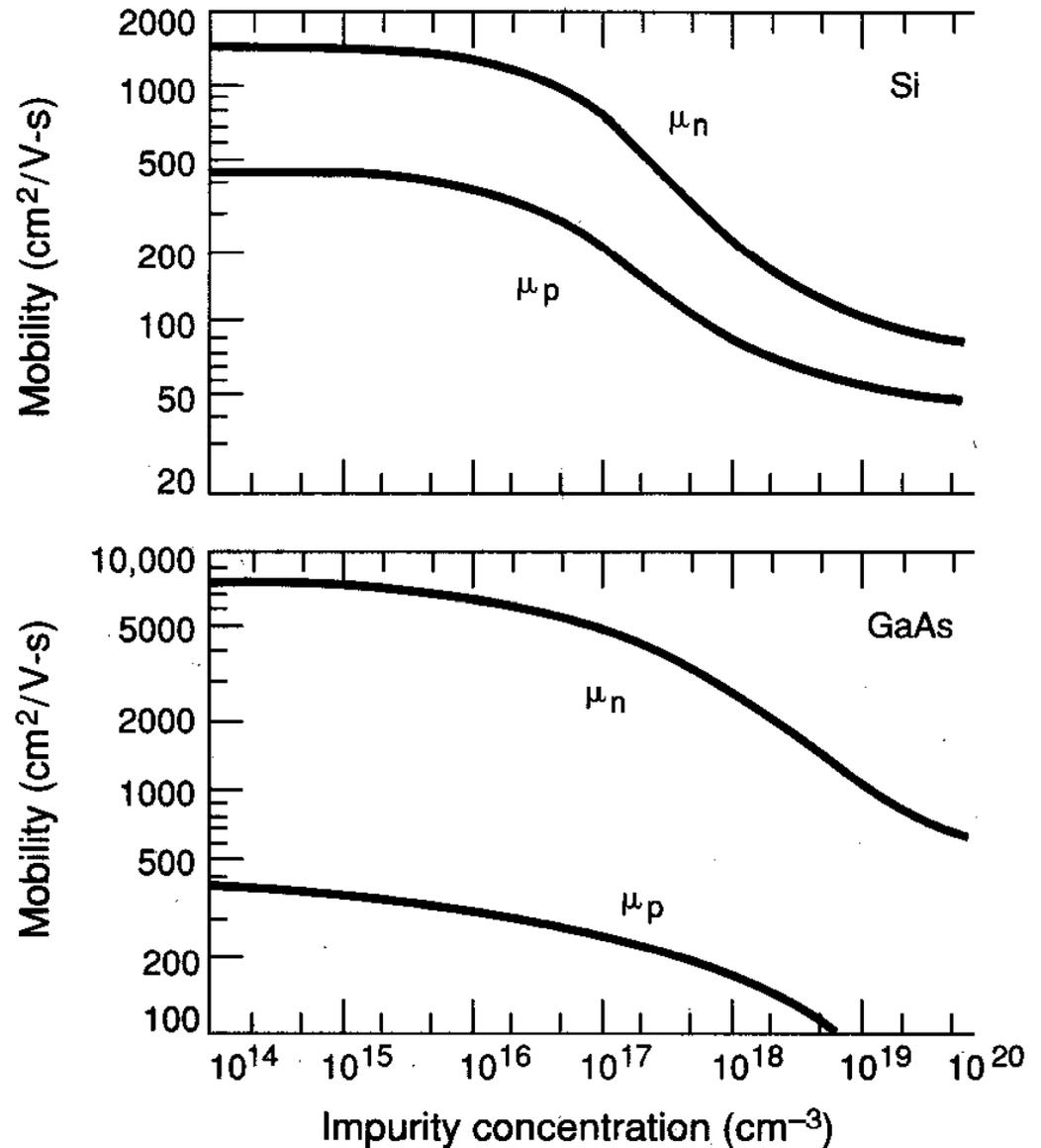
- Excitação de um elétron para o nível receptor, deixando para trás um buraco na banda de valência.



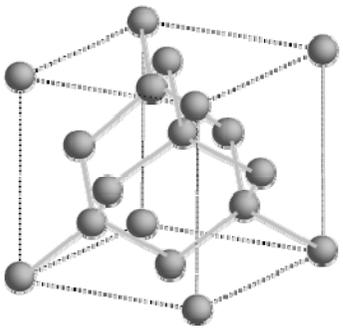


dopagem diminui mobilidade

- Quanto mais impurezas, menor mobilidade



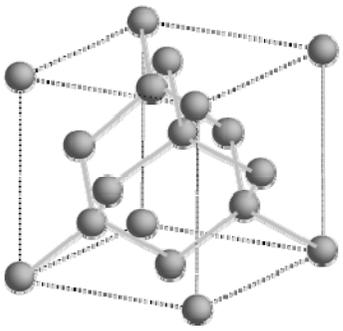
**Agora falaremos sobre
a junção pn**



Condutividade dos semicondutores

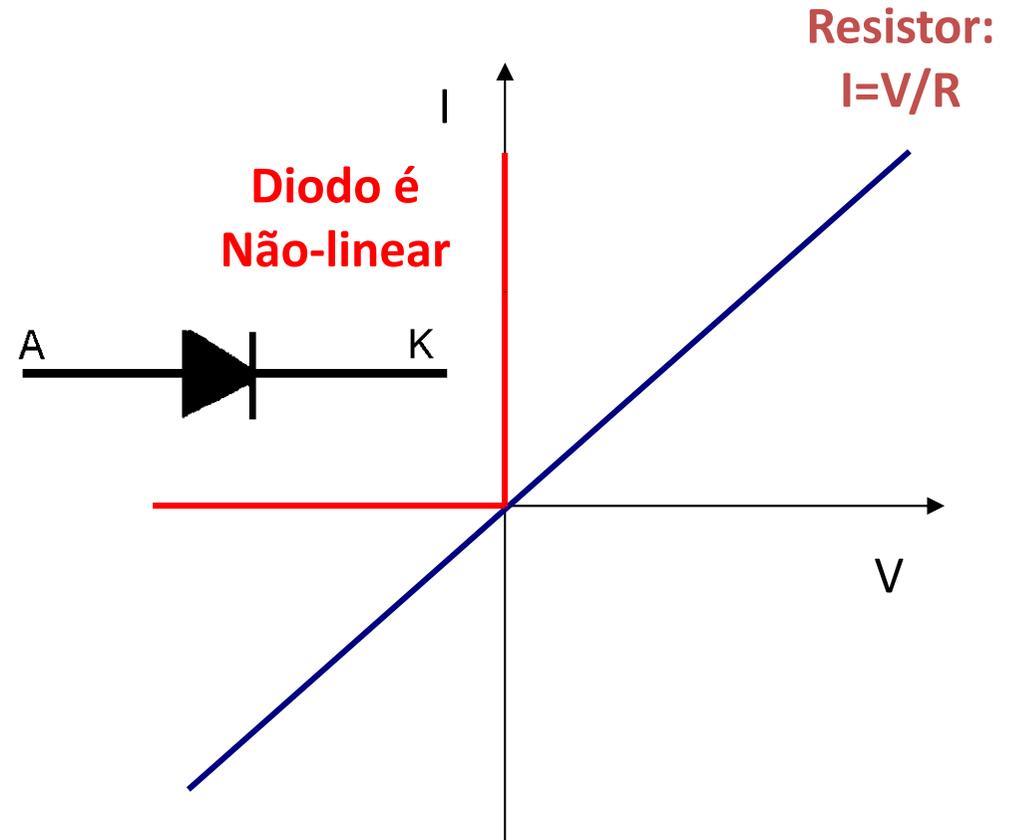
$$\sigma = n_n q_n \mu_n + n_p q_p \mu_p$$

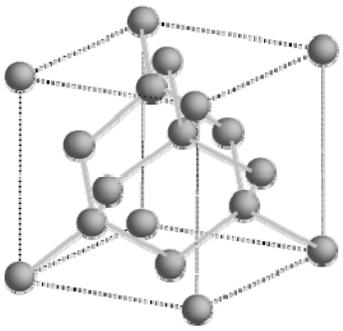
- A condução em semicondutores se dá tanto pela propagação de elétrons livres quanto pela propagação de buracos.
- A carga dos buracos é idêntica à dos elétrons livres exceto pelo sinal.
- A condutividade, portanto, é aumentada pelo incremento do número de portadores (dopagem), mas para níveis elevados de dopagem ela passa a ser limitada pela diminuição da mobilidade, logo há um ponto ótimo para a quantidade de dopantes adicionadas.



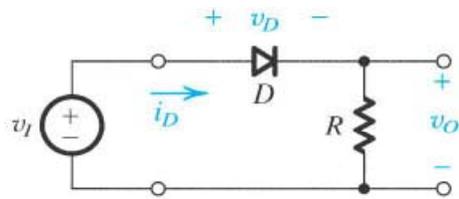
Comparando um resistor e um diodo ideal

- Resistor tem comportamento linear
- Diodo é diferente
 - Se V é negativa, não passa corrente: “operação reversa”.
 - Se V é positiva, “operação direta”.

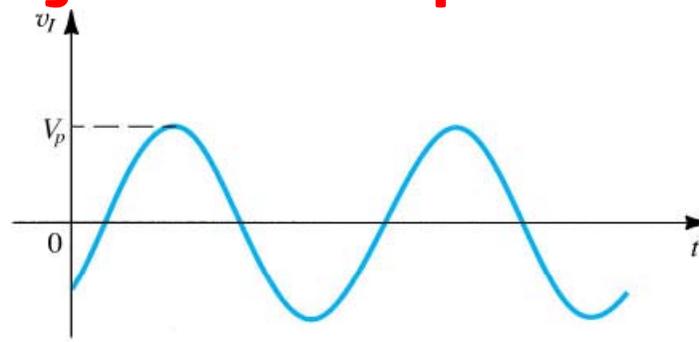




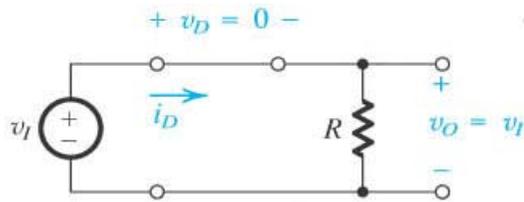
Aplicação simples: retificador



(a)

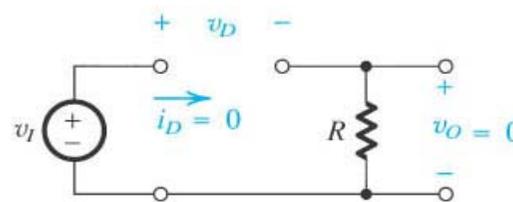


(b)



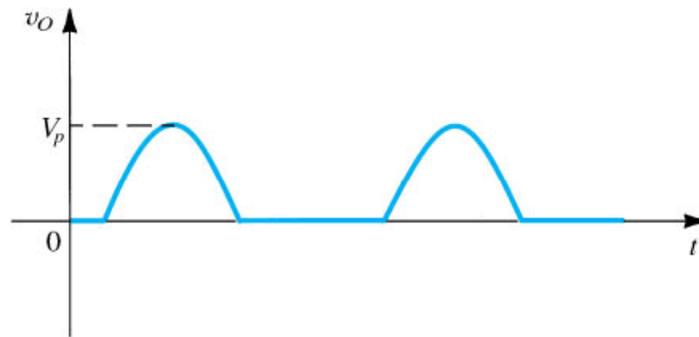
$$v_I \geq 0$$

(c)



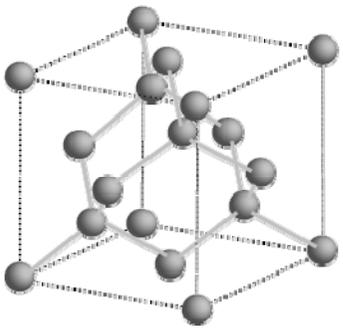
$$v_I \leq 0$$

(d)

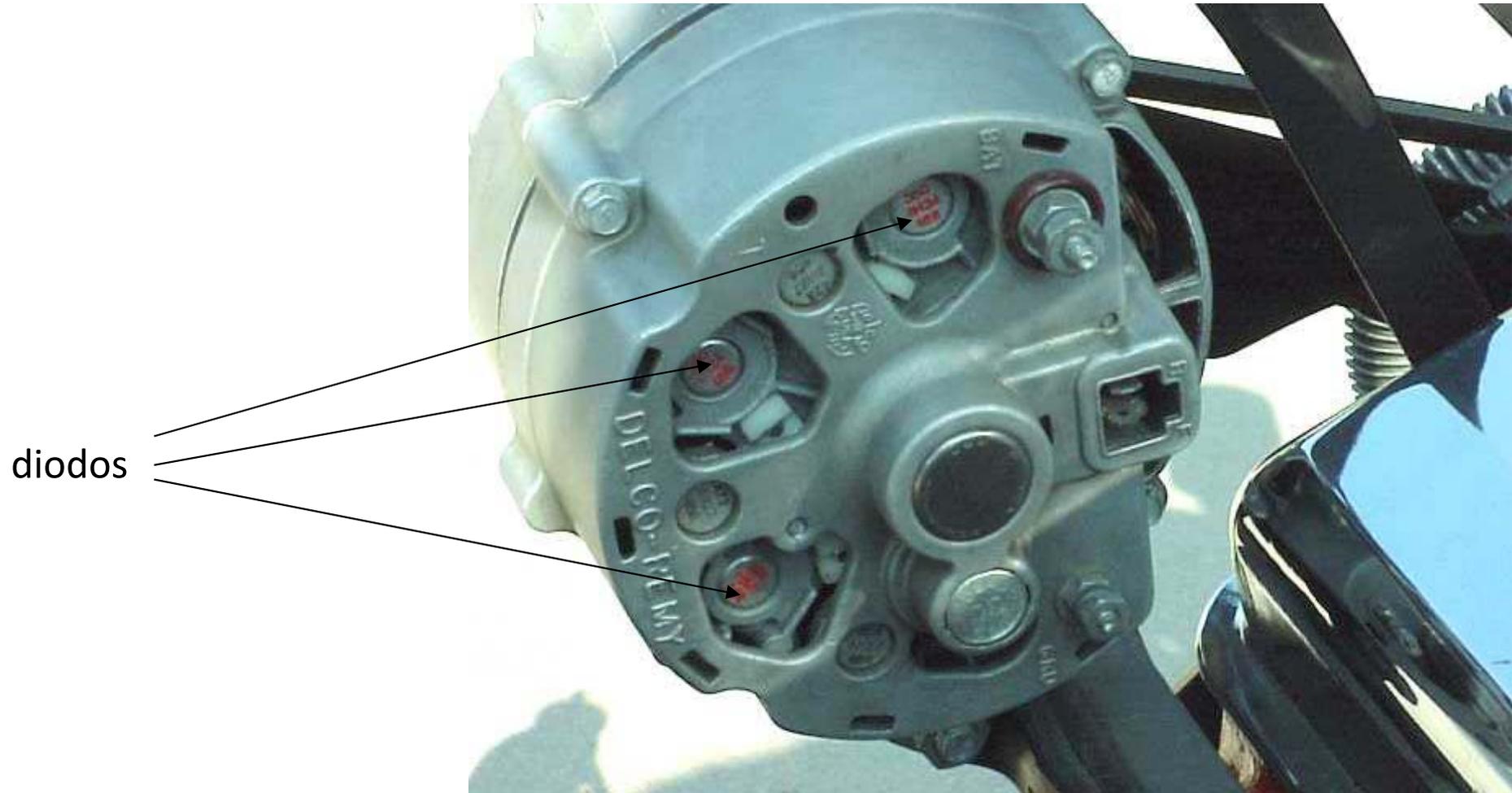


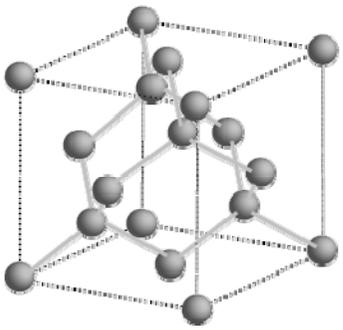
(e)

- Circuito retificador
- Forma de onda de entrada.
- Circuito quando $v_f > 0$
- Circuito quando $V_f < 0$
- Forma de onda de saída



Diodos no alternador do automóvel





Diodo real

Polarização direta:

$I = I_s(e^{qV/nkT} - 1)$, (equação de Shockley) onde I_s é chamada “corrente de saturação”

tipicamente 10^{-15} A

q é carga do elétron, $q=1,6 \cdot 10^{-19}$ C

k é a constante de Boltzmann

T é temperatura em K

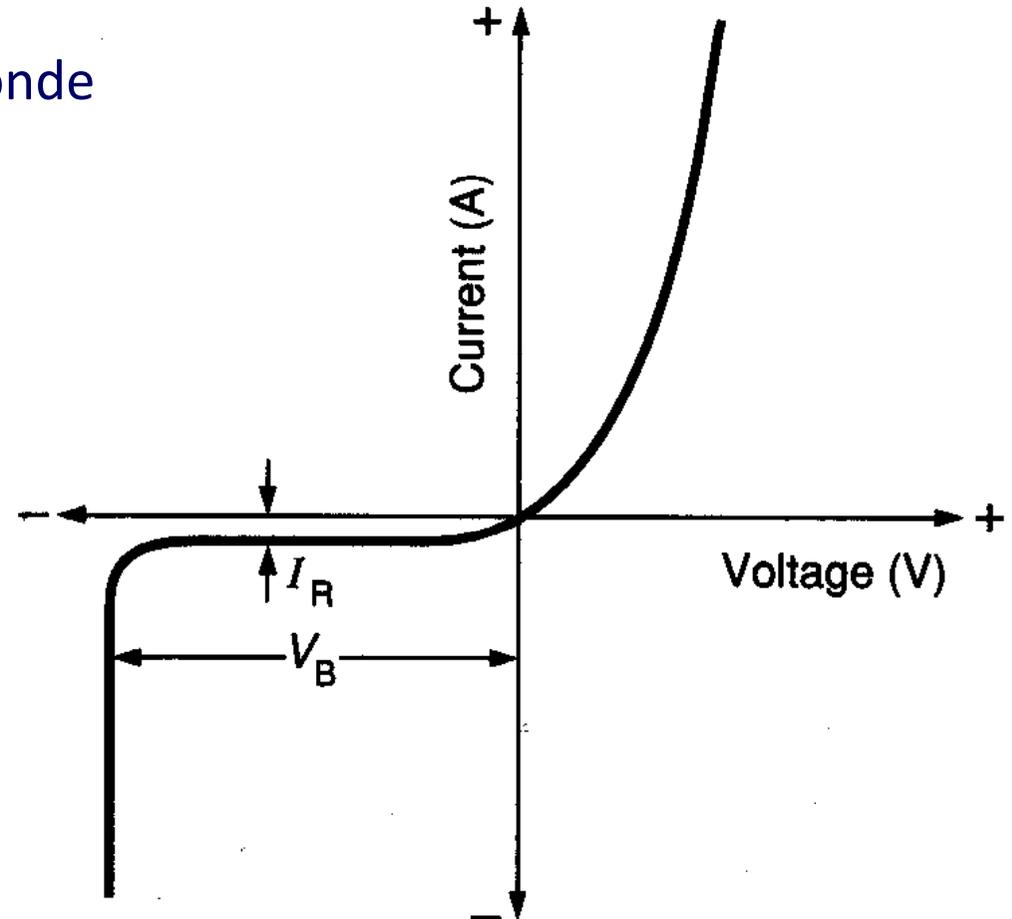
n é constante do diodo,

entre 1 e 2

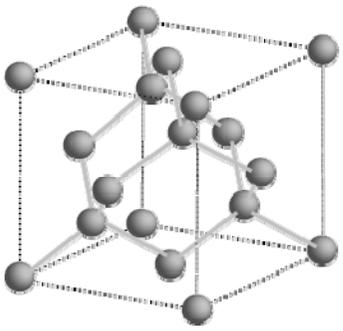
Polarização reversa

I_R corrente reversa = 1nA

V_B ou V_Z , Tensão de ruptura,
tensão de Zener



Current–voltage characteristics of a diode.



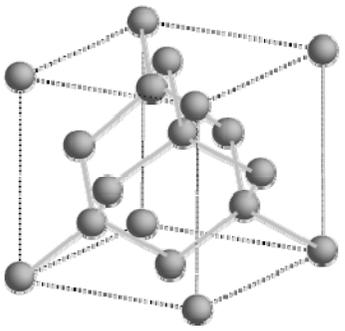
“Tensão térmica”

- Na equação de I aparece q/kT .
- kT/q tem unidade de “tensão térmica”, chamada de V_T .

- À T_{amb} :

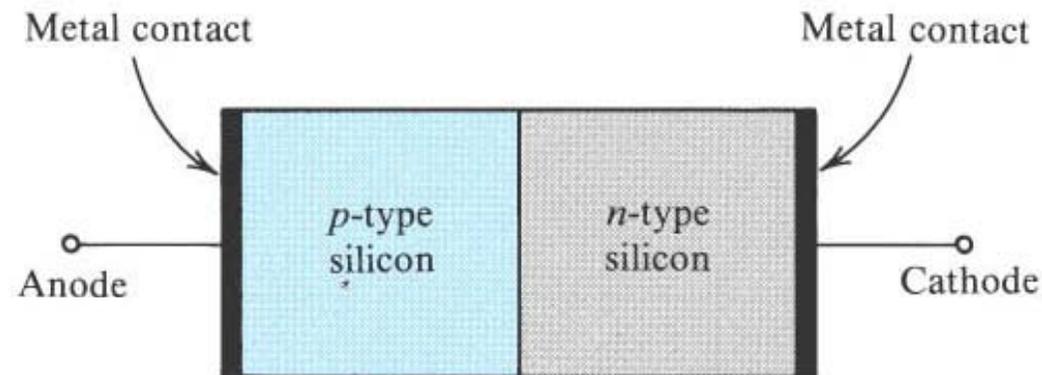
$$V_T = (1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}) \times 300 \text{ K} / (1,6 \times 10^{-19} \text{ C}) = 0,025 \text{ V.}$$

- Reescrevendo $I = I_s (e^{qV/nkT} - 1) \sim I_s e^{V/nV_T}$,
- Mas como “funciona” o diodo?

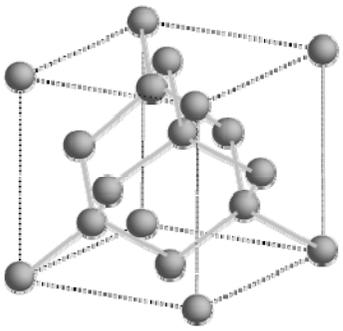


Operação física dos diodos

- Diodo é fabricado fazendo uma junção entre dois semicondutores dopados.



- Programa da aula
 - Conceitos básicos de semicondutores
 - Junção **pn** em circuito aberto



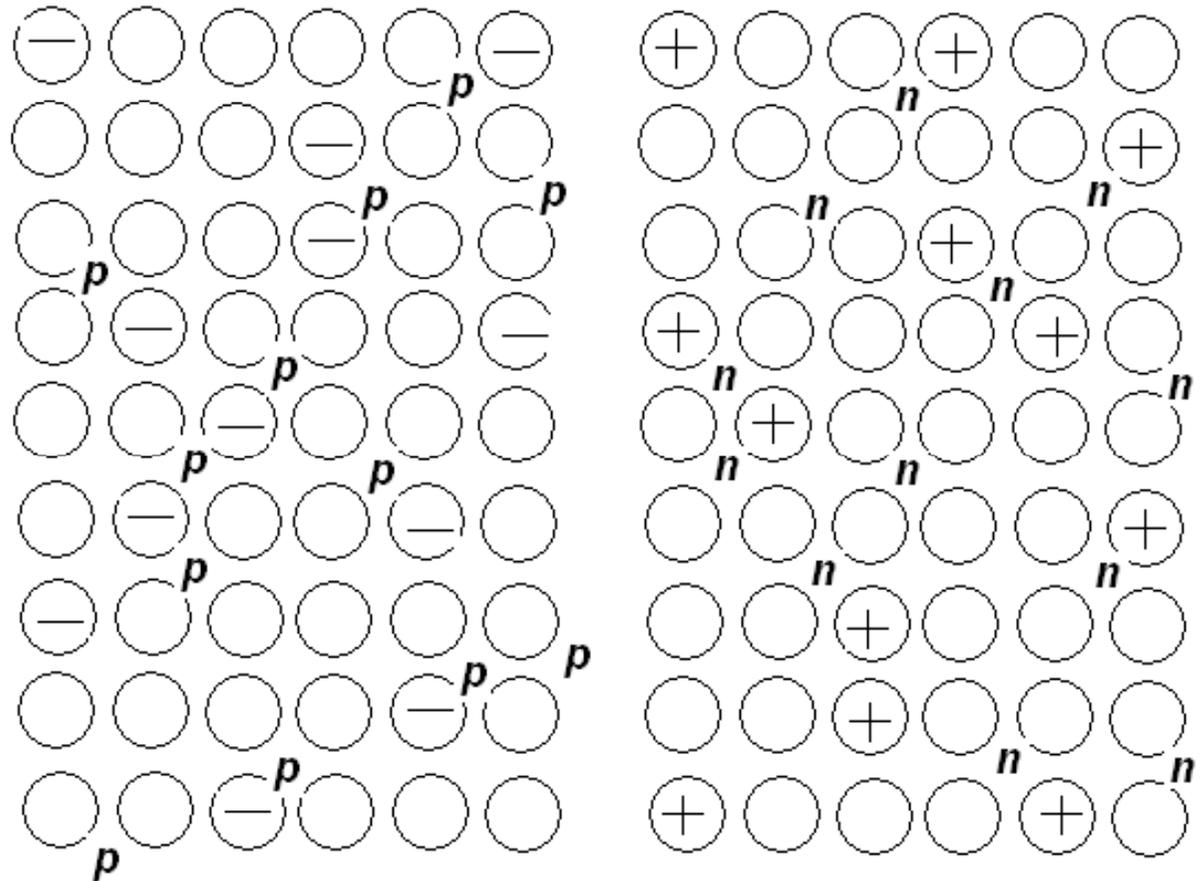
Materiais p e n antes da junção

Os círculos representam átomos.

A imensa maioria dos átomos é de silício.

O lado p está dopado com Boro (B)

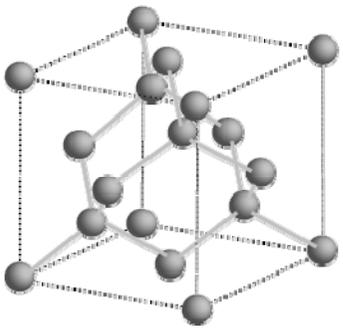
O lado n está dopado com fósforo (P).



Lado P está dopado com alguns átomos

ACEITADORES de elétrons, que tem 3 elétrons na b.v. Isso cria **buracos móveis "p"** mas o átomo dopante fica com um elétron a mais, é a **carga fixa negativa** (anions imóveis).

No lado n ocorre o processo inverso e os dopantes se tornam cátions imóveis.

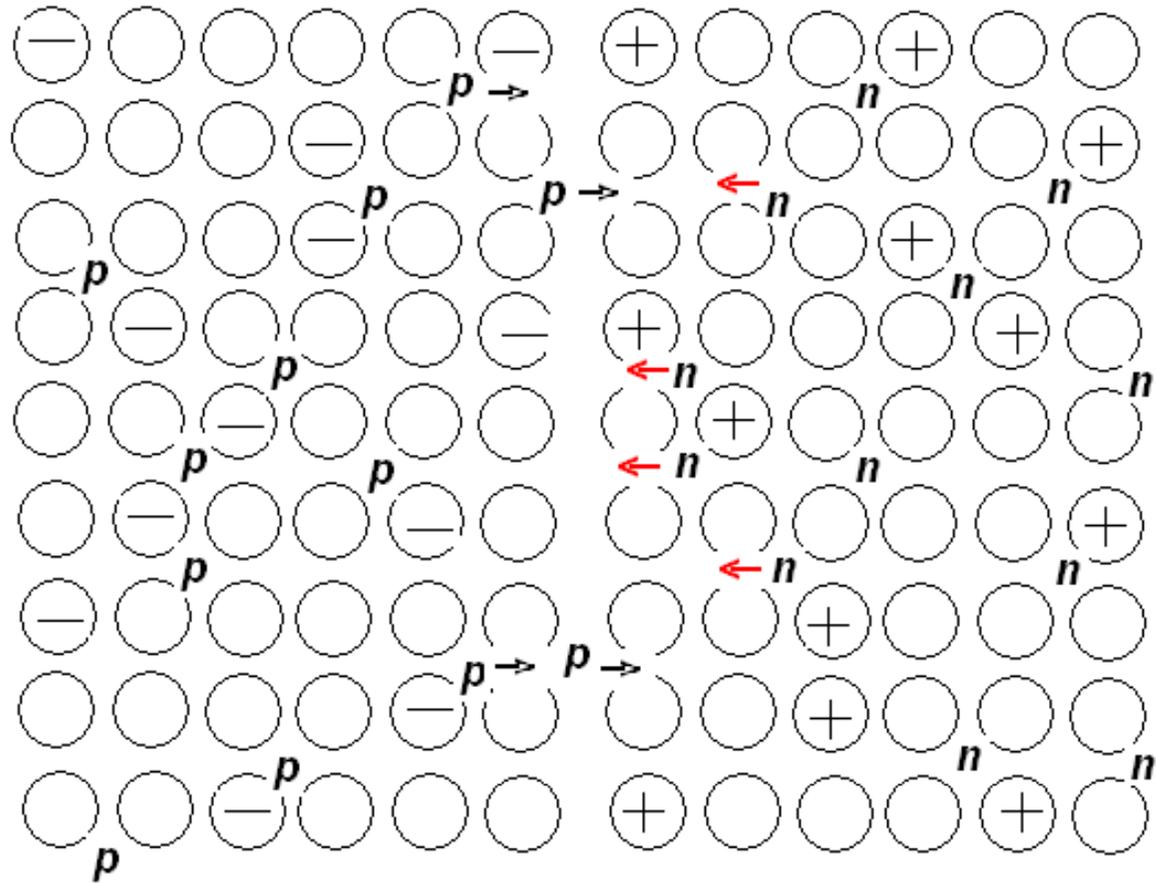


Quando ocorre a junção entre p e n

Existem **poucos elétrons** na b.c.
do lado p
existem **muitos elétrons** na b.c.
do lado n
elétrons vão de **n** para **p**,

existem muitos buracos na b.v.
do lado p
existem poucos buracos na b.v.
do lado n
buracos vão de **p** para **n**

Corrente de difusão I_D não é
induzida por campo elétrico

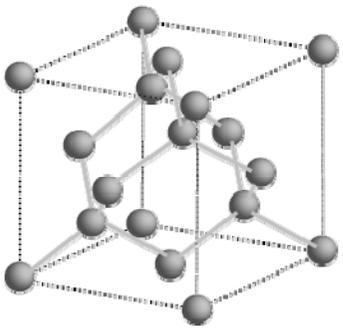


← elétrons

buracos →

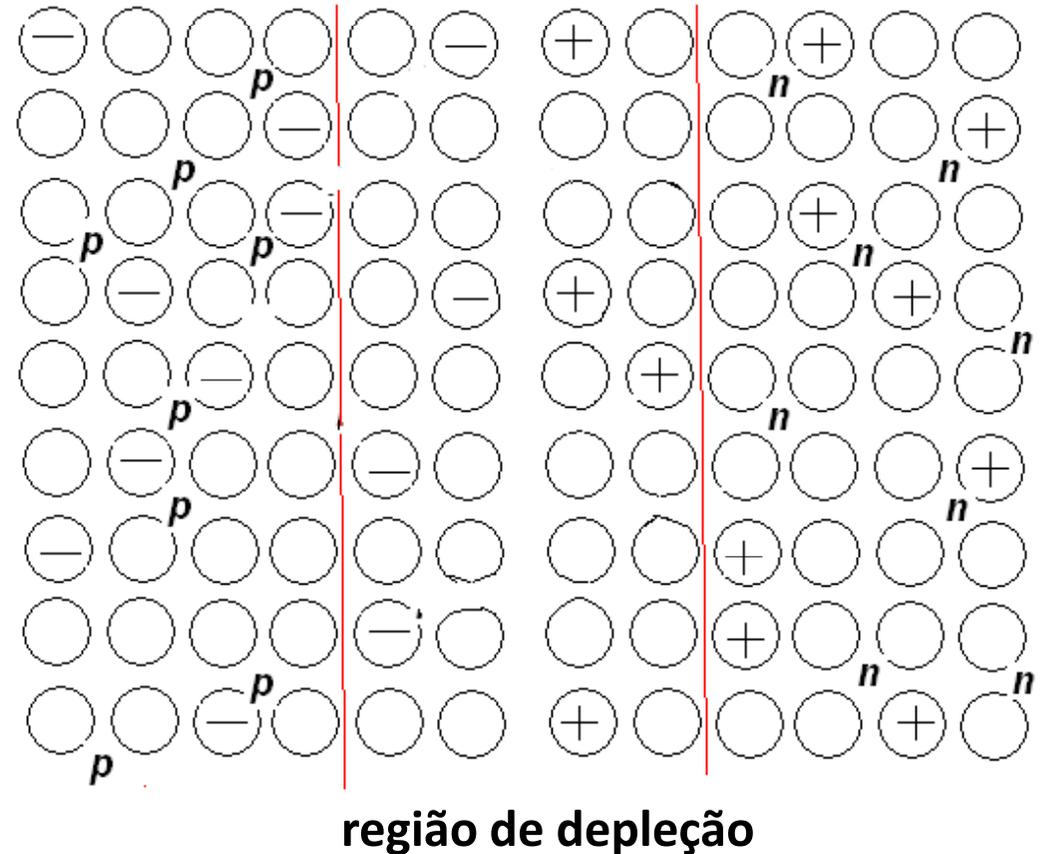
I_D →

surge **Corrente de difusão I_D**

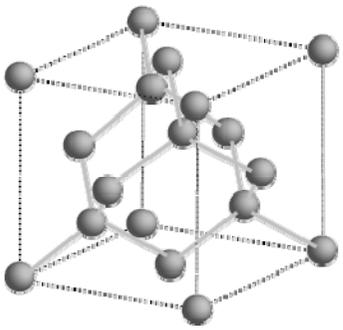


Região de depleção

- Os elétrons da região n injetados na região p, se recombinaam com os buracos da região p
- O **diodo** é eletricamente neutro, mas na fronteira da região p com a região vizinha, agora tem excesso de **íons negativos**.
- Vice versa no lado n
- Surge um campo elétrico intrínseco



O lado n fica com região positiva
 O lado p fica com região negativa
 Isso cria um Campo Elétrico, contrário à corrente de difusão, diminuindo o movimento dos portadores



tensão de barreira V_0

Resultante do campo elétrico criado na região de depleção

Age contrariamente à corrente de difusão.

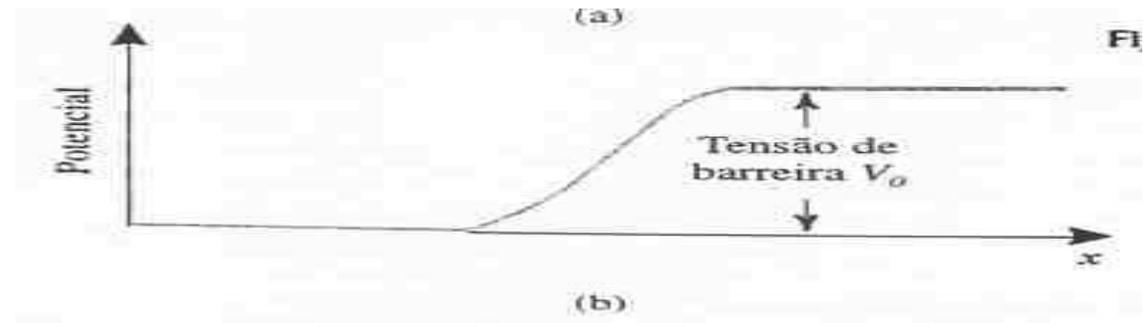
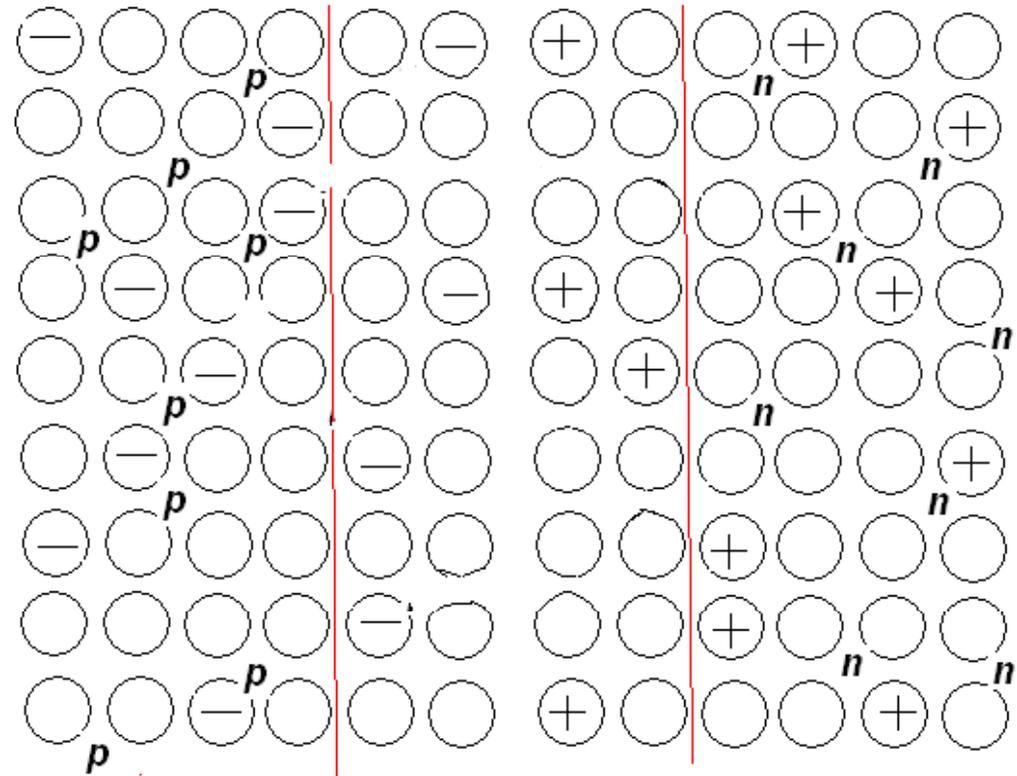
A corrente de difusão I_D é muito dependente de V_0

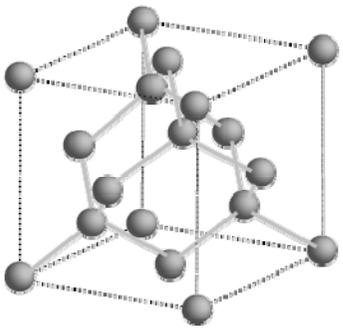
V_0 depende de N_A e N_D .

$$V_0 = V_T \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$$

para diodo de Si comum a 25°C, V_0 é da ordem de 0,7V .

V_T = tensão térmica = kT/q

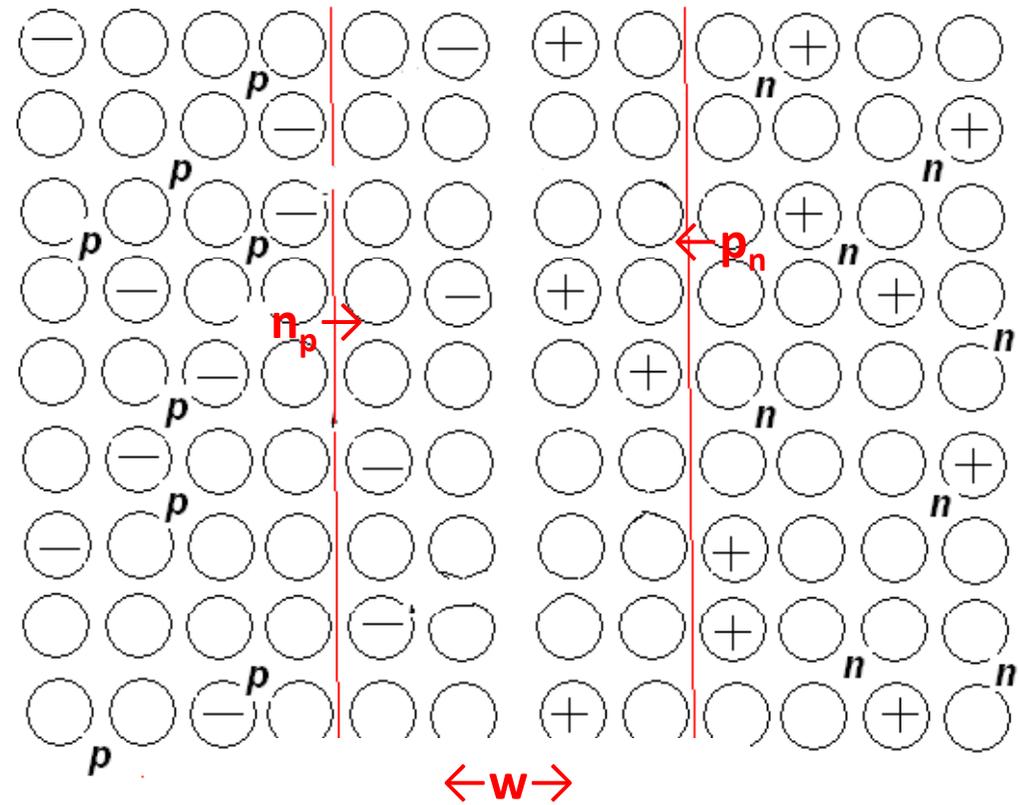




Corrente de deriva I_s

A tensão de barreira é contrária ao movimento dos portadores majoritários,
Mas ela acelera os portadores minoritários

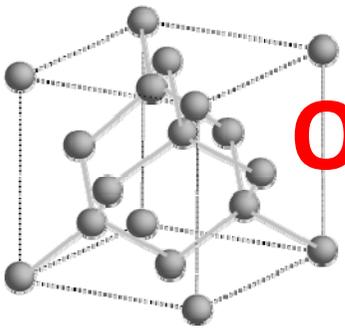
Lado p tem poucos elétrons na b.c. Os elétrons que cruzarem a fronteira da zona de depleção serão acelerados para lado n. Vice versa no lado n



$$I_s = A \cdot \sigma \cdot E = A \cdot (n \cdot q \cdot \mu) \cdot E$$

A área da seção transversal
n é nº portadores minoritários
 μ é a mobilidade do portador
E é campo elétrico na região de Depleção
 $E = V_o / w$



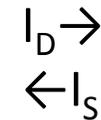
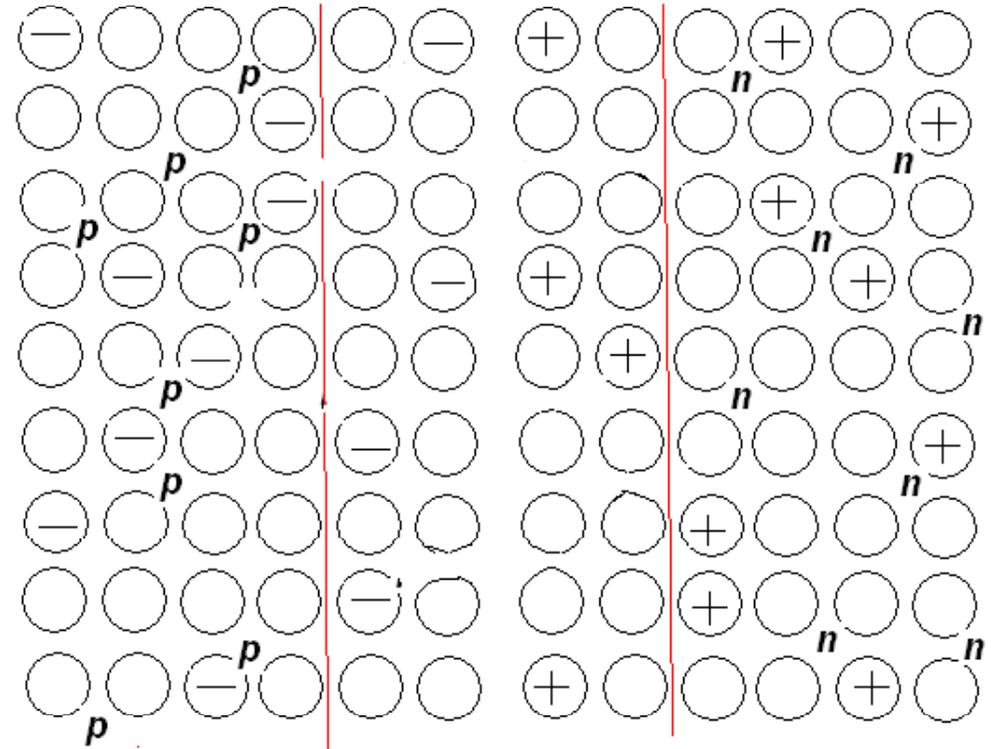


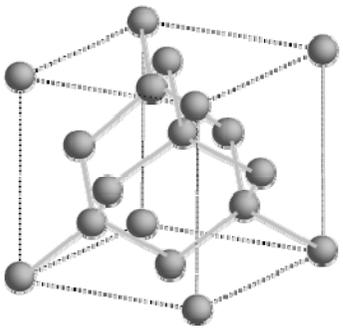
O equilíbrio entre I_D e I_S no circuito aberto.

- I_D flui de p para n
- I_S flui de n para p
- Em circuito aberto não há corrente resultante

$$I_S = I_D$$

- É uma condição auto-equilibrada.





A largura da camada de depleção

Existe região de depleção dos dois lados da junção.

Como os níveis de dopagem dos dois lados não são iguais, as larguras não são iguais.

O lado **menos dopado** terá camada **mais espessa**.

Igualando as cargas dos dois lados:

(Carga de cada portador * n° portadores * volume)

$$q N_A x_p A = q N_D x_n A$$

$$\frac{x_n}{x_p} = \frac{N_A}{N_D}$$

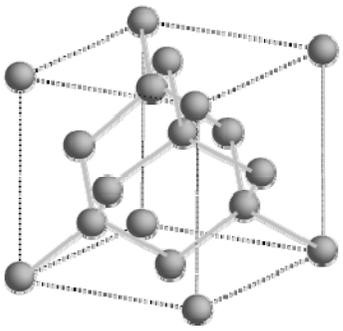
Largura total:

$$W_{dep} = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_{Si}}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) * V_0}$$

onde a permissividade elétrica do silício $\epsilon_{Si} = \epsilon_r \epsilon_0 = k \epsilon_0 = 1,04 \cdot 10^{-12} \text{F/cm}$

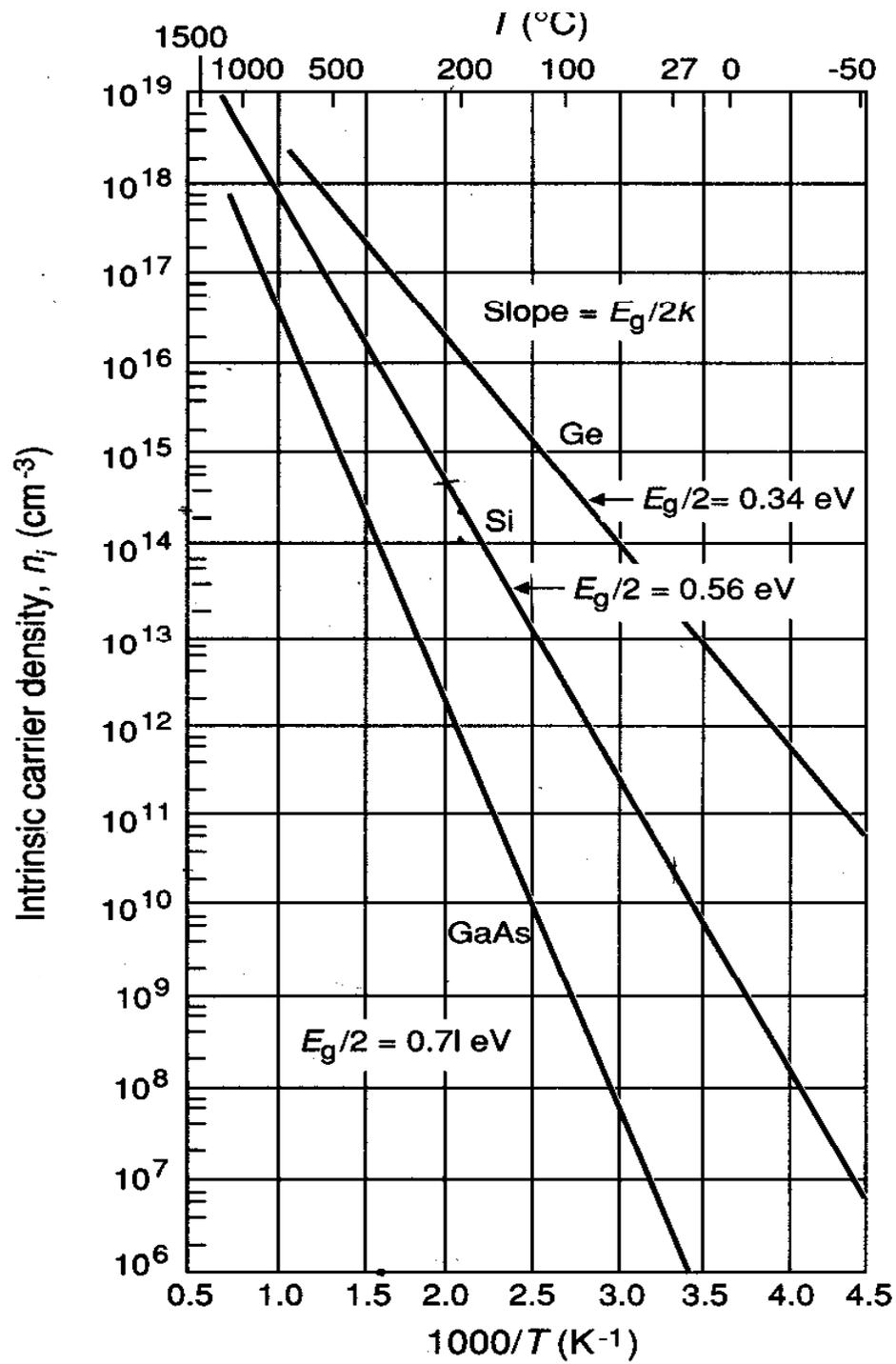
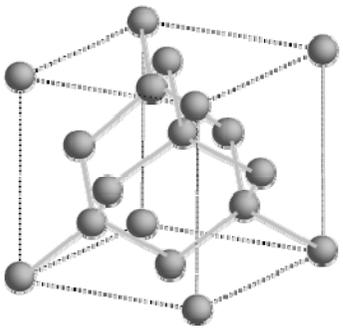
N_A = número de portadores aceitadores

N_D = número de portadores doadores

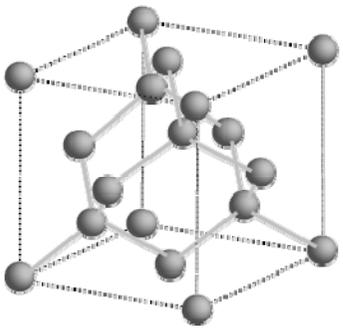


Exercício

- Calcular a tensão de barreira, a largura da região de depleção e a sua extensão do lado p e lado n de um diodo de silício com $N_A=10^{17}/\text{cm}^3$, $N_D=10^{16}/\text{cm}^3$, a temperatura ambiente, dado o gráfico n_i em função da temperatura:
- Respostas: 728 mV; $0,32\mu\text{m}$; $0,03$ e $0,29\mu\text{m}$

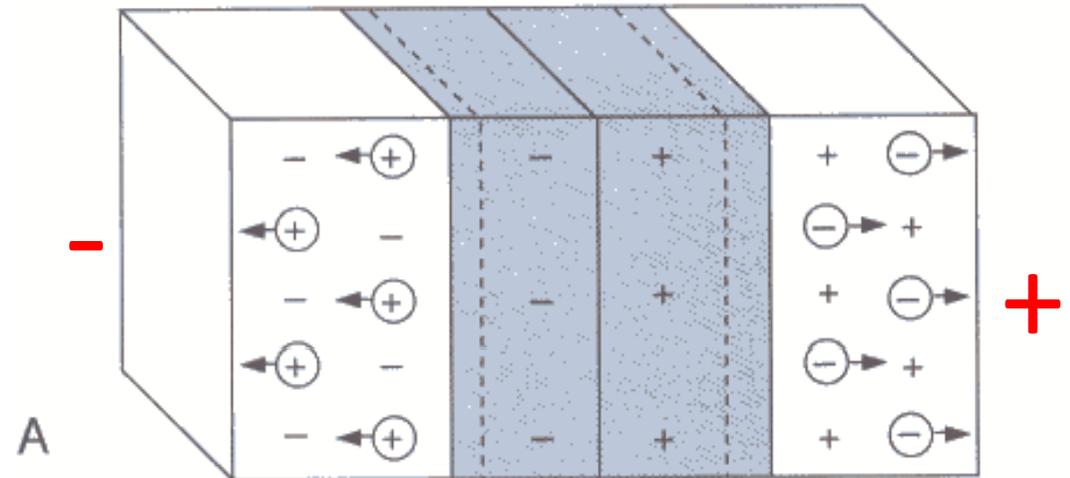


Intrinsic carrier densities versus $1/T$ K in Si, Ge, and GaAs.

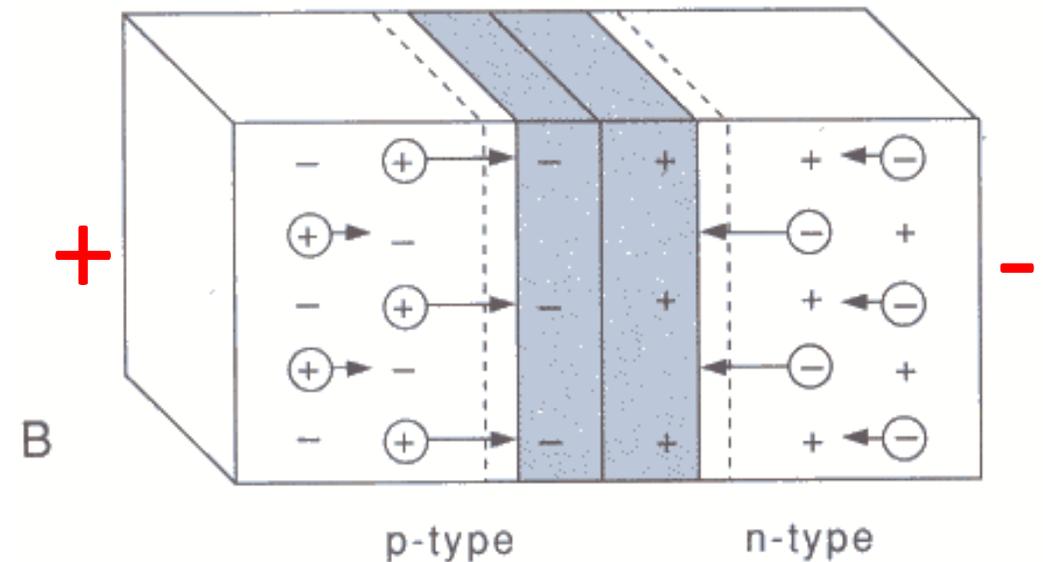


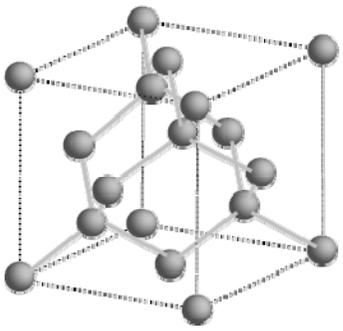
Polarização do diodo

- Polarização reversa:
 (-) no lado p, (+) no lado n
 Z.dep. aumenta
 Não passa corrente



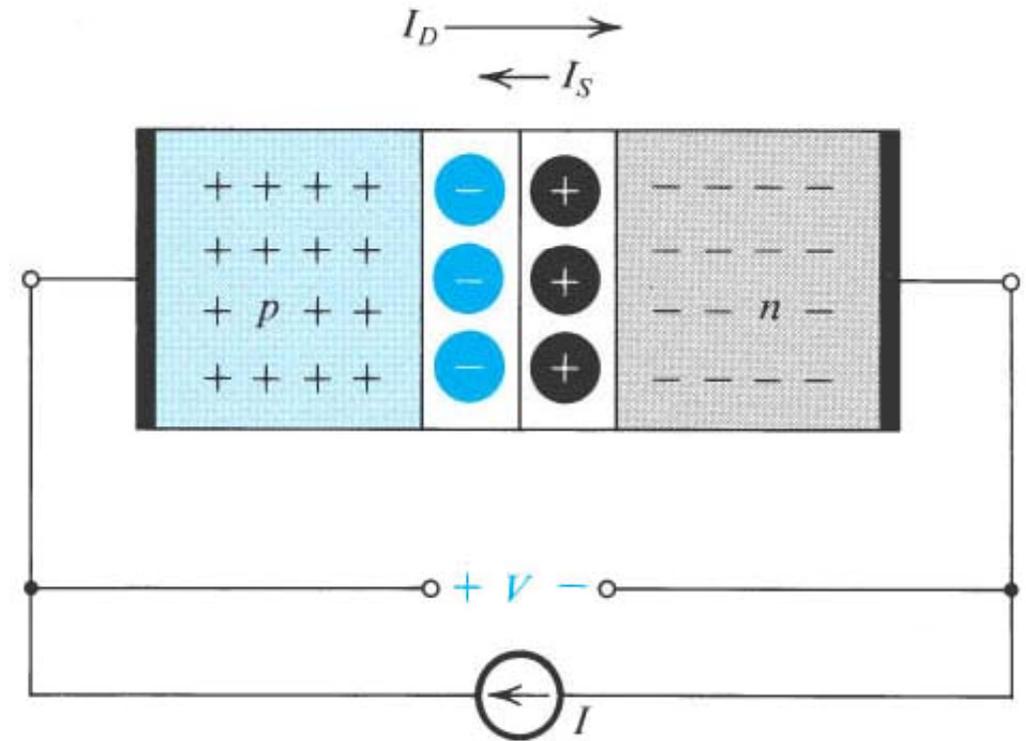
- Polarização direta
 + no lado p, - no lado n
 Z. depl diminui
 Passa corrente
 $I_D > I_s$

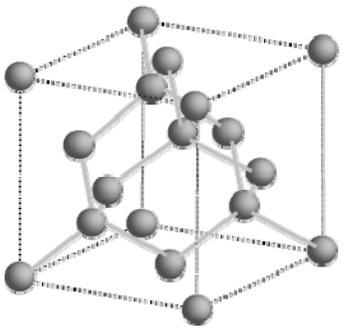




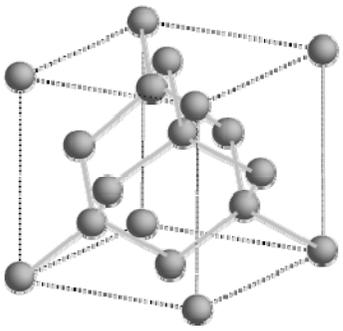
Polarização Direta

- Fonte externa fornece elétrons do lado n e lacunas do lado p.
- Zona de depleção diminui.
- Tensão de barreira diminui.
- Lacunas de p atravessam a Z.D. e são injetadas no lado n.
- E vice versa





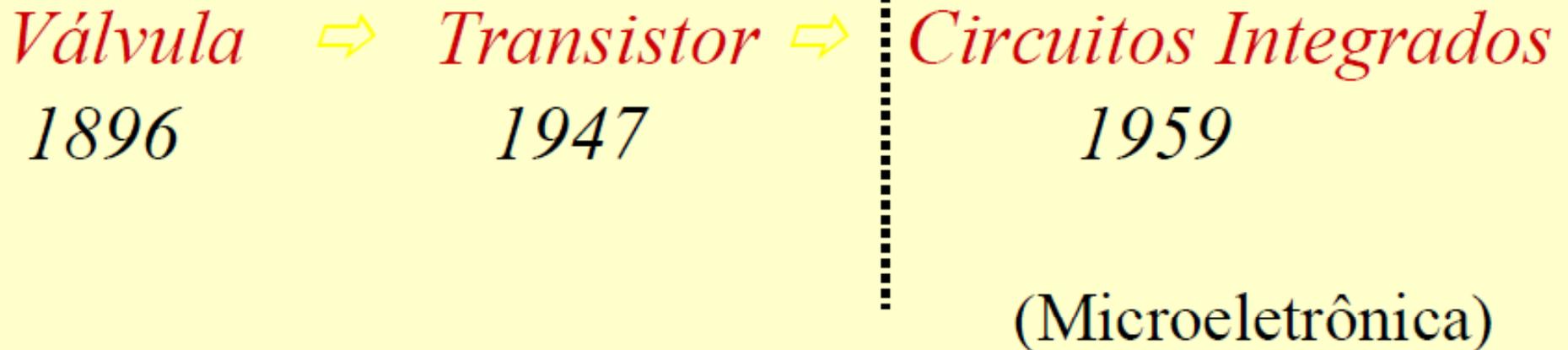
Fim da primeira parte



Transistor

→ *Evolução da Eletrônica*

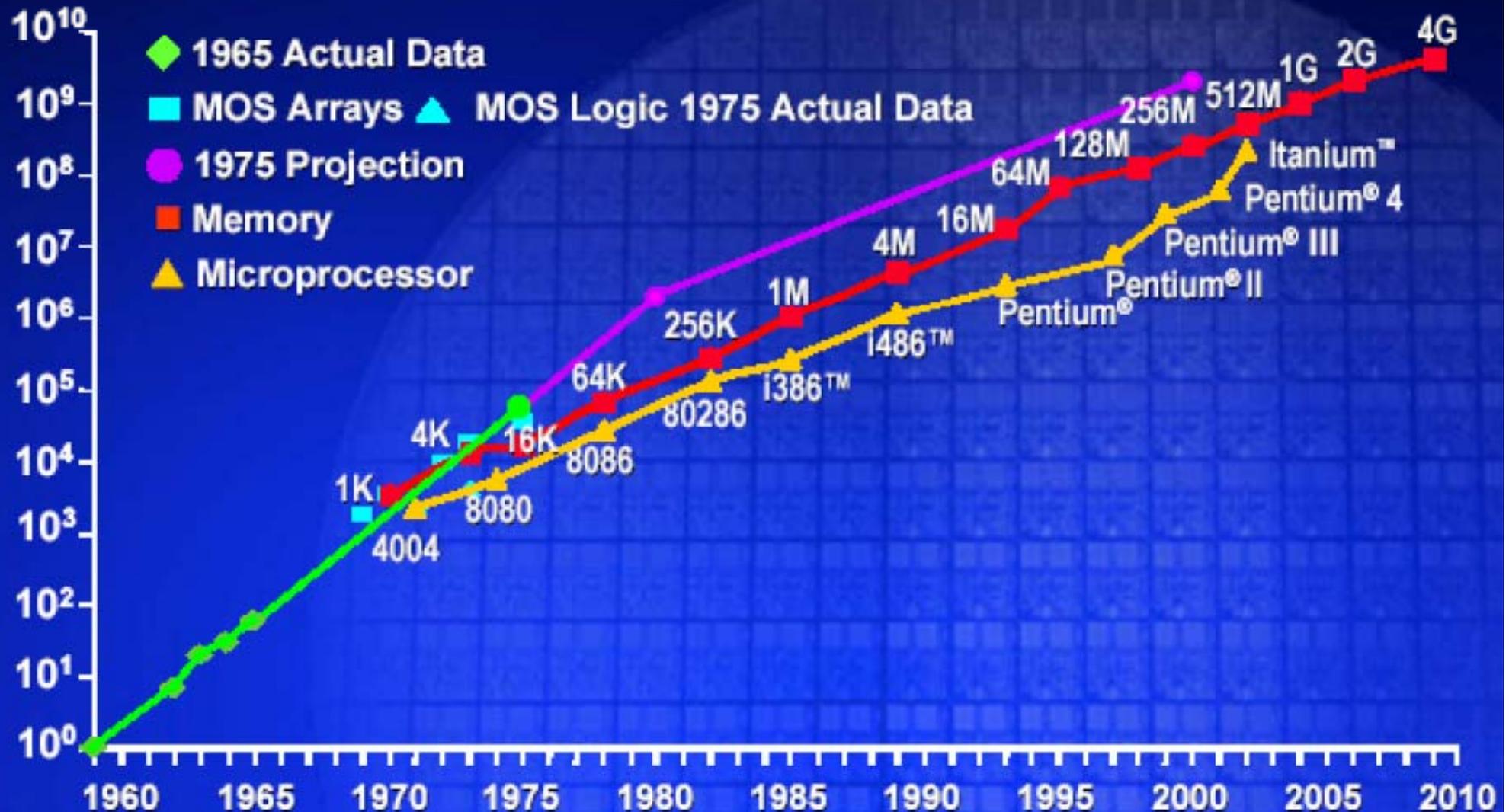
Transistor é um dispositivo semicondutor usado na construção de circuitos lógicos, como os microprocessadores.



Complexidade do Circuito Integrado

Transistors
Per Die

LEI DE MOORE (Gordon Moore – Intel)



Nanotecnologia

Abordagens

- De cima para baixo (*top-down*):

Miniaturização

ex: Lei de Moore - 1965 (microeletrônica):

“O número de componentes eletrônicos em um circuito eletrônico dobrará a cada ano.”

1965: 60 transistores em um chip

1975: 60.000 transistores

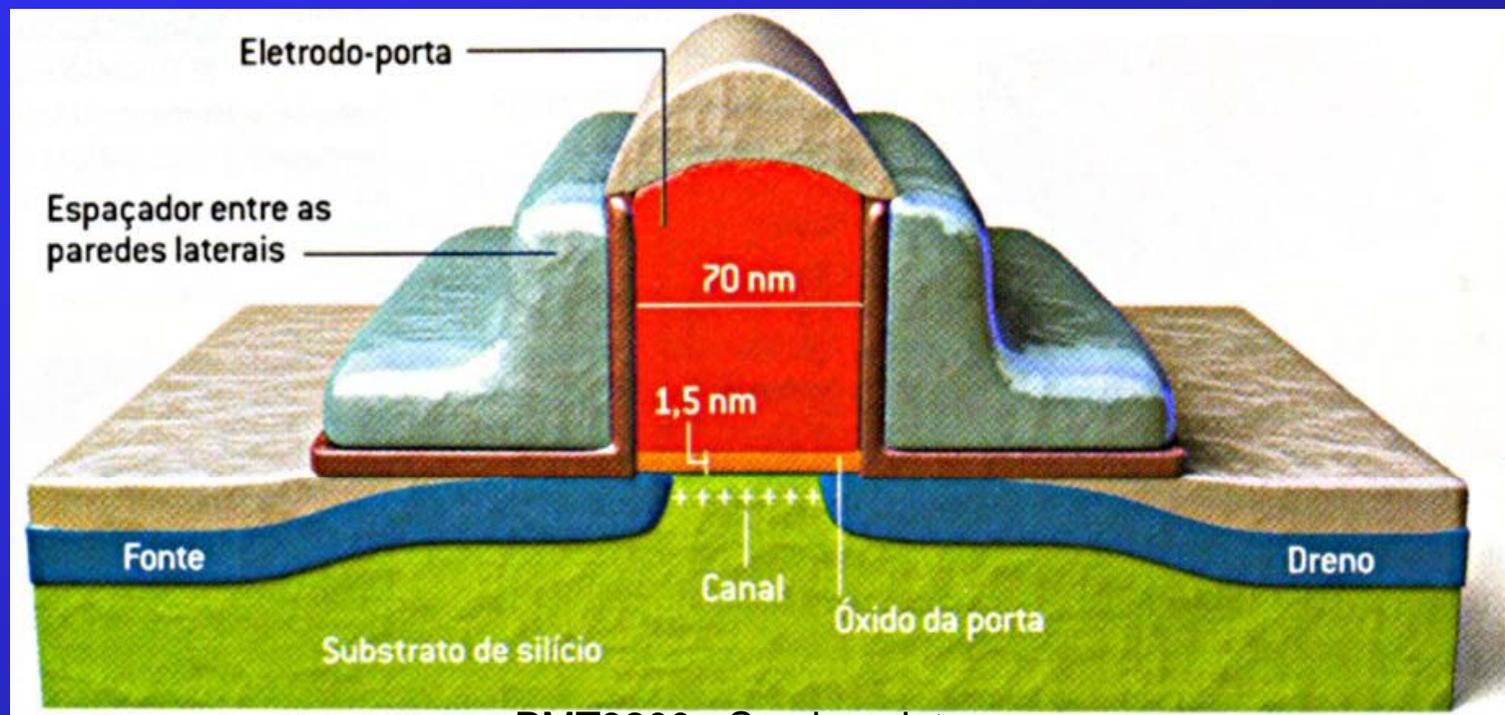
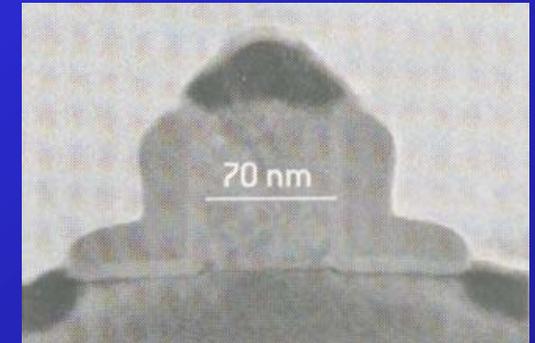
2000: Pentium IV - 42 milhões de transistores com dimensões na casa dos nanômetros

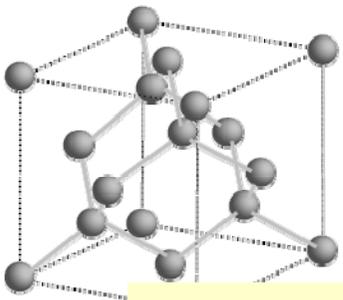
Nanotecnologia

Abordagens

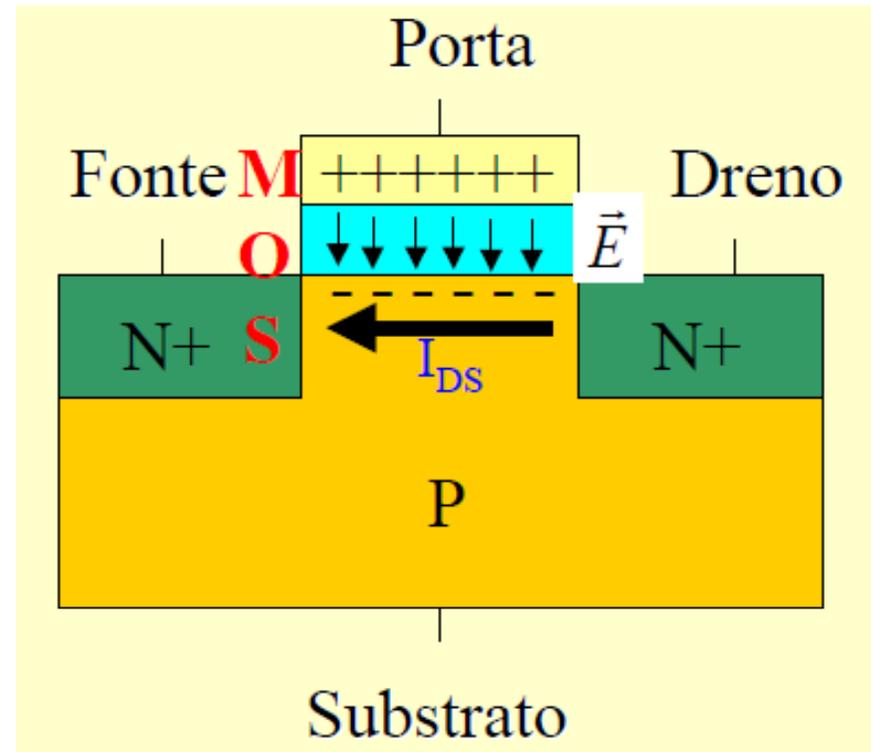
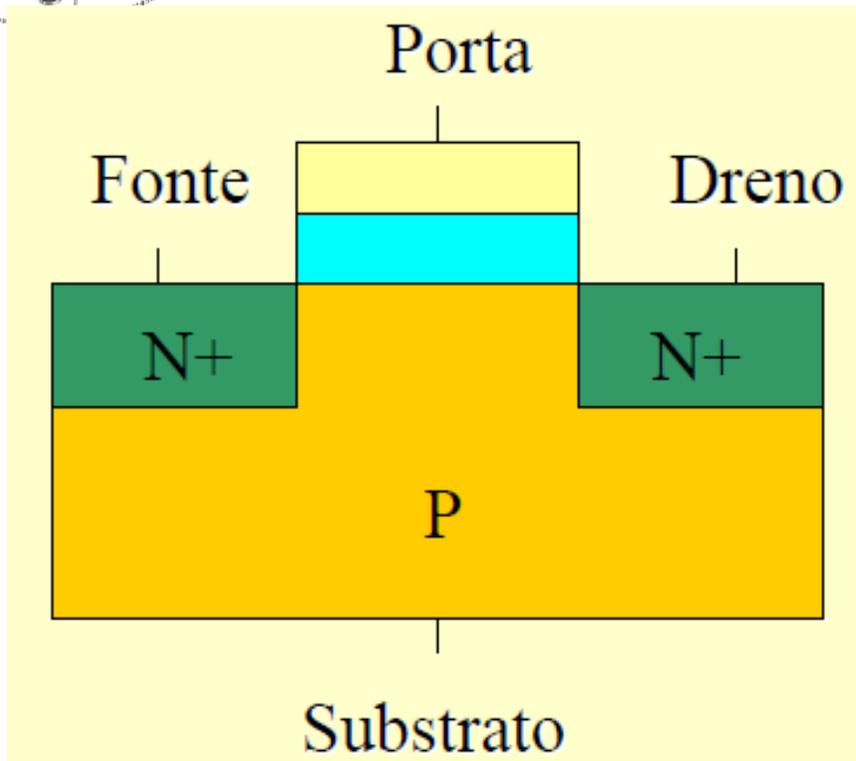
- De cima para baixo (*top-down*)

Transistor de efeito de campo - Pentium 4



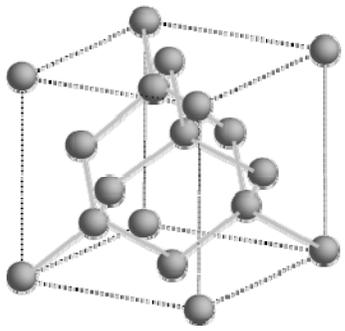


MOS

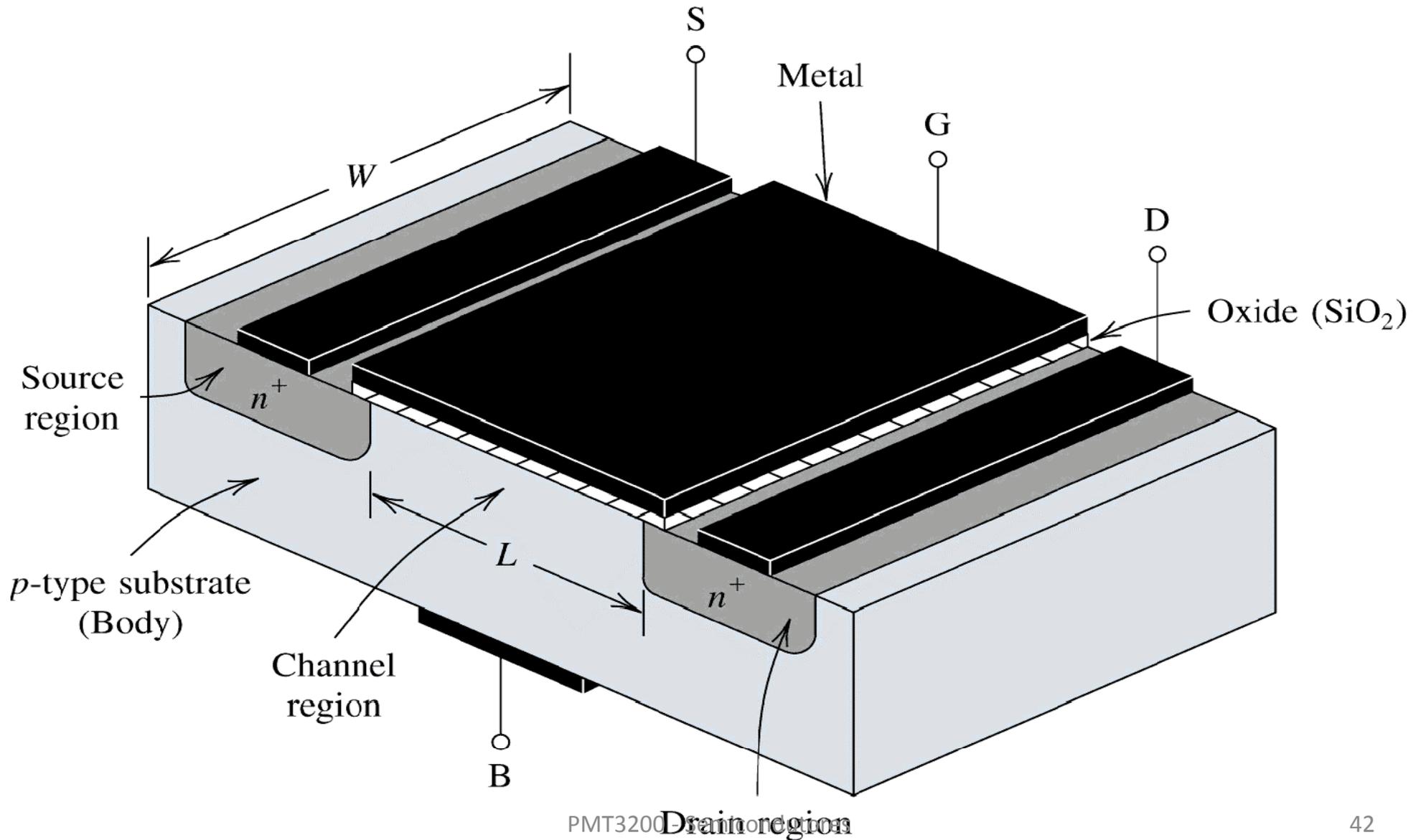


Opera como parte de uma porta lógica:
Se houver tensão (+) na porta
Então passa corrente.

Tensão (+) na porta atrai elétrons para o canal entre a fonte e o dreno e aumenta condutividade nessa região.



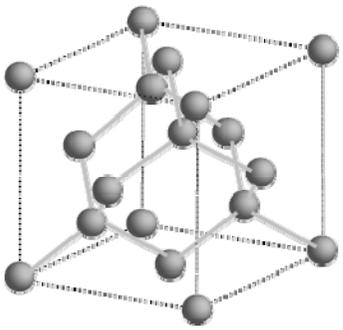
Transistor Metal Óxido Semicondutor - MOS



Processo de Fabricação de Circuitos Integrados

Principais Etapas de Processo:

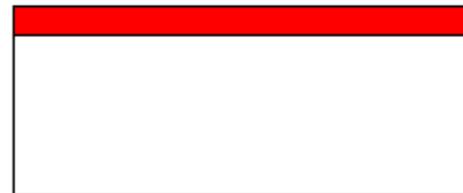
- ⇒ Oxidação Térmica
- ⇒ Deposição de óxido de silício
- ⇒ Fotogravação
- ⇒ Corrosão Química
- ⇒ Difusão de Impurezas
- ⇒ Implantação Iônica



O processo de fabricação de um transistor MOS em 12 etapas



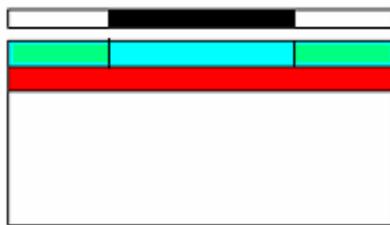
1) Limpeza (HF)



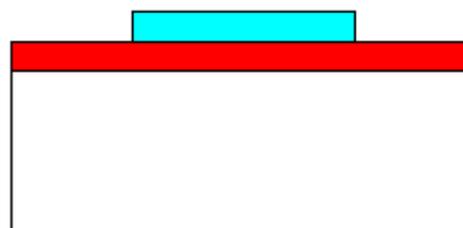
2) Oxidação:
óxido de campo
(amorfo)



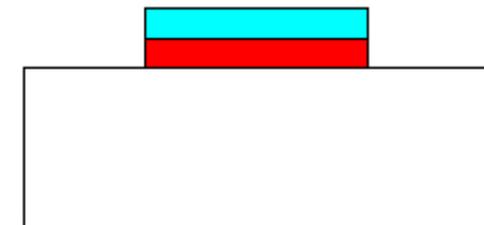
3) Aplicação de
fotorresiste (PR)



4) Fotogração:
exposição à luz UV



5) Remoção do PR
(solução de acetona)



6) Corrosão do
óxido: abertura das
regiões de fonte e
dreno

□ Si tipo P

■ Si tipo N

■ Máscara

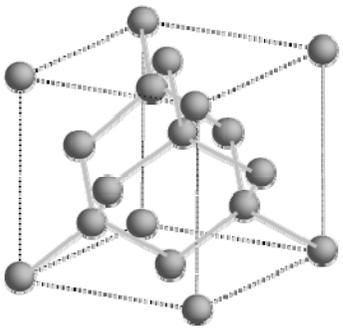
■ SiO₂

■ PR

■ Al

↓ Luz UV

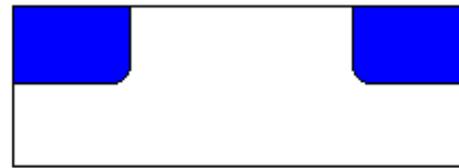
■ PR sensibilizado 44



O processo de fabricação de um transistor MOS



7) Deposição e Difusão de dopantes: formação de fonte e dreno



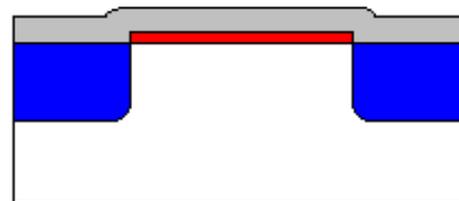
8) Remoção do óxido de campo e do PR



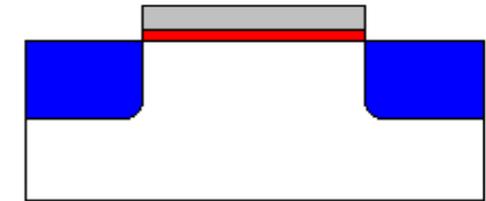
9) Oxidação térmica: óxido de porta



10) Fotogravação / Corrosão do óxido



11) Metalização: deposição de Al



12) Fotogravação / Corrosão do Al

□ Si tipo P

■ SiO₂

■ Si tipo N

■ PR

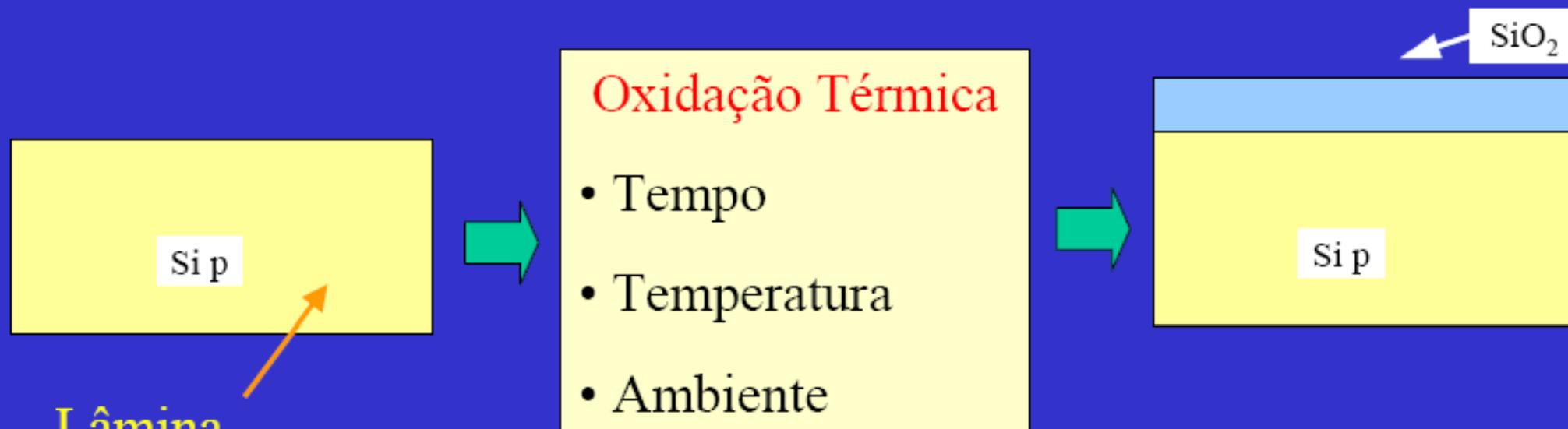
■ Máscara

■ Al

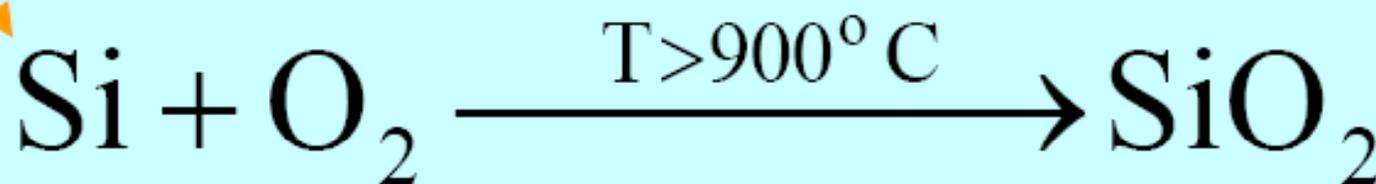
↓ Luz UV

Oxidação Térmica:

Objetivo: Obtenção de óxido de silício (SiO_2) sobre o silício

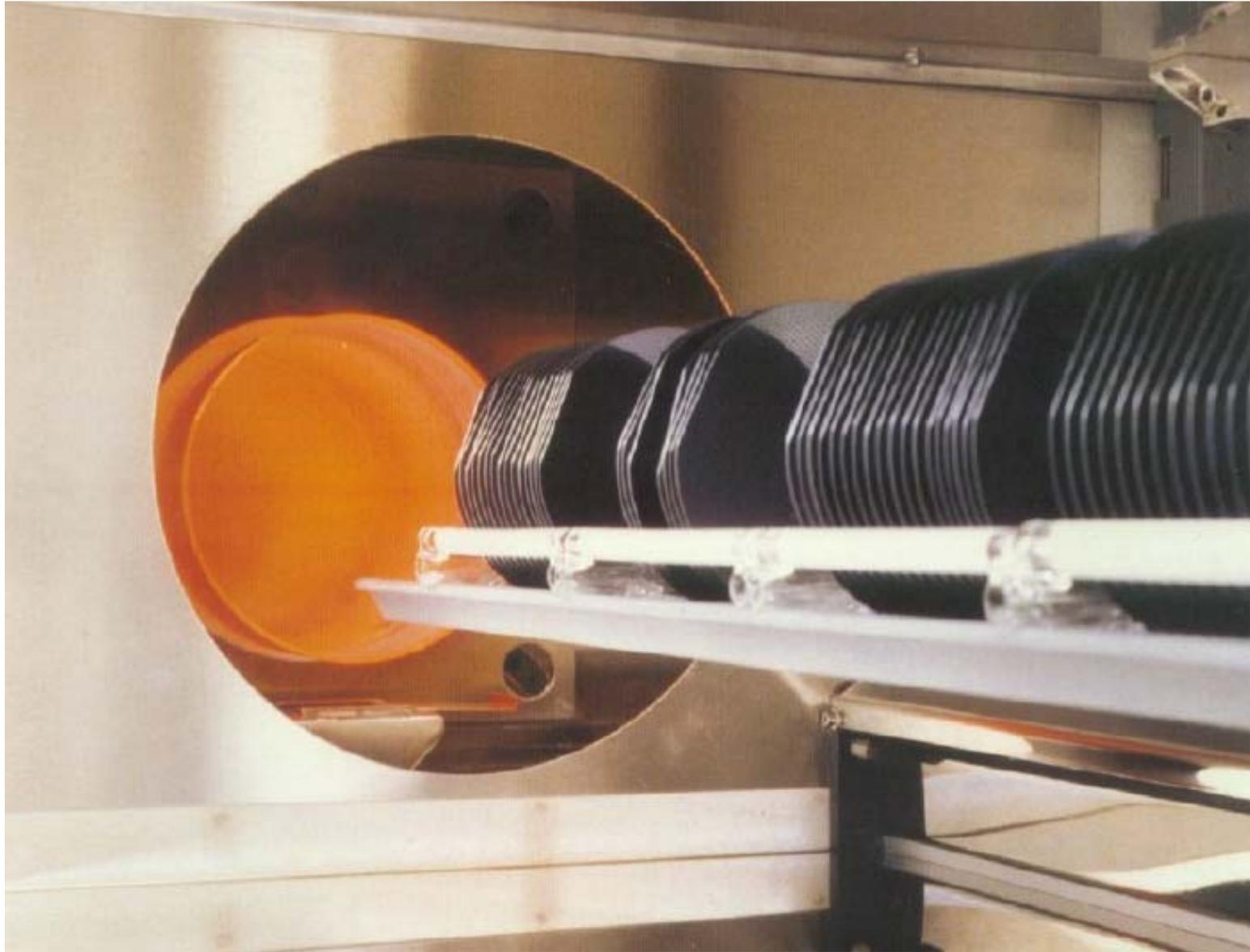
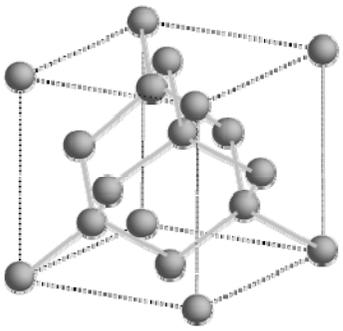


Lâmina



Funções Principais

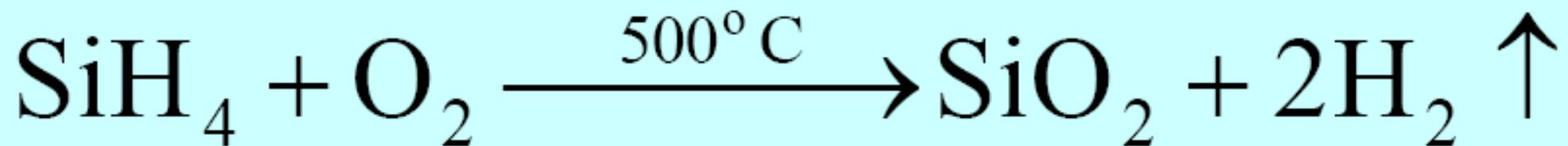
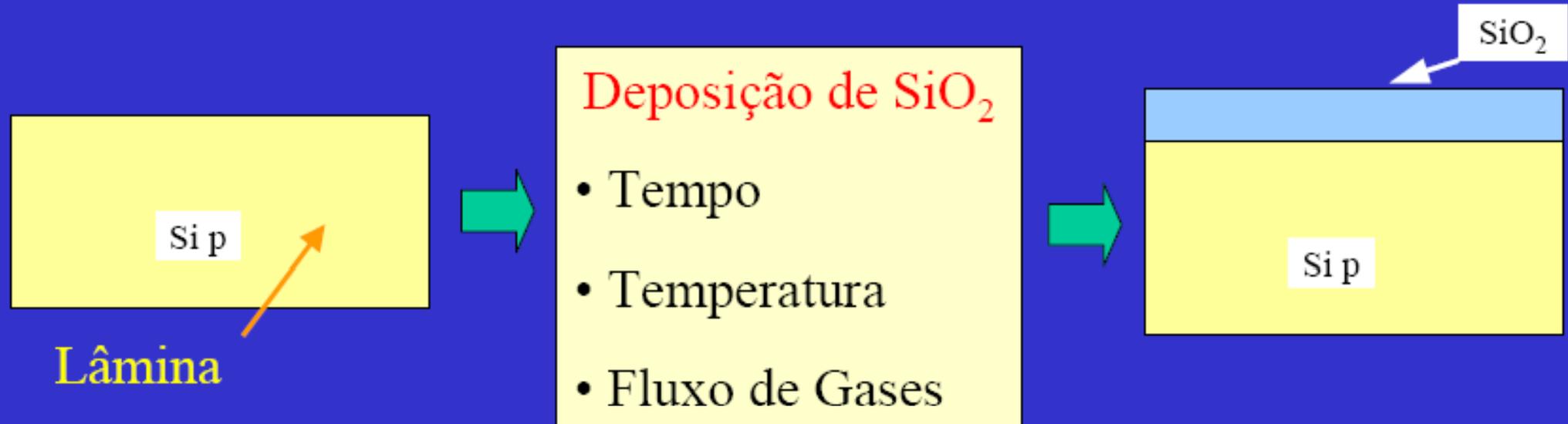
- Mascaramento contra impurezas
- Dielétrico de porta



- Lâminas de Si sendo levadas ao forno para a etapa de oxidação térmica

Deposição de Óxido de Silício: (C.V.D.)

Objetivo: Obtenção de óxido de silício (SiO_2) sobre o silício ou outra superfície qualquer

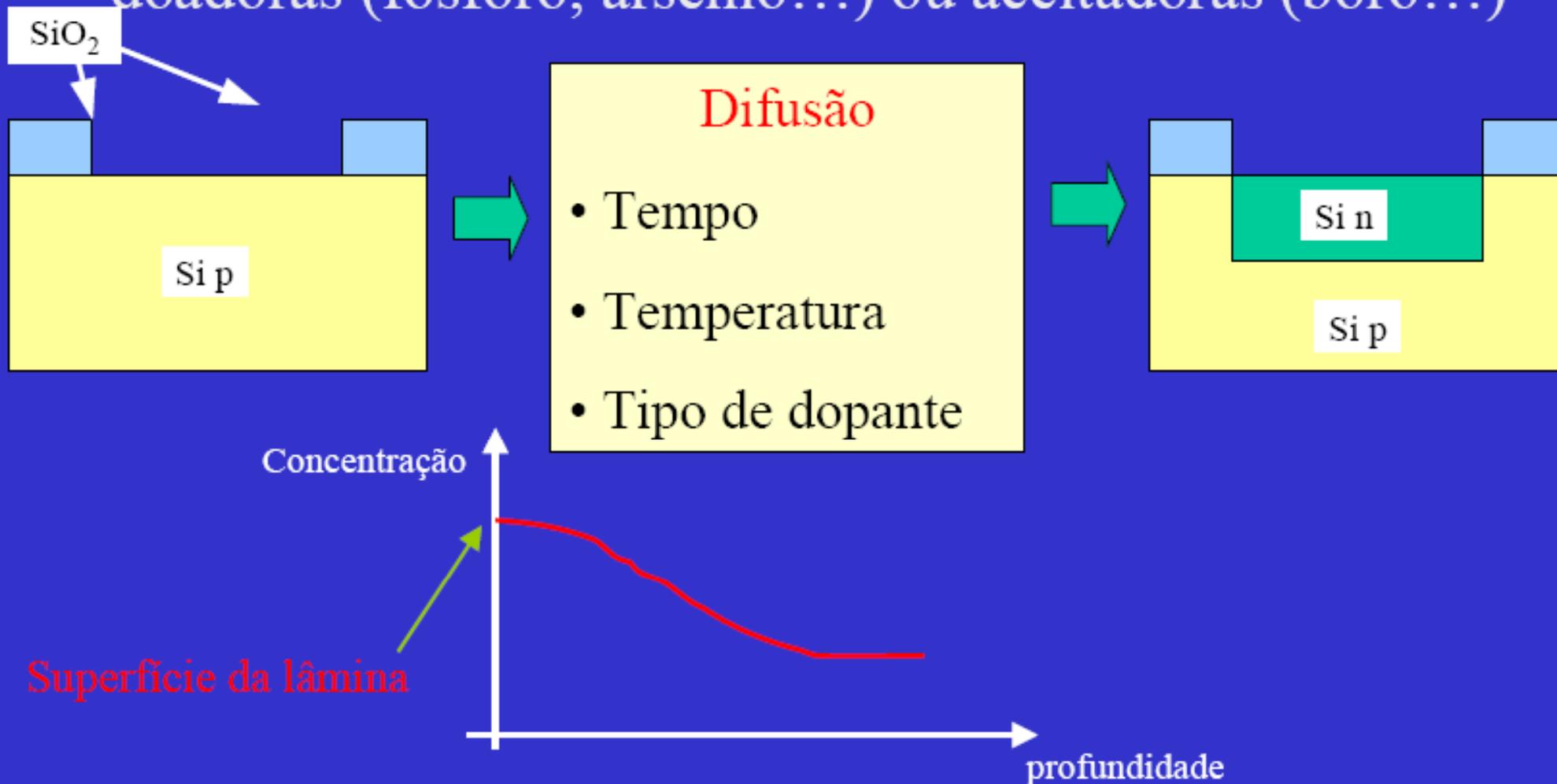


Função Principal

- Mascaramento contra impurezas

Difusão de Impurezas:

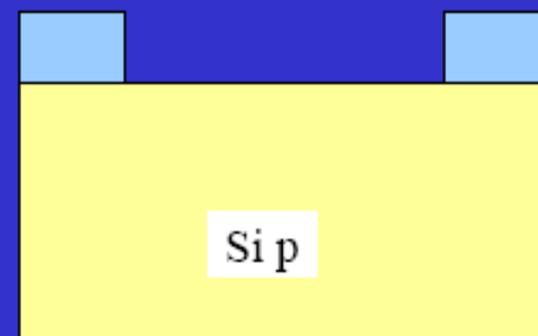
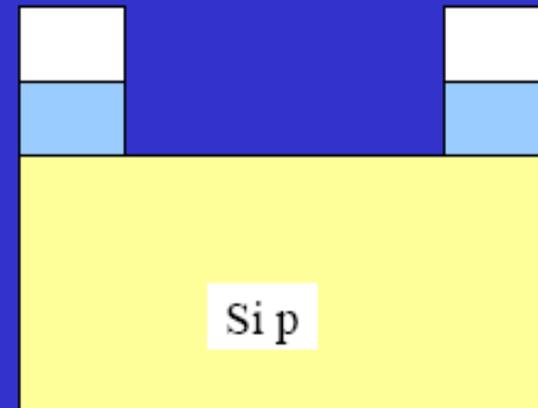
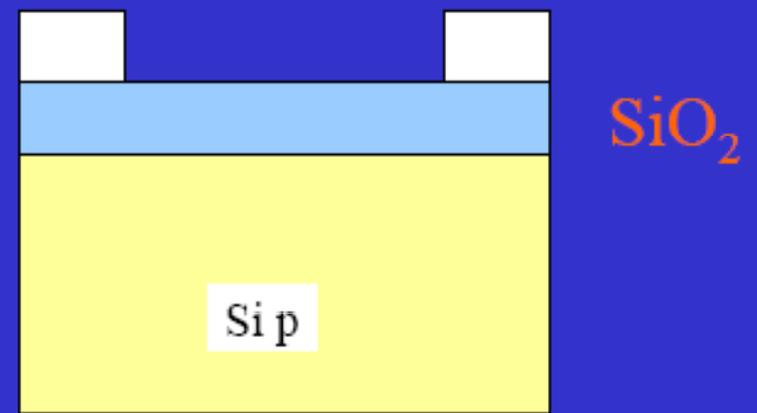
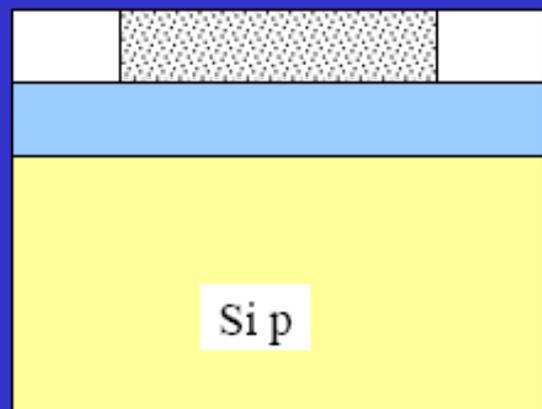
Objetivo: introduzir na rede cristalina do Si impurezas doadoras (fósforo, arsênio...) ou aceitadoras (boro...)



Função Principal

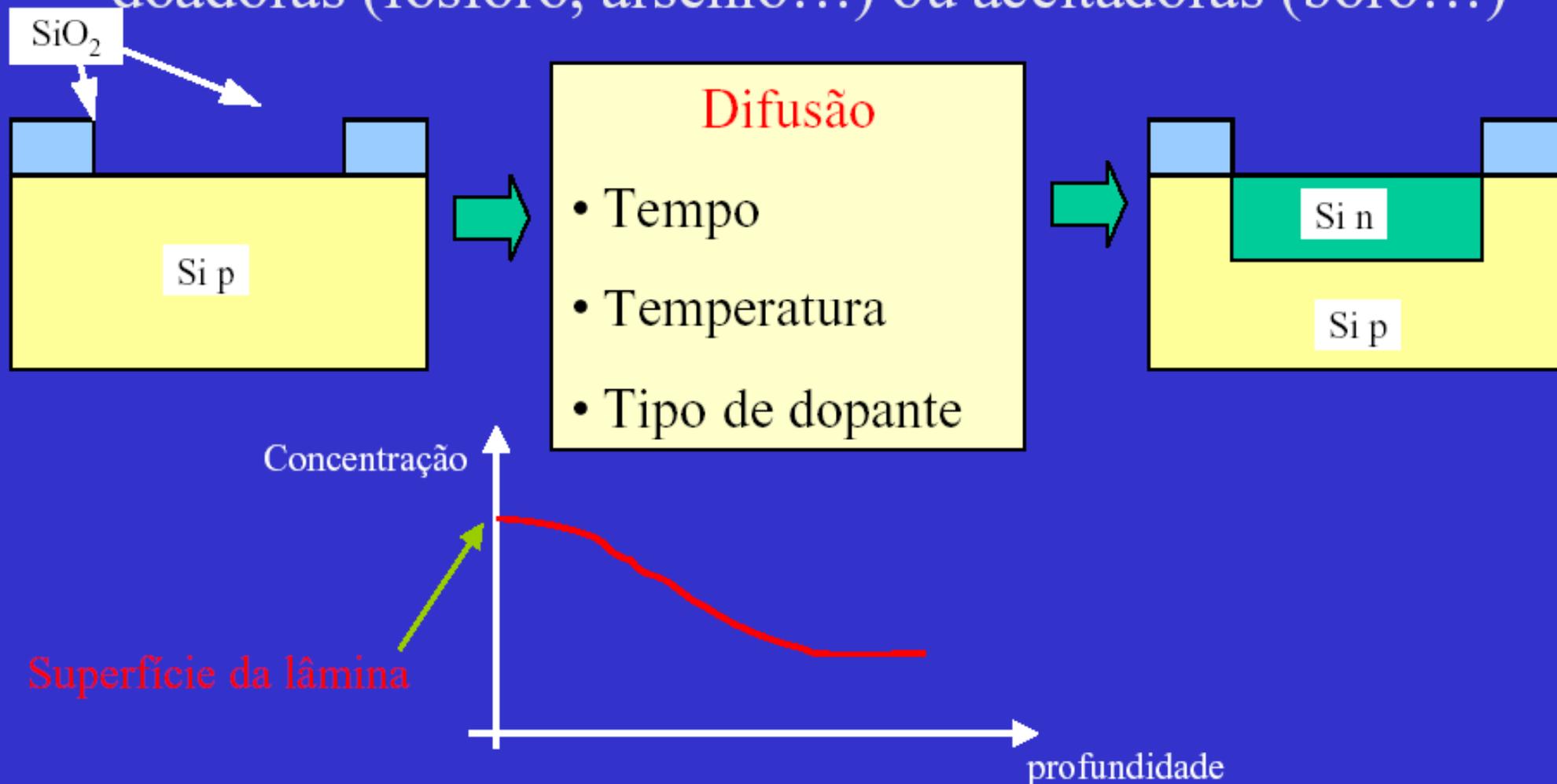
- criação de uma região com características doadora ou aceitadora

- *Aplicação de Fotorresiste na lâmina*
- *Exposição à luz ultravioleta*
- *Revelação*
- *Corrosão química*
- *Remoção do Fotorresiste*



Difusão de Impurezas:

Objetivo: introduzir na rede cristalina do Si impurezas doadoras (fósforo, arsênio...) ou aceitadoras (boro...)

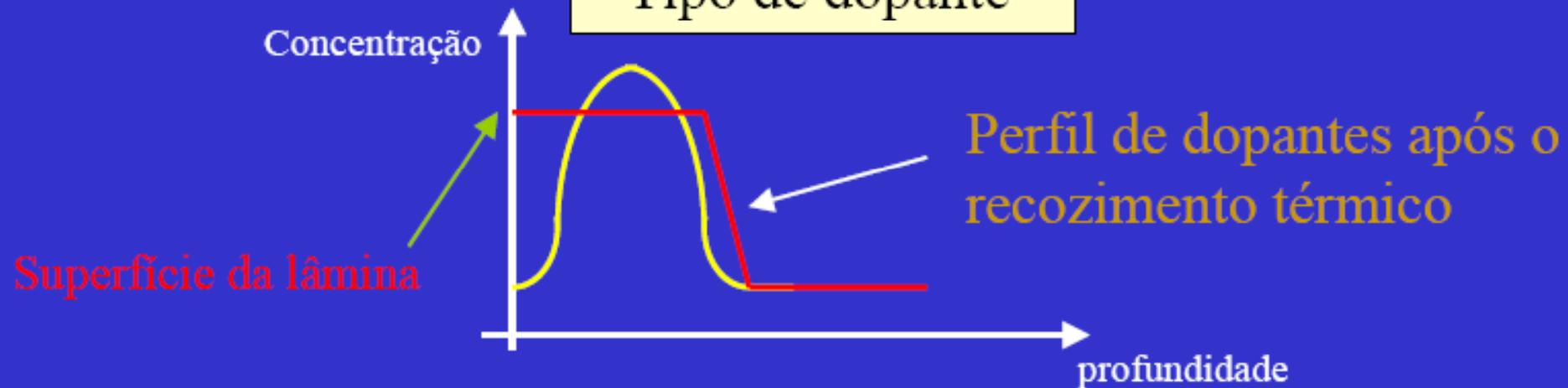
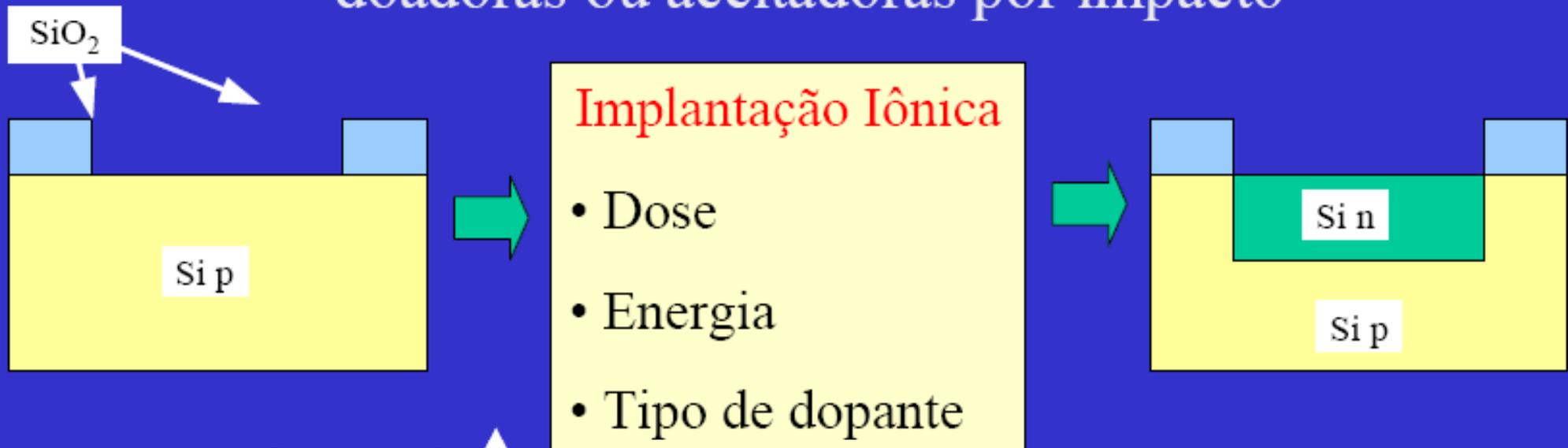


Função Principal

- criação de uma região com características doadora ou aceitadora

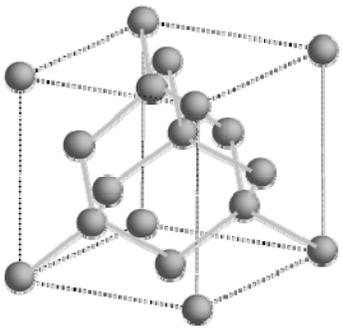
Implantação Iônica:

Objetivo: introduzir na rede cristalina do Si impurezas doadoras ou aceitadoras por impacto

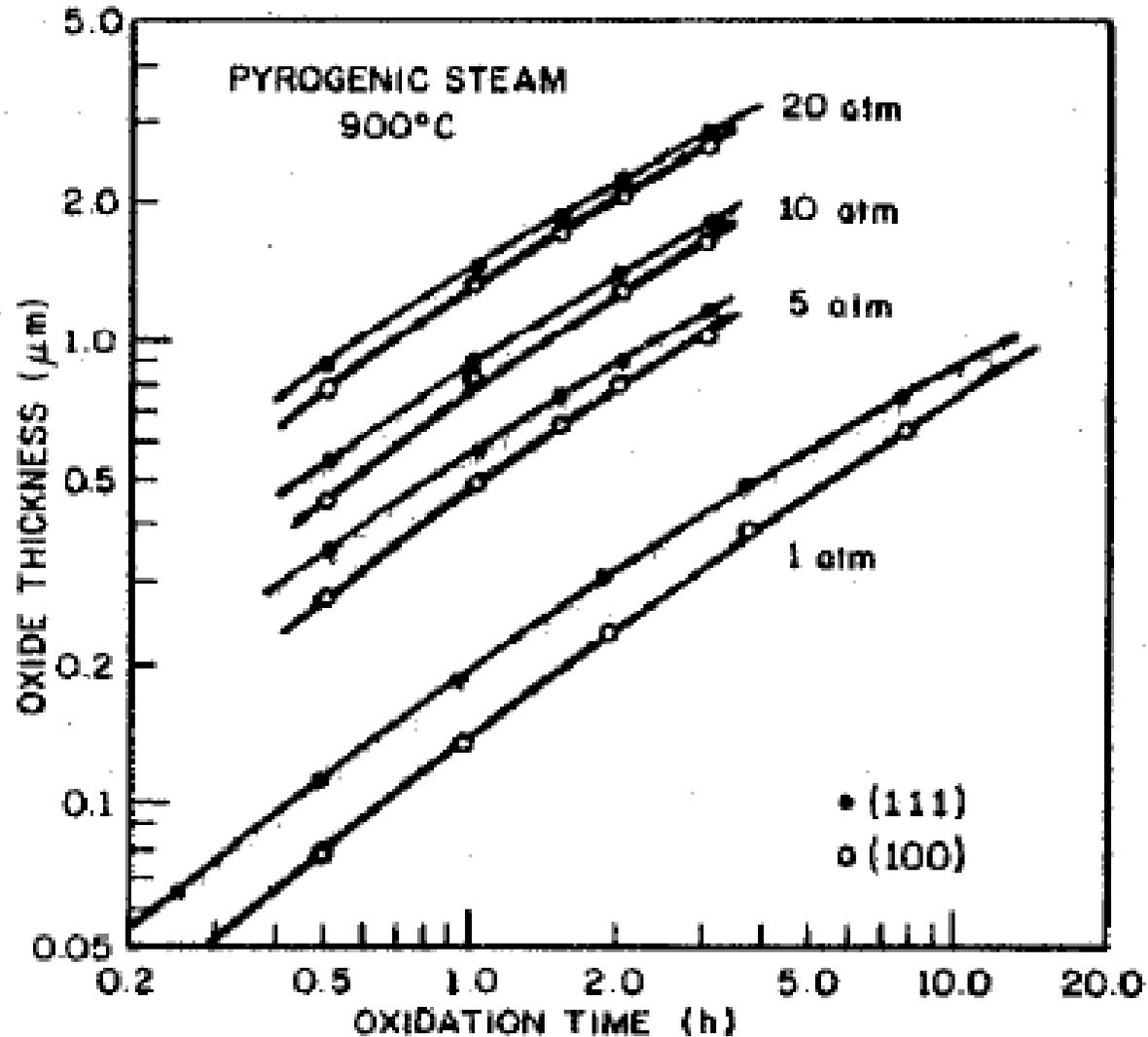
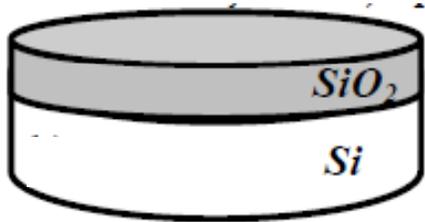


Função Principal

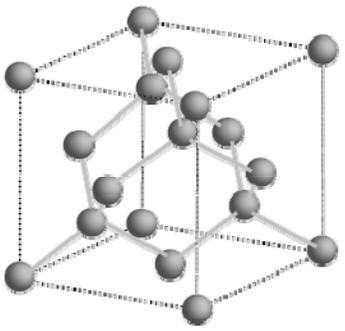
- criação de uma região com características doadora ou aceitadora



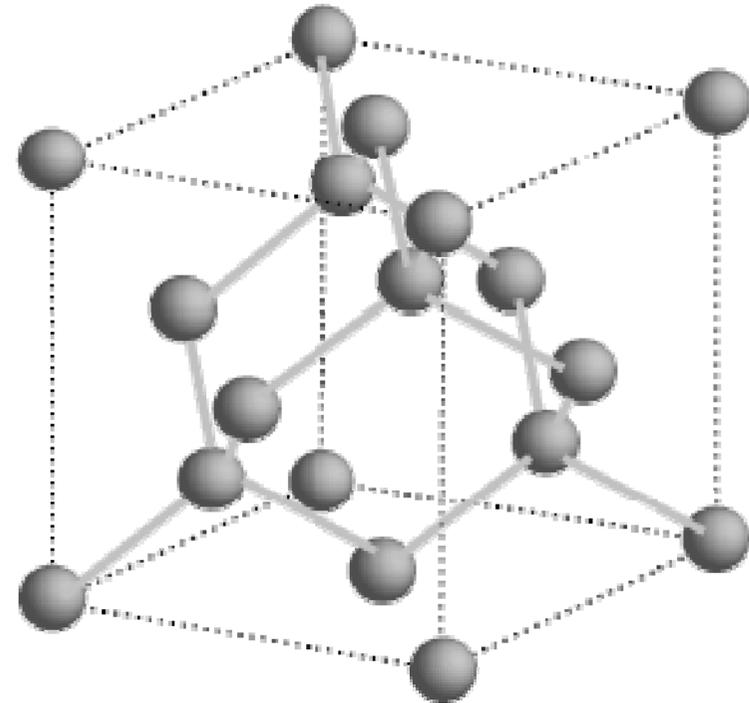
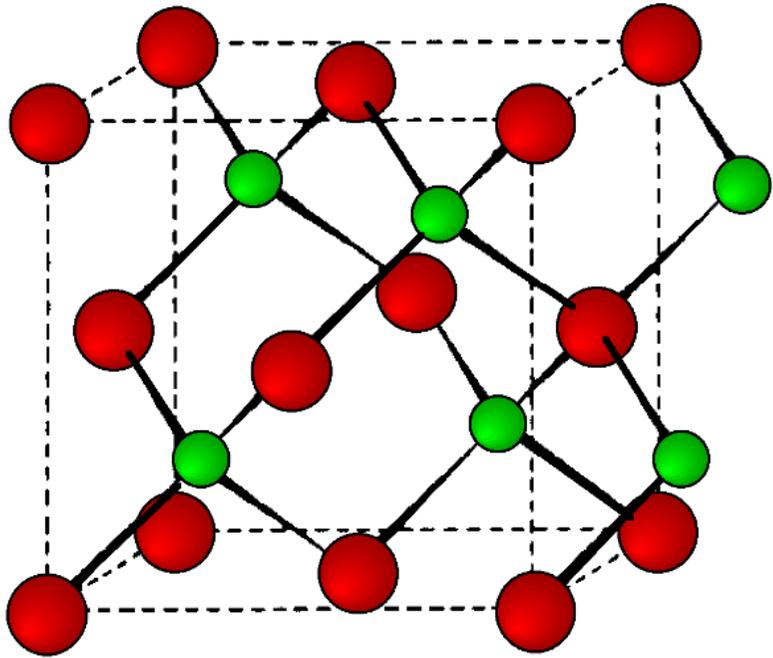
Efeito da orientação na velocidade de oxidação do silício



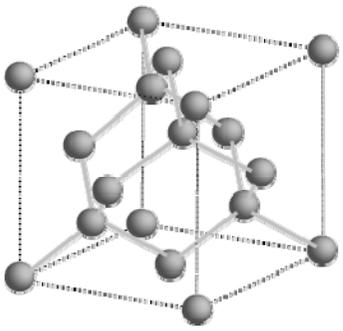
Mas qual é a diferença entre os planos (111) e (100) no silício?



Estrutura cristalina do silício

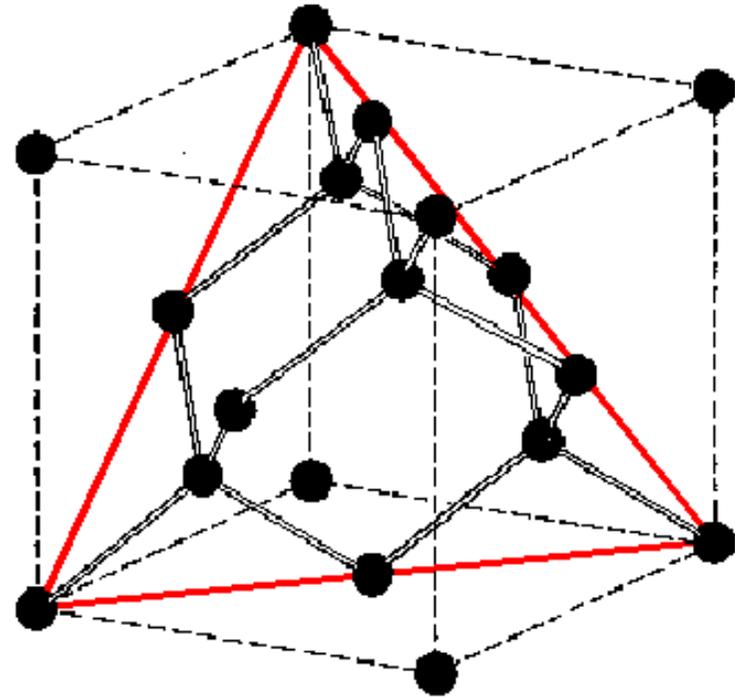


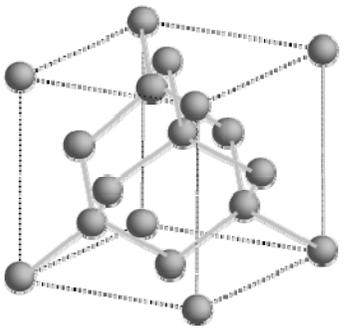
- Estrutura cristalina do silício: Cúbico diamante
- Parece-se com sulfeto de zinco ZnS



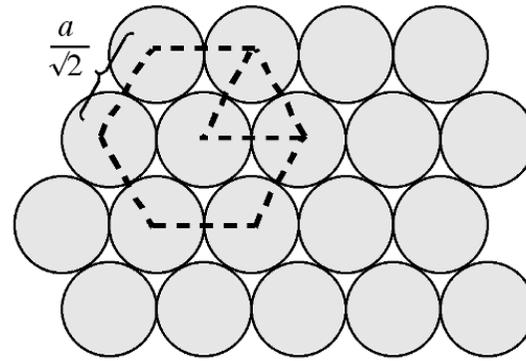
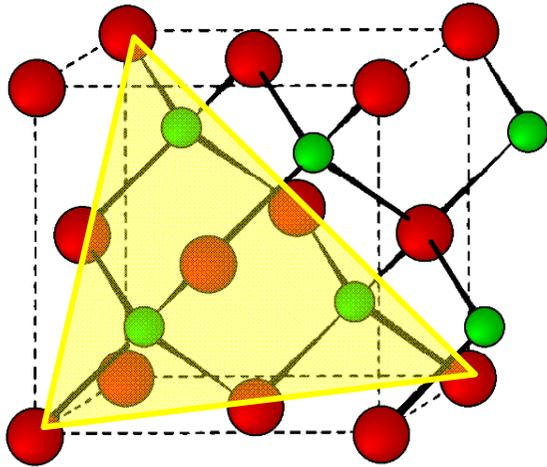
Plano (111)

- **Empacotamento não ideal:** não há direção de máxima densidade atômica (direção na qual todos os átomos se toquem ou se tangenciem)

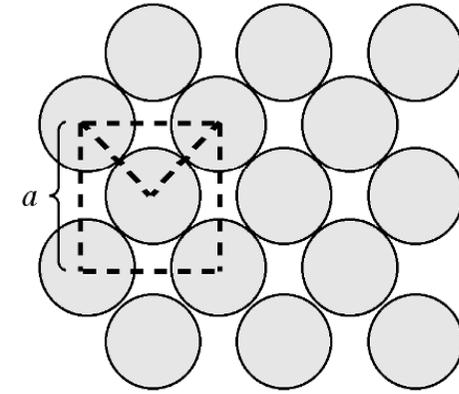




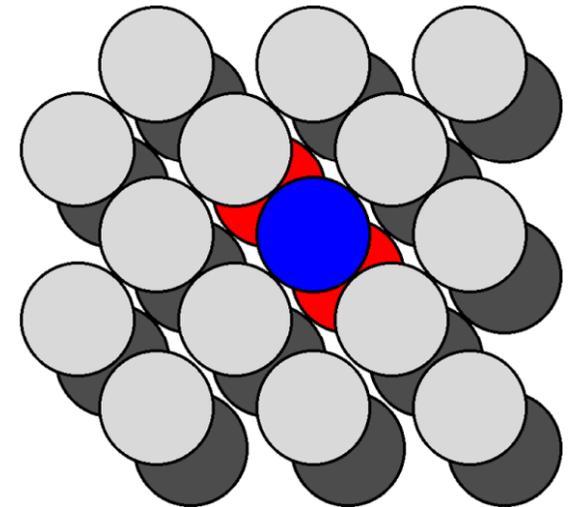
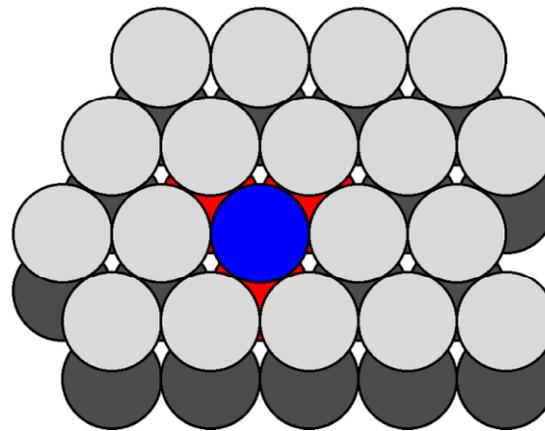
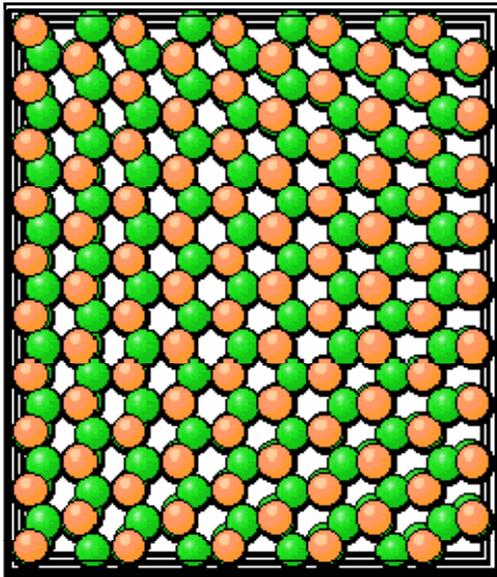
Não é fácil enxergar o empilhamento no plano (111)

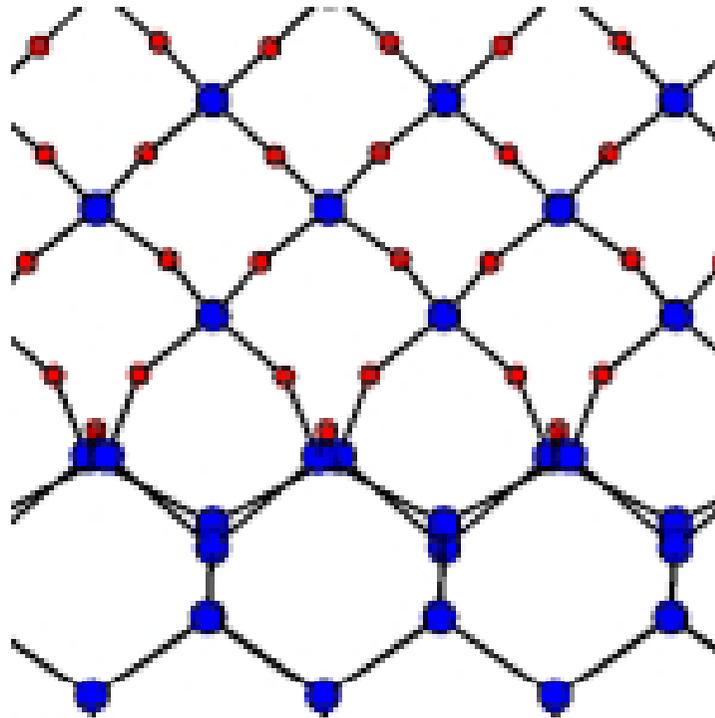
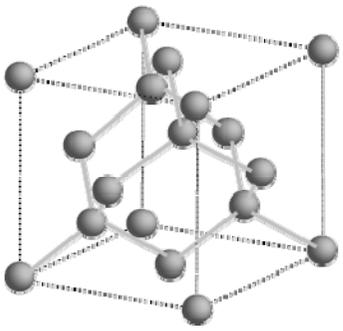


Plano (111)



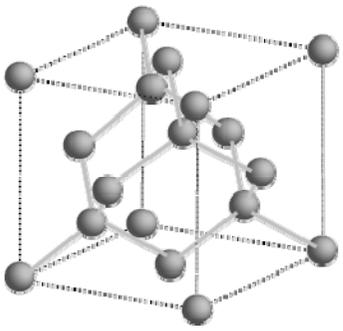
Plano (100)





SiO_2

silício



Não deixem de olhar

- Site da Unicamp sobre processos de fabricação de CIs, com animações e texto:
http://wtprocess.ccs.unicamp.br/processos/comos_v11/index.html
- Site da Universidade Brigham Young sobre processos de fabricação:
<http://www.ece.byu.edu/cleanroom/KOH.phtml>