

SEMICONDUCTORES



Luis Valério Prandel
Física do Estado Sólido

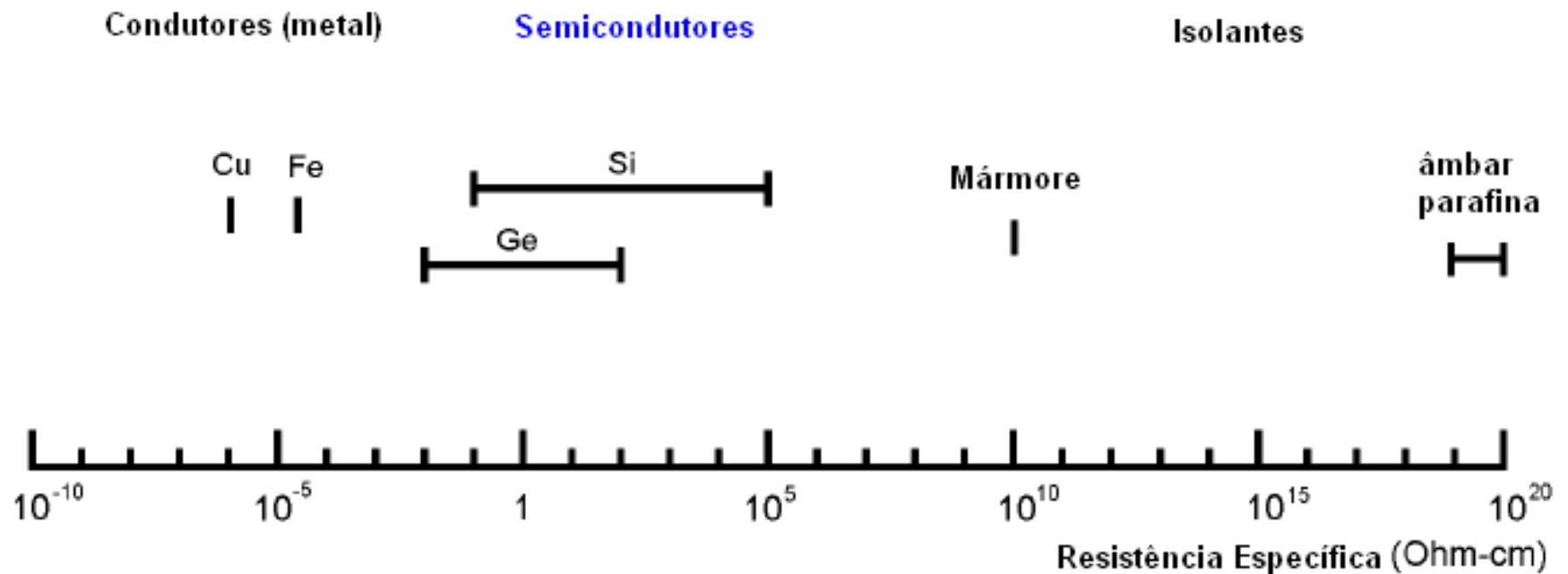
SEMICONDUCTORES

1. SEMICONDUTOR

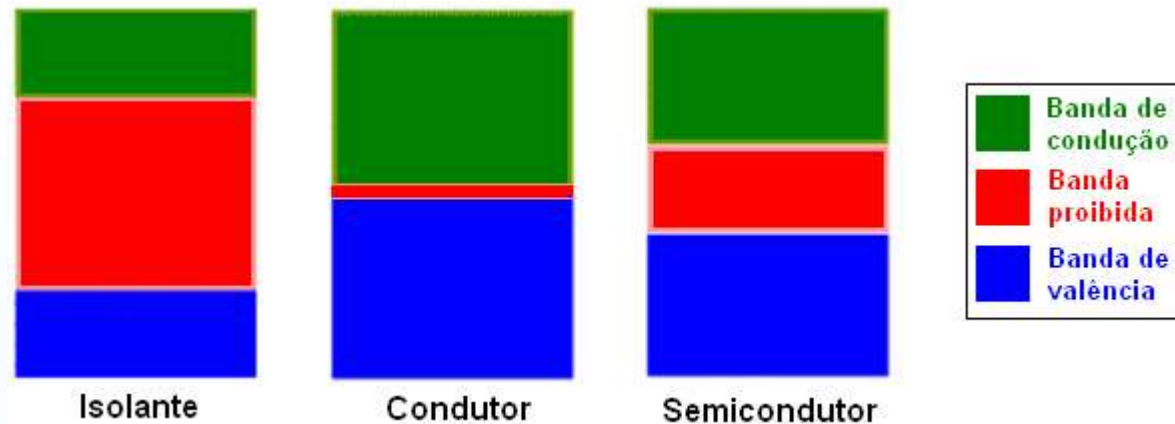
- Material geralmente utilizado na construção de dispositivos eletrônicos
- Sólido formado por ligações covalentes
- Considerado isolante → ~ 0 Kelvins
- Resistividade:
 - Bons condutores → $10^{-6} \Omega\text{-cm}$
 - Bons isolantes → 10^{14} até $10^{22} \Omega\text{-cm}$
 - Semicondutores: 10^{-2} a $10^9 \Omega\text{-cm}$

SEMICONDUCTORES

Classificação de Materiais por Condutividade Elétrica



SEMICONDUCTORES



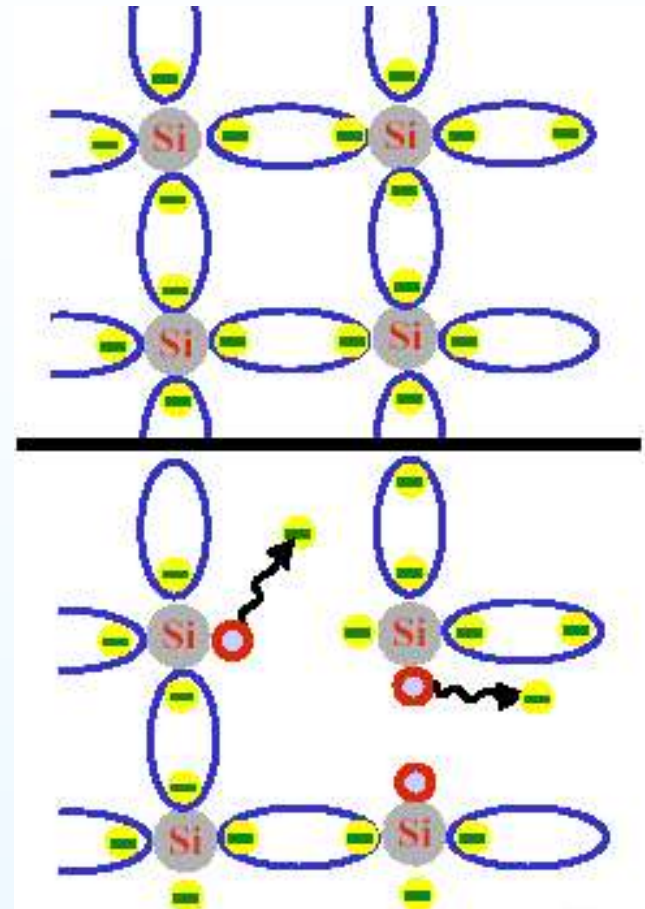
- Caso particular de materiais isolantes
- Banda proibida \rightarrow menor ou até da ordem de 3 eV

Material	E_g [eV] a 300 K	Classificação
Ge	0.66	Semicondutor
Si	1.12	Semicondutor
GaAs	1.42	Semicondutor
C (diamante)	5.47	Isolante
SiO ₂	9.0	Isolante
Si ₃ O ₄	5.0	Isolante

SEMICONDUCTORES

■ Aumento da condutividade em um semicondutor:

- **Temperatura**
- **Intensidade da luz**
- **Adição de impurezas**



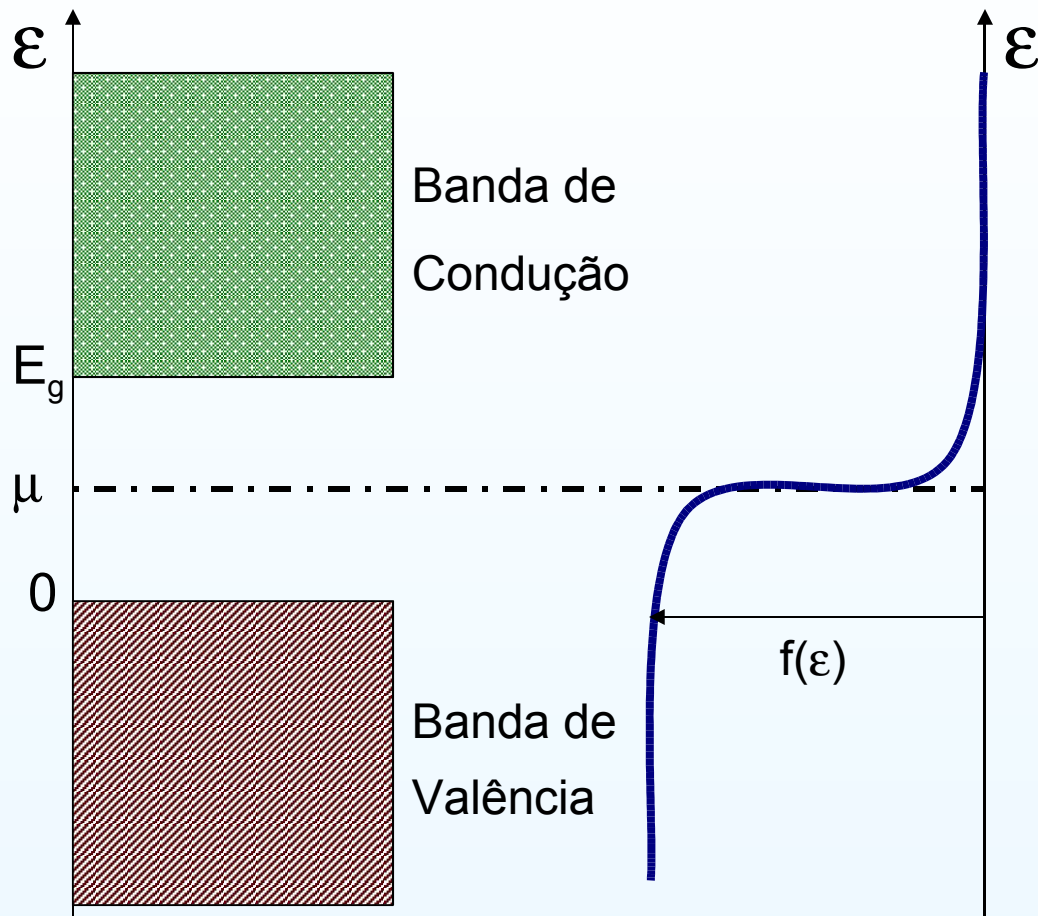
Efeito do aumento da temperatura

SEMICONDUCTORES

2. CONCENTRAÇÃO DE PORTADORES INTRÍNSECOS

- A concentração destes portadores se dá em termo de lacuna de banda (tamanho da banda proibida)
- Calculamos em termos de potencial químico μ (ou nível de Fermi) o número de elétrons excitados para uma banda de condução (em temperatura T)
- Medimos ε a partir do topo da banda de valência

SEMICONdutoRES



- Para $\rightarrow \epsilon - \mu \gg k_b T$
- A distribuição de Fermi-Dirac se reduz a:

$$f \approx e^{(\mu - \epsilon) / k_B T}$$

- A energia de um elétron de na banda de condução é:

$$\epsilon_k = E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e}$$

SEMICONDUCTORES

- A densidade de orbitais é em ε é:

$$D_e(\varepsilon) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_e}{\hbar^2} \right)^{3/2} (\varepsilon - E_g)^{1/2}$$

- A concentração de elétrons na banda de condução é:

$$n = \int_{E_g}^{\infty} D_e(\varepsilon) f_e(\varepsilon) d\varepsilon = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_e}{\hbar^2} \right)^{3/2} e^{\mu/k_B T} \int_{E_g}^{\infty} (\varepsilon - E_g)^{1/2} e^{-\varepsilon/k_B T} d\varepsilon$$

$$n = 2 \left(\frac{m_e k_B T}{2\pi\hbar^2} \right) e^{(\mu - E_g)/k_B T}$$

- A função de distribuição de buracos ("holes"), tem relação com a função de distribuição de elétrons $\rightarrow \mathbf{f}_h = \mathbf{1} - \mathbf{f}_e$

SEMICONDUCTORES

$$f_h = 1 - \frac{1}{e^{(\varepsilon - \mu)/k_B T} + 1} = \frac{1}{e^{(\mu - \varepsilon)/k_B T} + 1} \cong e^{(\varepsilon - \mu)/k_B T}$$

- Desde que $(\mu - \varepsilon) \gg k_B T$
- Buracos têm comportamento de partículas
- Com massa efetiva m_h
- A densidade de orbitais é:

$$D_h(\varepsilon) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_h}{\hbar^2} \right)^{3/2} (-\varepsilon)^{1/2}$$

- Analogamente é obtida a concentração de buracos:

$$p = \int_{-\infty}^0 D_h(\varepsilon) f_h(\varepsilon) d\varepsilon = 2 \left(\frac{m_h k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{-\mu/k_B T}$$

SEMICONDUCTORES

- Relação de Equilíbrio:

$$np = 4 \left(\frac{k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^3 (m_e m_h)^{3/2} e^{-E_g/k_B T}$$

- np é constante para uma dada temperatura
- População de elétrons e buracos no equilíbrio seja mantida
- Fótons \rightarrow pares elétrons-buracos [taxa **A(T)**]
- Elétrons-buracos \rightarrow fótons [taxa **B(T)np**]

$$\frac{dn}{dt} = A(T) - B(T)np = \frac{dp}{dt}$$

- No equilíbrio $dn/dt=0=dp/dt$

$$np = \frac{A(T)}{B(T)}$$

SEMICONDUCTORES

- Semicondutor intrínseco → **n° de elétrons = n° de buracos**

$$n_i = p_i = 2 \left(\frac{k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} (m_e m_h)^{3/4} e^{-E_g/k_B T}$$

- A excitação do portador intrínseco depende exponencialmente do termo **$E_g/2k_B T$**
- Igualando **p** e **n** temos:

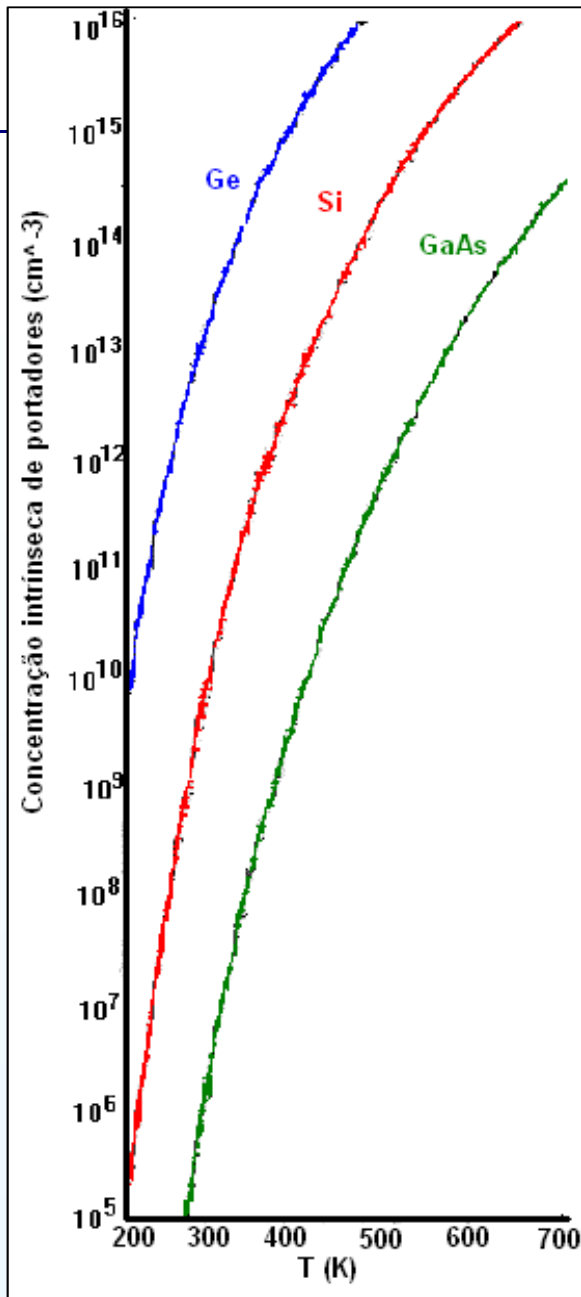
$$e^{2\mu/k_B T} = (m_h/m_e)^{3/2} e^{E_g/k_B T}$$

- Ou para o nível de Fermi:

$$\mu = \frac{1}{2} E_g + \frac{3}{4} k_B T \ln(m_h/m_e)$$

- Se **$m_h = m_e$** → **$\mu = 1/2 E_g$** (meio da banda proibida)

SEMICONDUTORES



Curvas de concentração intrínseca de portadores versus temperatura para semicondutores de Ge, Si e GaAs.

SEMICONDUCTORES

Mobilidade na região intrínseca

$$\mu = |v|/E$$

- Positiva → elétrons ou buracos
- Colisões entre os elétrons e fótons
- Condutividade:

$$\sigma = (ne\mu_e + ne\mu_h)$$

- A velocidade de arraste de uma carga q é $v = q\tau E/m$, assim:

$$\mu_e = e\tau_e/m_e \quad ; \quad \mu_h = e\tau_h/m_h$$

- Pequenas lacunas → elevadas mobilidades

SEMICONDUCTORES

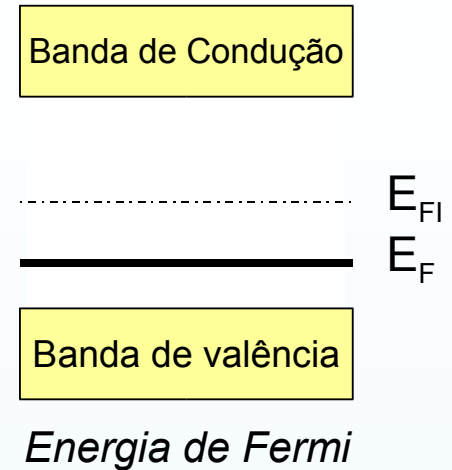
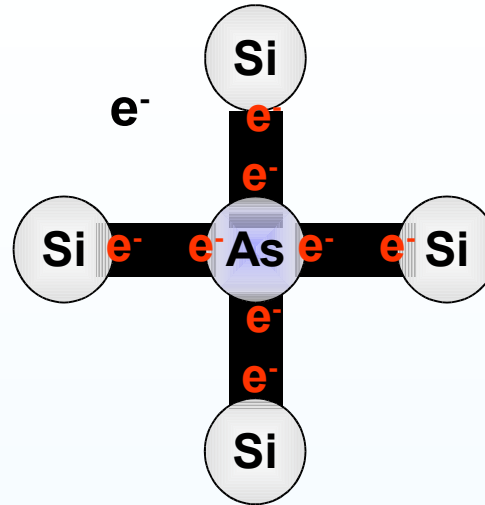
3. CONDUTIVIDADE DE IMPUREZAS

- Impurezas e imperfeições afetam as propriedades elétricas do semicondutor
- Semicondutores extrínsecos
- Adição de Boro → Silício:
 - 1 átomo de **B** para 10^5 átomos de **Si**
 - Aumento da condutividade no fator 10^3
- Adição de impurezas num semicondutor → dopagem
- Tipos de semicondutores:
 - Tipo "**n**" → Impurezas **Doadoras**
 - Tipo "**p**" → Impurezas **Aceitadores**

SEMICONDUCTORES

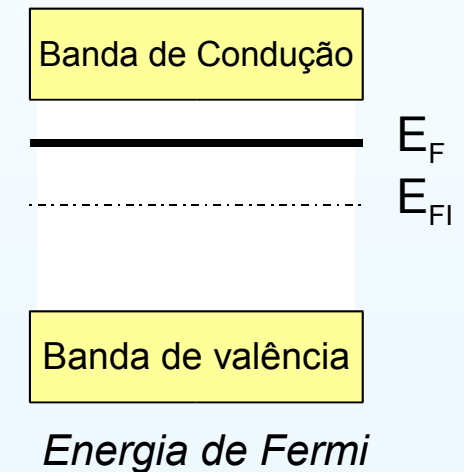
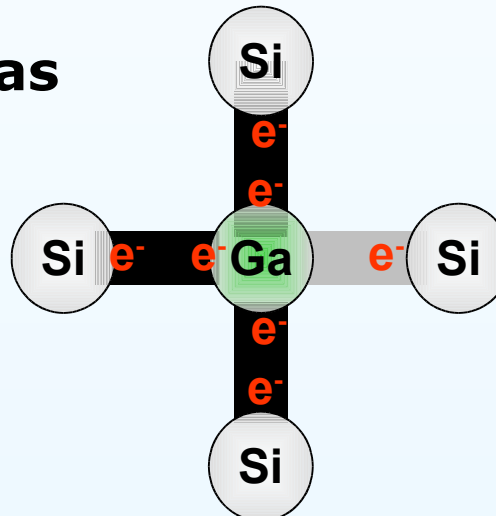
Impurezas Doadoras

- Materiais do tipo n
- Exemplo: **As** → **Si**
- **Si** → $4e^-$ (valência)
- **As** → $5e^-$ (valência)



Impurezas Aceitadoras

- Materiais do tipo p
- Exemplo: **Ga** → **Si**
- **Si** → $4e^-$ (valência)
- **Ga** → $3e^-$ (valência)



SEMICONDUCTORES

Energia de Ionização do portadores

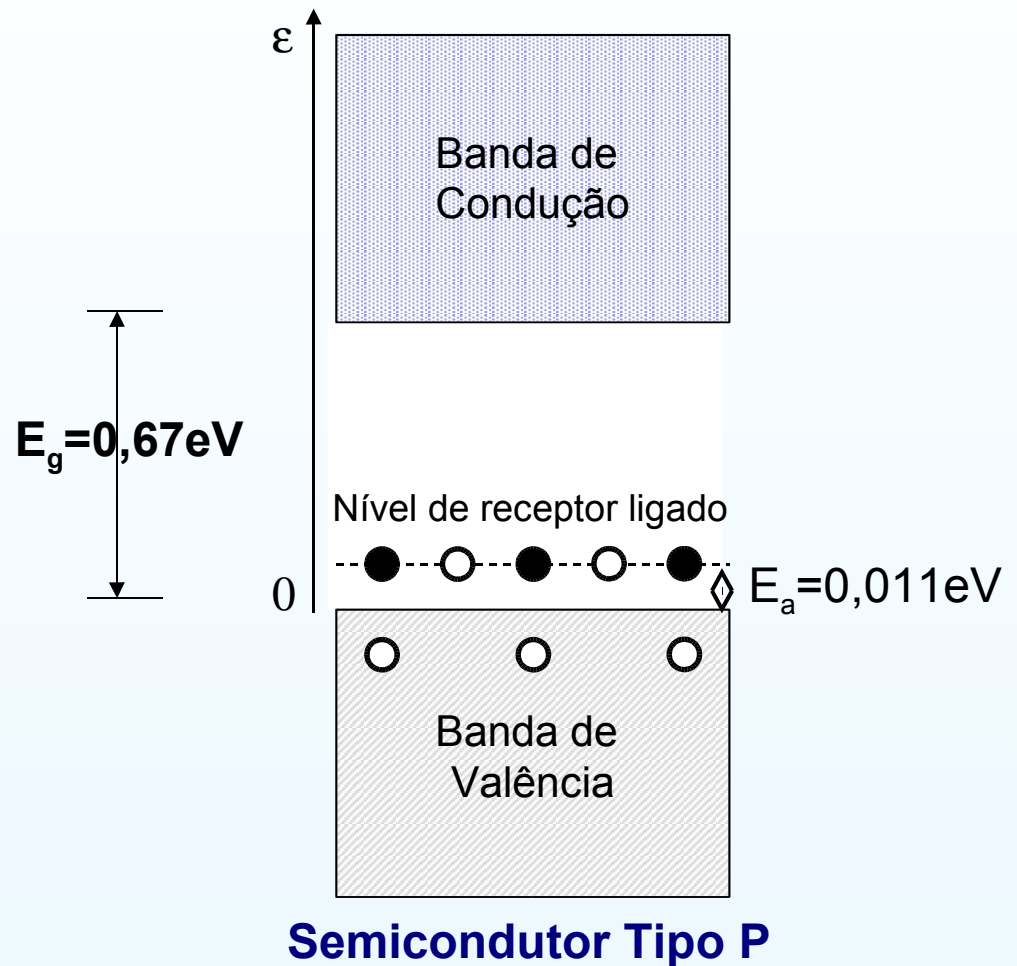
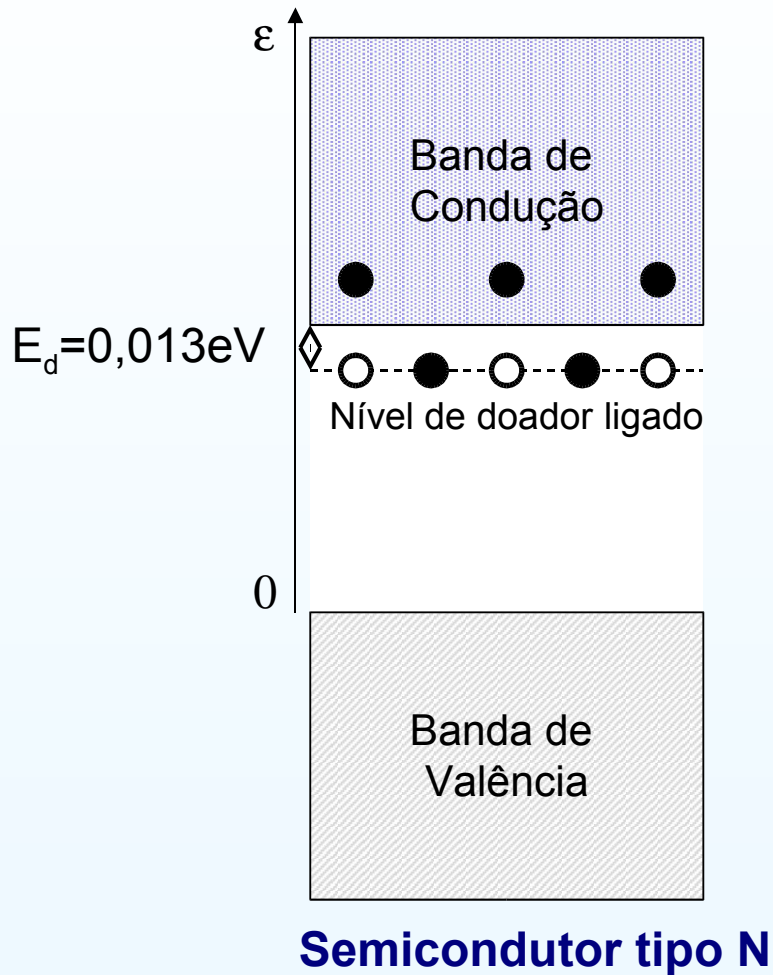
- O elétron move-se num potencial coulombiano $e/e'r$ do íon da impureza
- ϵ' → Constante dielétrica do meio
- Redução da força → polarização eletrônica do meio
- Movimento lento dos elétrons
- Energia de ionização (\sim MeV) e o raio de Bohr do doador:

$$E_d = \frac{e^4 m_e}{2(4\pi\epsilon'\epsilon_0\hbar)^2} \quad ; \quad a_d = \frac{\epsilon'\hbar^2}{m_e e^2}$$

- Quando ionizamos um receptor libera-se um buraco, requer um fornecimento de energia
- Elétron → elevado
- Buraco → mergulha em nível inferior

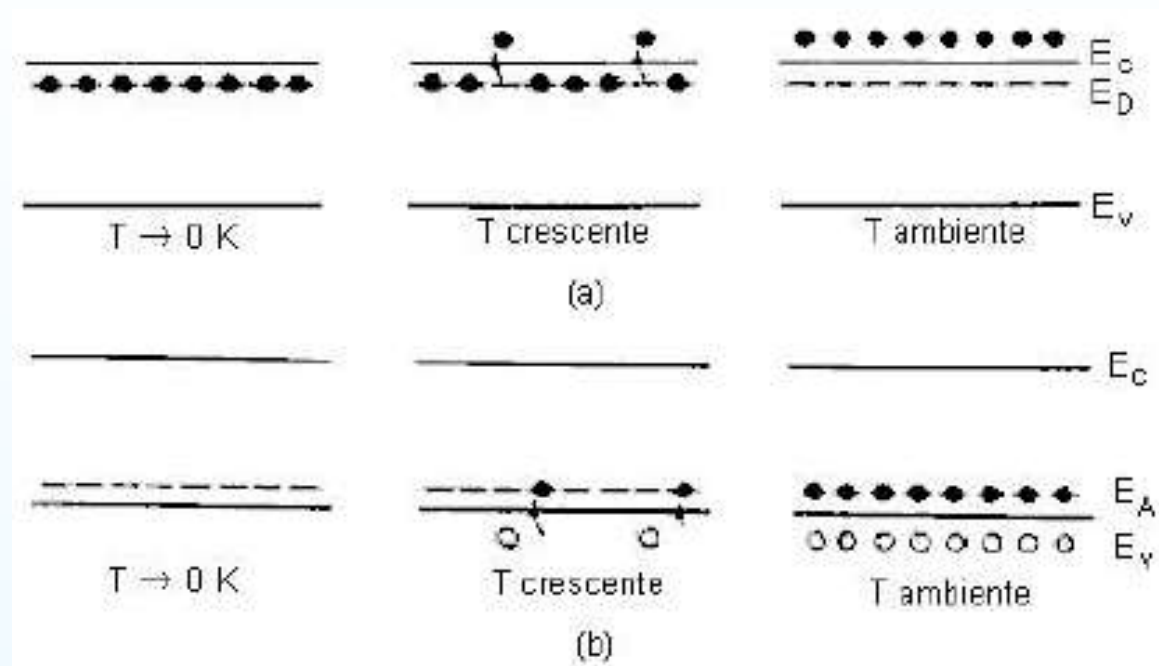
SEMICONDUTORES

Níveis de Energia para o Germânio



SEMICONdutoRES

Efeito dos dopantes à diversas temperaturas



Visualização do efeito dos dopantes, à temperatura de 0 K, a baixa temperatura e à temperatura ambiente, usando diagramas de banda para material
a) tipo n e b) tipo p.

SEMICONDUCTORES

Ionização térmica de doadores e receptores

- Concentração de equilíbrio para elétrons de condução a partir da ionização dos doadores ($k_B T \ll E_d$):

$$n \cong (n_0 N_d)^{1/2} e^{-E_d / 2k_B T}$$

- $N_d \rightarrow$ concentração de doadores

Mobilidade em presença de impurezas

- Espalhamento pelos fônons determina a mobilidade dos portadores
- Espalhamento depende \rightarrow impureza neutra ou ionizada
- Impureza neutra \rightarrow difícil espalhamento

SEMICONDUCTORES

EFEITOS TERMOELÉTRICOS EM SEMICONDUCTORES

- Considere $T \rightarrow$ constante
- Campo E produz uma $I \rightarrow$ densidade j_q
- Fluxo de cargas \rightarrow corrente por elétrons:

$$j_q = n(-e)(-\mu_n)E = ne\mu_e E$$

- Energia média transportada por um elétron é, em relação ao nível μ de Fermi:

$$(E_C - \mu) + \frac{3}{2}k_B T$$

- $E_C \rightarrow$ energia do extremo da banda de condução
- Fluxo de energia:

$$j_U = n(E_C - \mu + \frac{3}{2}k_B T)(-\mu_e)E$$

SEMICONDUCTORES

- **Coeficiente de Peltier Π**
- Energia transportada por unidade de carga.
- Para elétrons:

$$\Pi_e = -(E_e - \mu + \frac{3}{2}k_B T)/e$$

- Para Buracos:

$$j_q = p e \mu_h E \quad ; \quad j_U = p(\mu - E_v + \frac{3}{2}k_B T)/e$$

$$\Pi_h = (\mu - E_v + \frac{3}{2}k_B T)/e$$

- A potência termodinâmica Q é definida como:

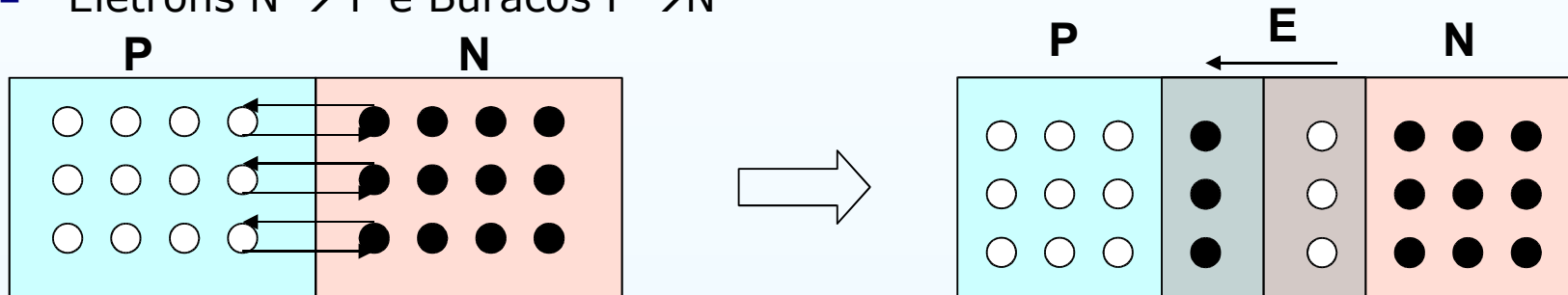
$$E = Q \nabla T \quad \Rightarrow \quad \Pi = QT$$

- Relação de Kelvin da termodinâmica
- Identifica se um espécime é do tipo p ou n

SEMICONdutoRES

JUNÇÕES p-n

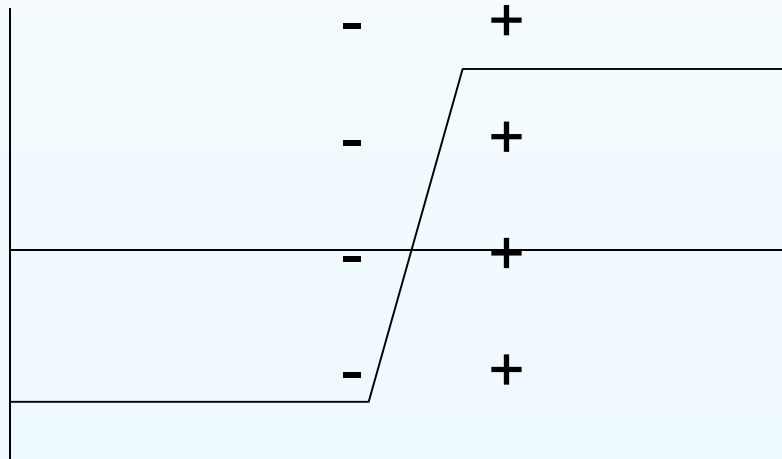
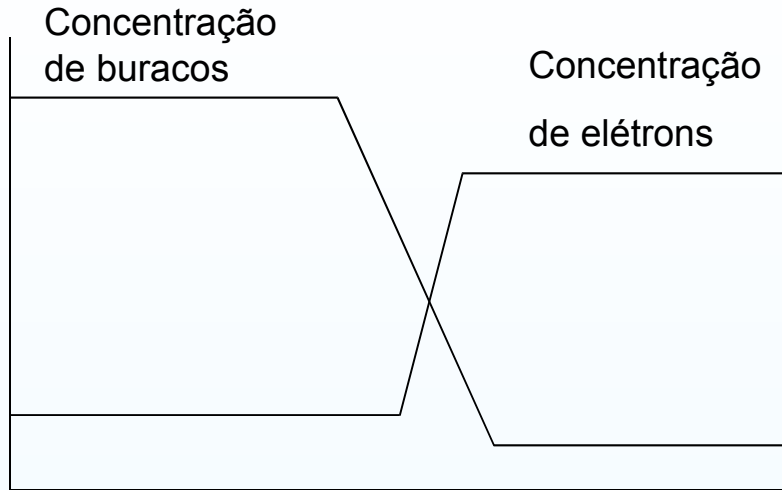
- As junções PN são a união de um semiconductor tipo P com um tipo N para a composição de um componente eletrônico.
- Componentes → diodos.
- Transistores → PNP e NPN
- P → buracos e N → elétrons
- Elétrons N → P e Buracos P → N



- Passagem de corrente até um certo ponto
- Tensão externa

SEMICONdutoRES

Potencial Eletrostático V



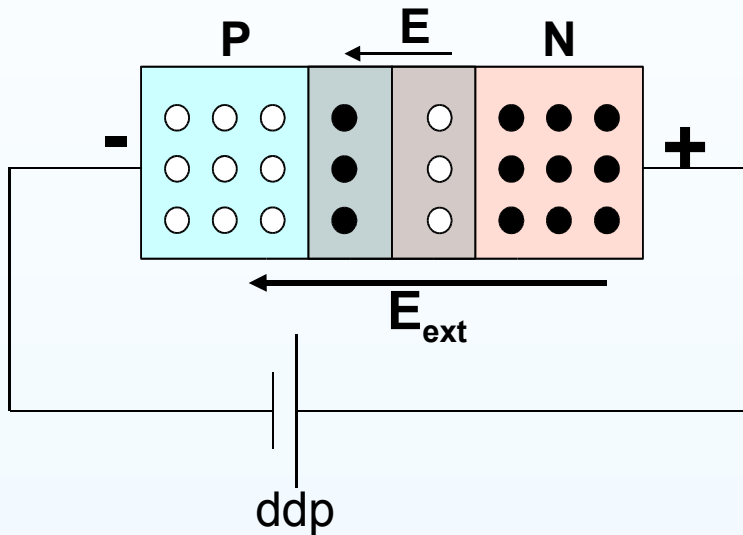
(a) *Variação da concentração de elétrons e buracos através de uma região não submetida a tensões*

(b) *Potencial eletrostáticos de íons receptores (-) e doadores (+)*

SEMICONdutoRES

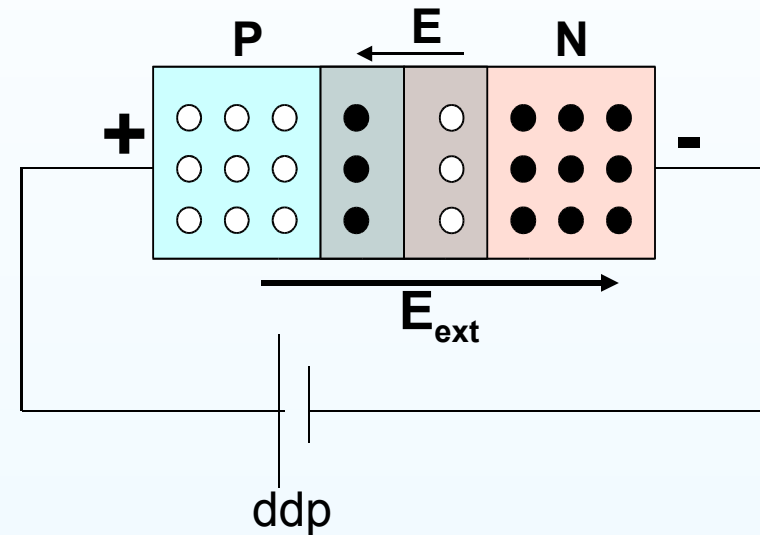
Retificação

- Tensão em um sentido → corrente alta
- Outros sentido → corrente baixa



Polarização Reversa:

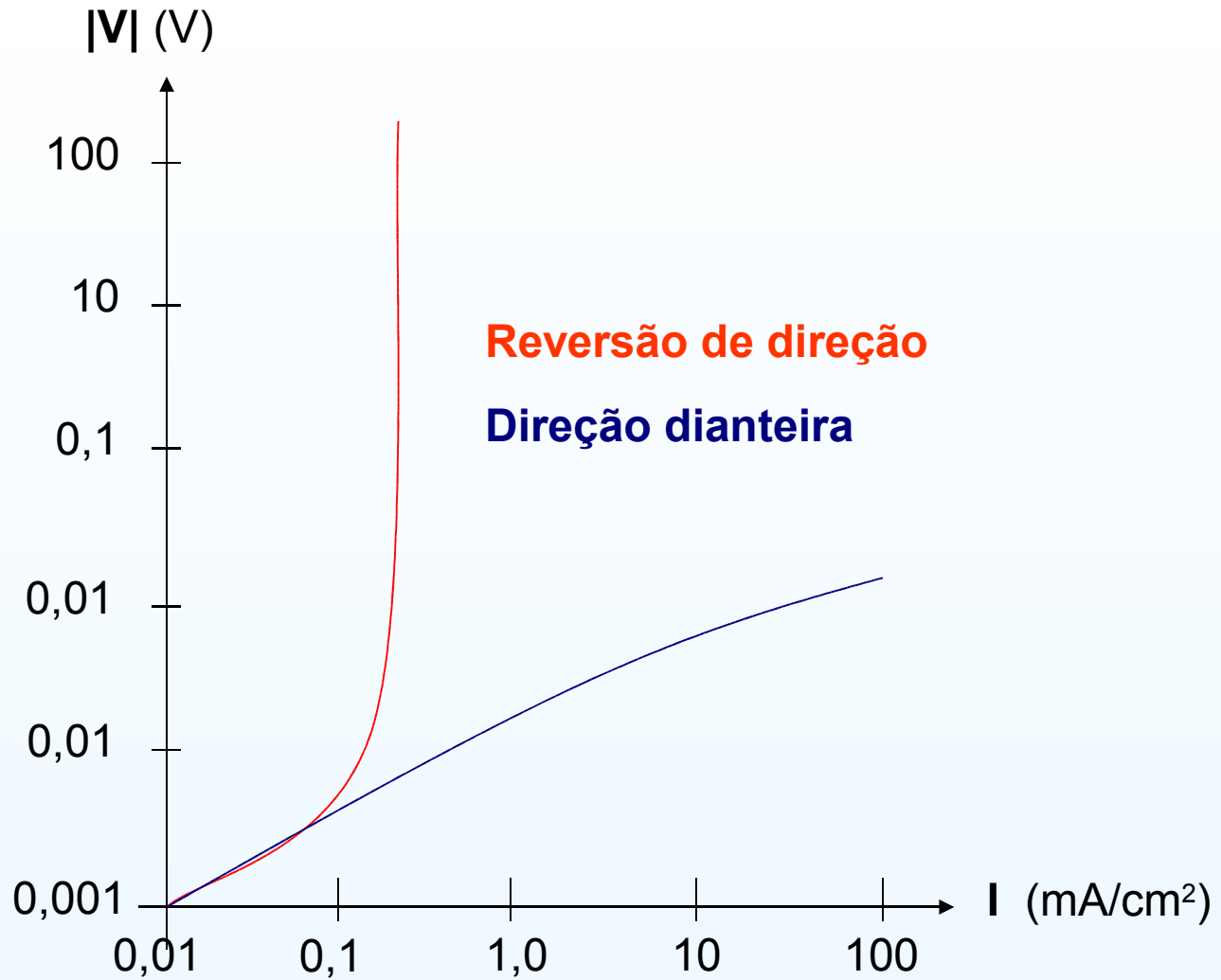
Poucos elétrons atravessam a junção



Polarização Direta:

Redução da barreira de potencial

SEMICONDUCTORES



Retificação de uma junção p-n no germânio