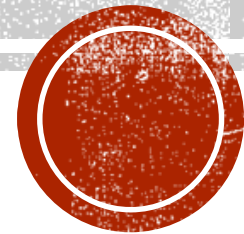


SEMICONDUTORES

João Paulo Neto Torres



- Os semicondutores com os dois tipos de impurezas denominam-se de compensados.
- Em equilíbrio termodinâmico um material semiconductor **exibe neutralidade elétrica** ou seja

$$\rho = 0 = -q(n_0 + N_a^-) + q(p_0 + N_d^+) \Leftrightarrow n_0 - p_0 = N_d^+ - N_a^-$$

Condições:

Se $N_d^+ - N_a^- > 0 \Leftrightarrow n_0 > p_0$



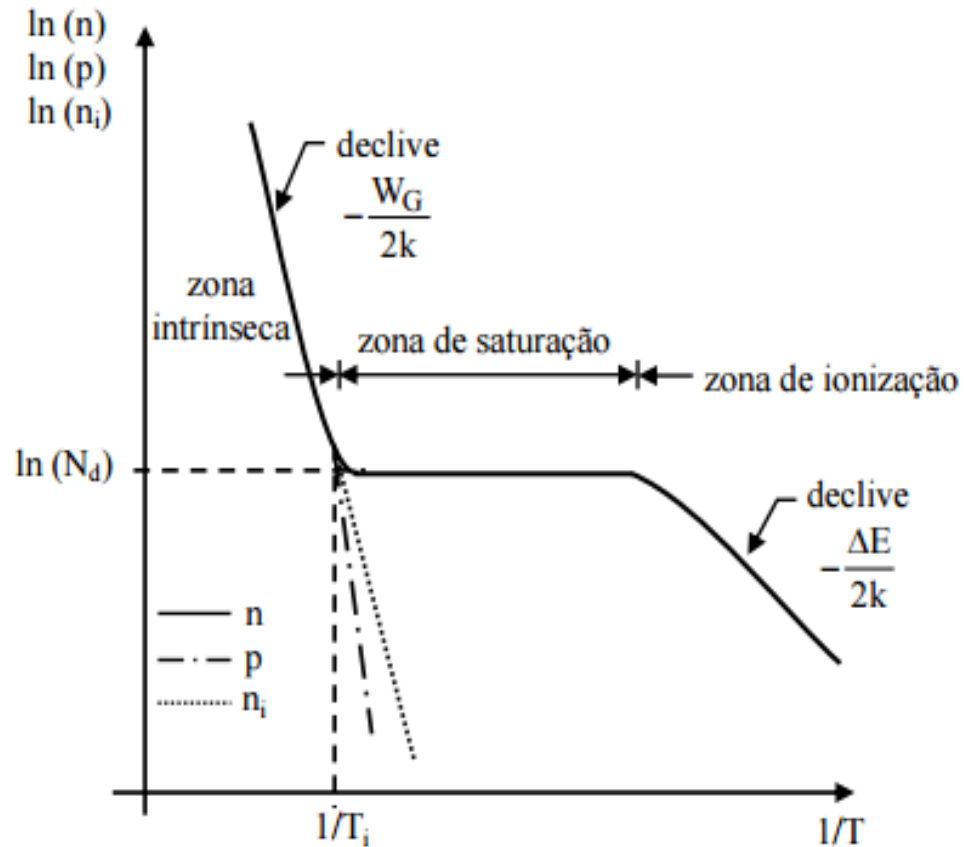
semiconductor do tipo n

Se $N_d^+ - N_a^- < 0 \Leftrightarrow n_0 < p_0$



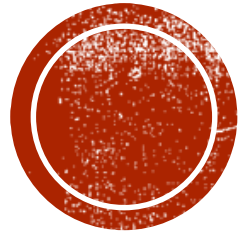
semiconductor do tipo p






- **Existência de três zonas distintas:**
 - **Zona de Ionização:** aumento da temperatura aumenta a densidade de portadores (andamento exponencial com T).
 - **Zona de Saturação:** impurezas todas ionizadas, densidade de elétrons praticamente constante.
 - **Zona Intrínseca:** densidade de elétrons e buracos idênticas.





GERAÇÃO E RECOMBINAÇÃO



- Em equilíbrio termodinâmico : .
- O processo de Geração e de Recombinação podem ser classificado como **radiativo** e **não – radiativo**
 - **Processos Radiativos** : envolvem a emissão ou absorção de fótons.
 - **Processos Não Radiativos**: envolvem interações com os átomos da rede cristalina, cujas vibrações estão associadas a partículas denominadas por fonões ou trocas de energia e momento com outro eletrão ou buraco.
- Os dois processos podem ocorrer banda a banda ou envolverem estados na banda proibida (transições de Shockley-Read-Hall(SRH)).
- Para a Recombinação banda a banda $R(T,n,p) = r(T) np$



Coefficiente da captura

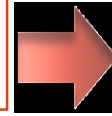


- **Efeito fotoelétrico Interno**

- **Hipótese:** semicondutor iluminado uniformemente com uma radiação monocromática de energia $W \geq W_G$.

- A Geração de pares de elétrons e buracos possui um termo adicional:

$$G = G_{ter} + G_{fe}$$



Geração de pares elétrons-buracos devido ao efeito fotoelétrico.



Geração de pares elétrons-buracos devido ao efeito térmico.

$$\begin{aligned} n_{il} &= n_0 + \Delta \\ p_{il} &= p_0 + \Delta \end{aligned}$$



Excesso de portadores resultantes da iluminação



- Para $t = 0$:

$$G = G_{ter} + G_{fe} \quad \text{e} \quad R = rn_i^2 = G_{ter} \Rightarrow G > R$$

Numa situação estacionária temos:

$$G_{ter} + G_{fe} = rn_{il}P_{il} \Leftrightarrow 1 + \frac{G_{fe}}{G_{ter}} = \frac{rn_{il}P_{il}}{G_{ter}} \Leftrightarrow n_{il}P_{il} = n_i^2 \left(1 + \frac{G_{fe}}{G_{ter}} \right)$$

A taxa de geração por efeito fotoelétrico está associada a uma grandeza característica do material: **o coeficiente de absorção** $\alpha[m^{-1}]$



Número de fótons que em média são absorvidos por unidade de comprimento.



- A quantidade $1/\alpha$ é a distância que em média o fóton percorre até ser absorvido.



Depende da energia dos fótons e do material

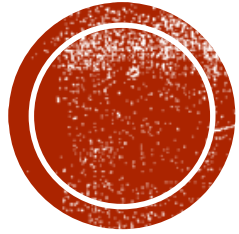
- Sendo $\phi(x)$ o fluxo de fótons com uma dada energia que incide na face da amostra de semiconductor, a sua taxa de variação com a distância é proporcional ao seu valor:

$$-\frac{d\phi(x)}{dx} = \alpha\phi(x) \Rightarrow \phi(x) = \phi_0 e^{-\alpha x}$$



$$G_{fe} = \alpha\phi_0 e^{-\alpha x}$$

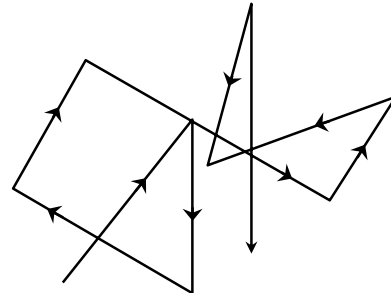




CONDUÇÃO



- Num cristal perfeito e sob o ponto de vista clássico, as partículas livres tem um movimento retilíneo e uniforme, limitado somente pelas paredes do cristal.
- Na realidade, o movimento é afetado pela existência de “**choques**” que obrigam a trajetória a desviar-se da forma aleatória.
- A temperatura é o fator que mais afeta os choques entre os elétrons.
- Com a temperatura, os átomos oscilam em torno das posições de equilíbrio, os elétrons existentes nesses átomos vão sofrer essas alterações movimentando-se segundo a figura:



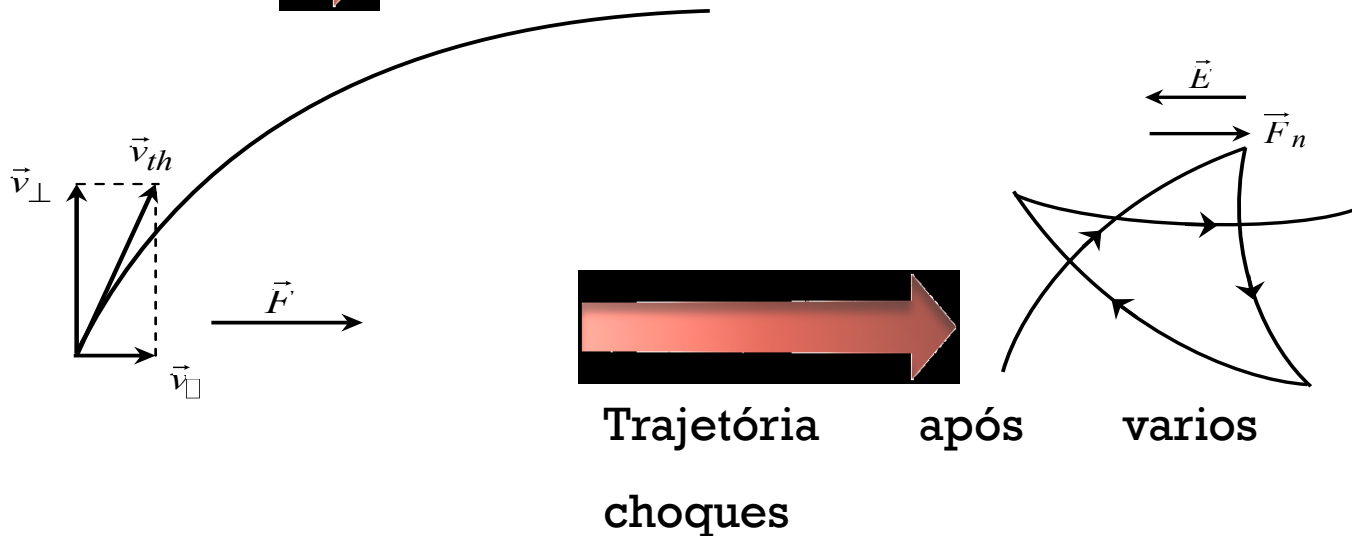
- Este movimento de agitação térmica **não dá origem a corrente elétrica resultando numa $\langle \vec{v}_{th} \rangle = 0$.**



- **Tempo Livre médio**(τ): tempo que decorre entre dois “choques” consecutivos.
- **Espaço Livre médio**: distância percorrida até ocorrer um choque.
- Na presença de um campo elétrico \mathbf{E} , os portadores de carga no semiconductor ficam sujeitos a uma força elétrica dada por:

$$\vec{F}_n = -q\vec{E} \text{ e } \vec{F}_p = q\vec{E}$$

$E = \text{const}$  Movimento é uniformemente variado, resultando numa trajetória parabólico.



Se \mathbf{E} não for elevado: $\vec{v} = \vec{v}_{th} + \vec{v}_F$

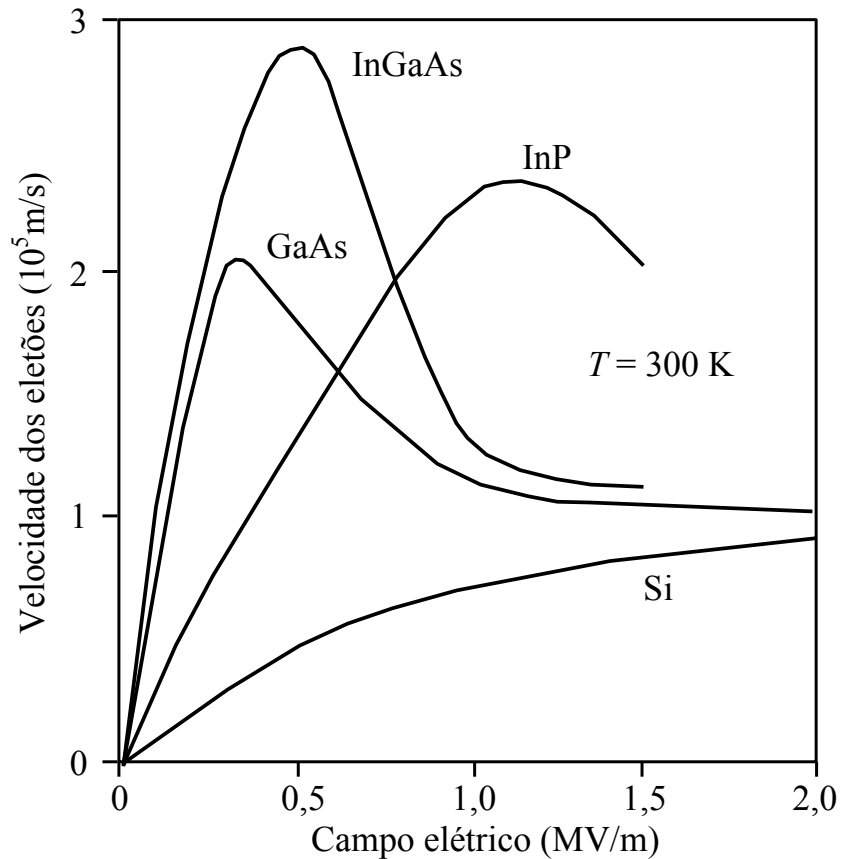
Em valores médios: $\langle \vec{v} \rangle = \langle \vec{v}_{th} \rangle + \langle \vec{v}_F \rangle = \langle \vec{v}_F \rangle$

Entre choques: $\langle \vec{v}_F \rangle = \frac{\vec{F}}{m^*} \langle t \rangle = \frac{\vec{F}}{m^*} \tau$

Para os eletrões: $\langle \vec{v}_F \rangle_n = -\frac{\tau_n}{m_n^*} \vec{E} = -(\mu_n) \vec{E}$

Mobilidade dos eletrões 



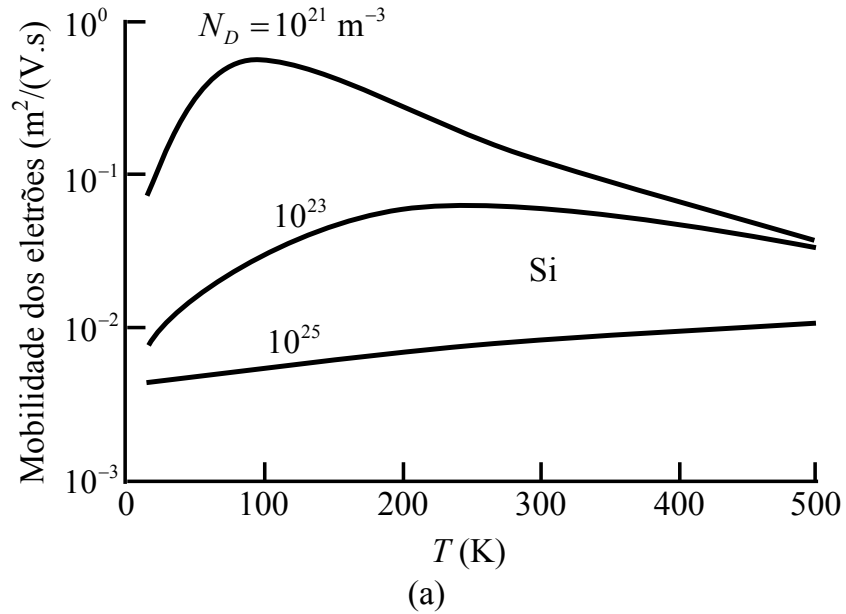


- As relações de proporcionalidade entre a velocidade média, e o campo elétrico, só são verificadas para campos elétricos baixos e:
 - quando não há alteração significativa da velocidade ou da energia dos portadores.
- A evolução da velocidade de deriva com o campo elétrico depende do material semiconductor e tende a saturar para campos elétricos elevados.


Valores típicos das mobilidades dos elétrons e buracos para vários semicondutores, a 300 K. É importante realçar que para um material a uma dada temperatura se verifica sempre $\mu_p < \mu_n$

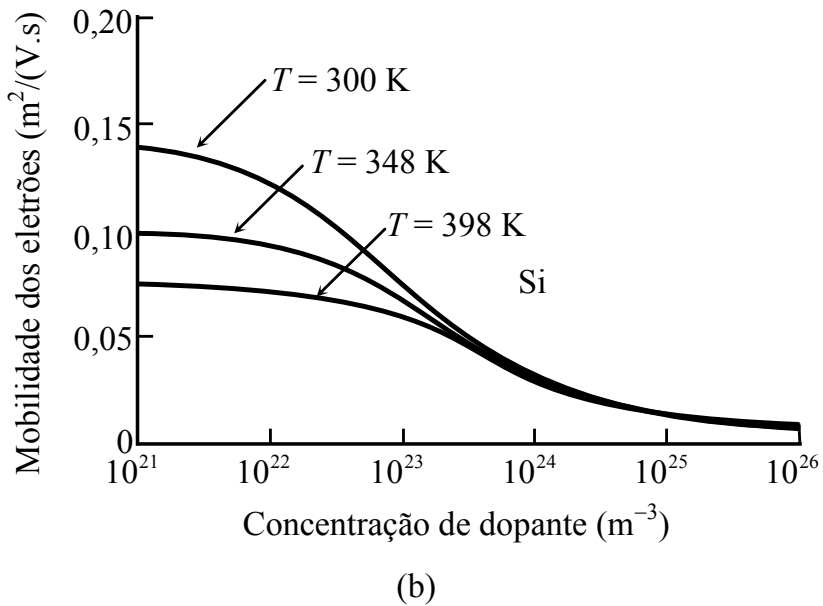
T = 300 K	Ge	Si	GaAs
μ_n ($\text{m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	0,39	0,15	0,85
μ_p ($\text{m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	0,19	0,045	0,04





✓ Um aumento da T , em geral, faz diminuir a mobilidade, porque aumenta a frequência de “choques” com os átomos da rede.

✓ Para um semiconductor com uma elevada N_D e na gama de T baixas, um aumento de T pode conduzir a um aumento da mobilidade  diminuição de choques associados às impurezas.



✓ Para uma dada T , o aumento da N_D conduz sempre a uma diminuição das mobilidades .



- A existência de $\langle \vec{v}_F \rangle \neq 0$ segundo a direção do campo dá origem a uma corrente elétrica. Atendendo que a densidade de corrente é dada por, $\vec{J} = \rho \langle \vec{v}_F \rangle$.
- Para os dois portadores de carga vem que:

$$\vec{J}_n = qn\mu_n\vec{E} \quad \text{e} \quad \vec{J}_p = qp\mu_p\vec{E}$$

e

$$\vec{J} = \vec{J}_p + \vec{J}_n = q(n\mu_n + p\mu_p)\vec{E}$$

Condutividade σ

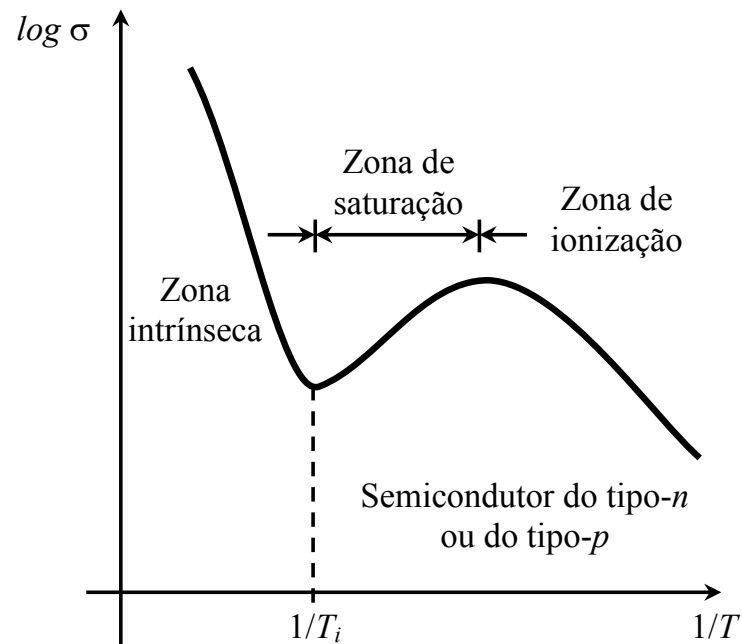
{

$\sigma_i = qn_i(\mu_n + \mu_p)$

$\sigma_n = qn\mu_n$

$\sigma_p = qp\mu_p$

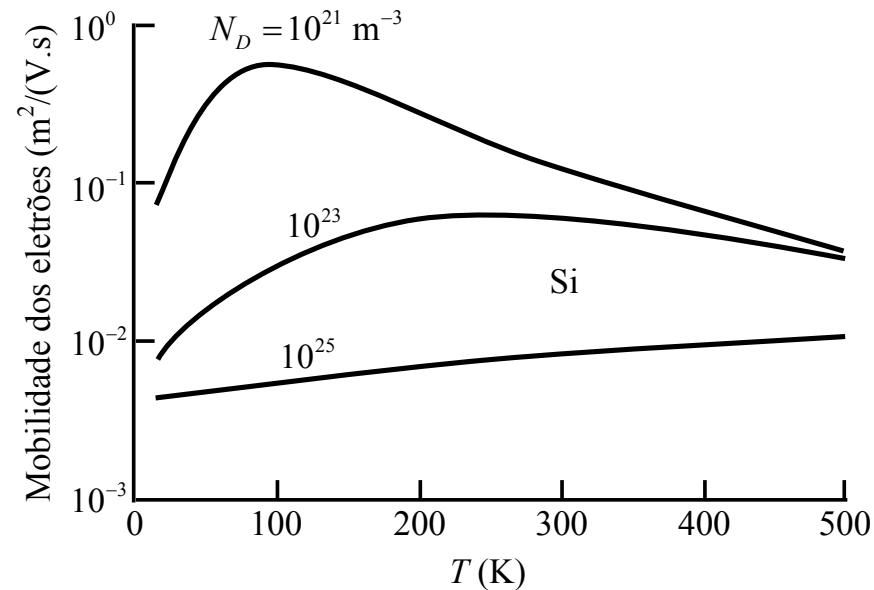
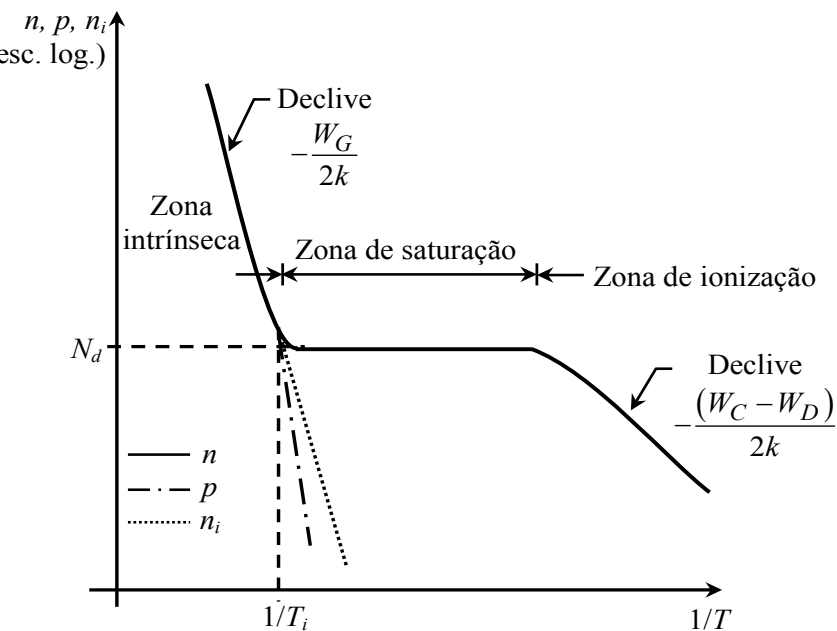




- É possível distinguir três zonas: **ionização, saturação e intrínseca.**

- **Zona de saturação:**

- diminuição da condutividade com o aumento da temperatura
- densidade de portadores aproximadamente constante neste intervalo de temperaturas, mas a mobilidade decresce.





- A sensibilidade à T das resistências de semicondutor pode, ser utilizada na implementação de **sensores de temperatura**.
- As resistências mais sensíveis à T são de semicondutor intrínseco e designam-se por **termístores de coeficiente de temperatura negativo** (NTC – *Negative Temperature Coefficient*).

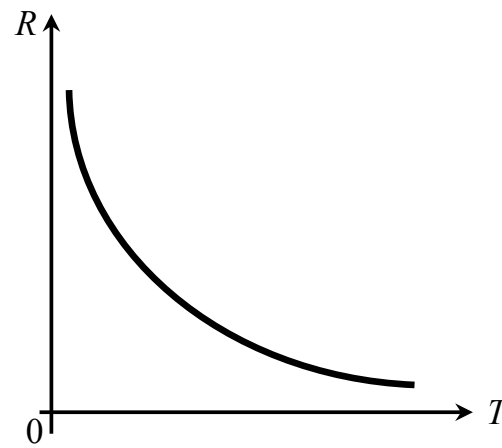
- Para um semicondutor intrínseco

$$\sigma = qn_i (\mu_n + \mu_p)$$

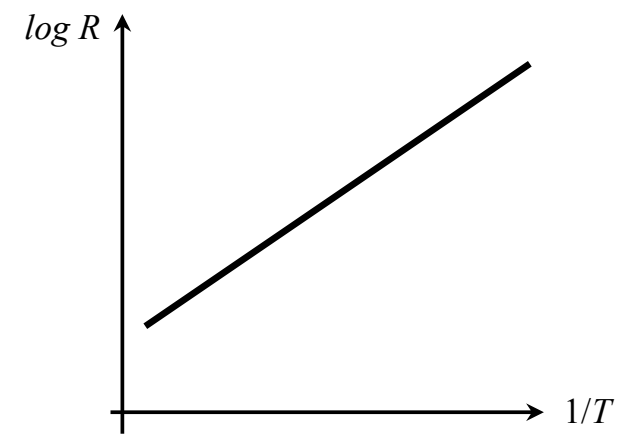
$$n_i \propto T^{3/2} e^{-W_G/2kT} \quad e \quad \mu \propto T^{-3/2}$$



$$R \propto e^{W_G/2kT}$$



(a)

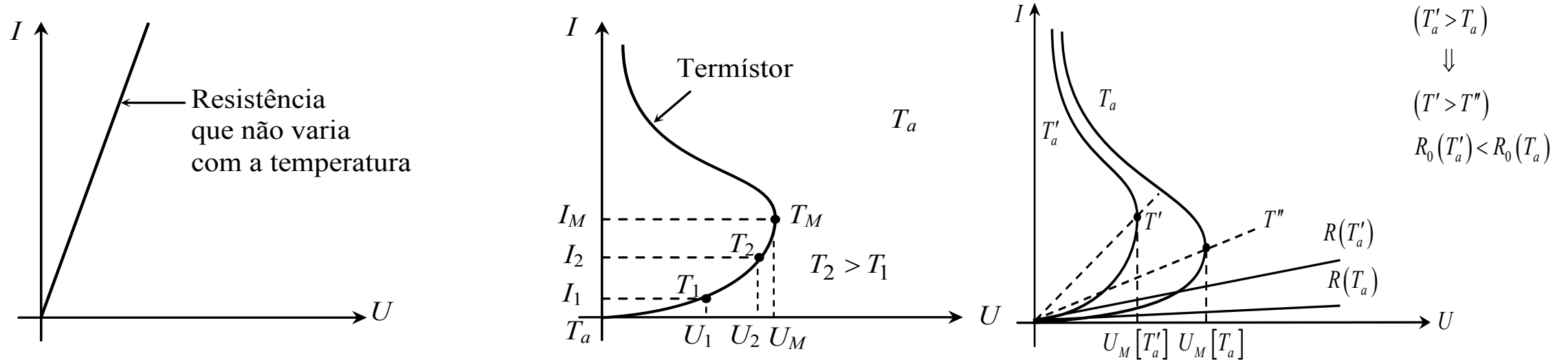


(b)



Característica $I(U)$

As R , quando atravessadas por I , encontram-se a T superior à T ambiente, devido ao efeito de Joule. Se a T e/ou o coeficiente de temperatura da resistividade não forem muito elevados, a R terá um valor aproximadamente constante com ou sem corrente.



Numa R a uma temperatura fixa $T > T$ ambiente (T_a), a potência recebida tem de ser igual à potência transferida para o exterior (transferência por condução)

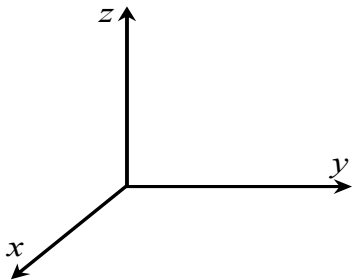
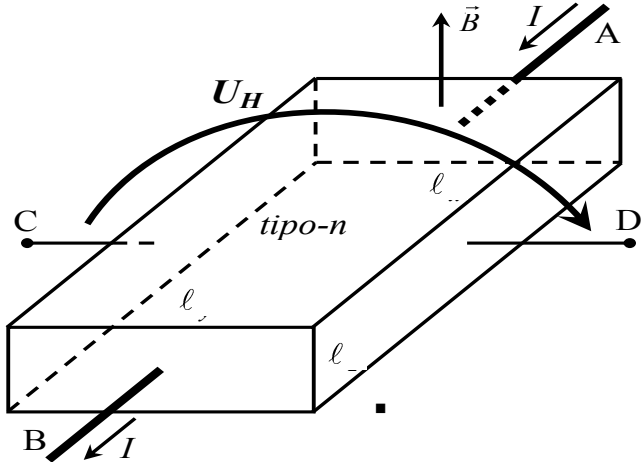
$$P = a(T - T_a)$$

Condutância térmica





- Descoberto em 1879, por Edwin Herbert Hall.
- Quando um condutor é submetido a um $\mathbf{B} \perp \mathbf{I}$, uma U_H surge nas laterais do semiconductor.

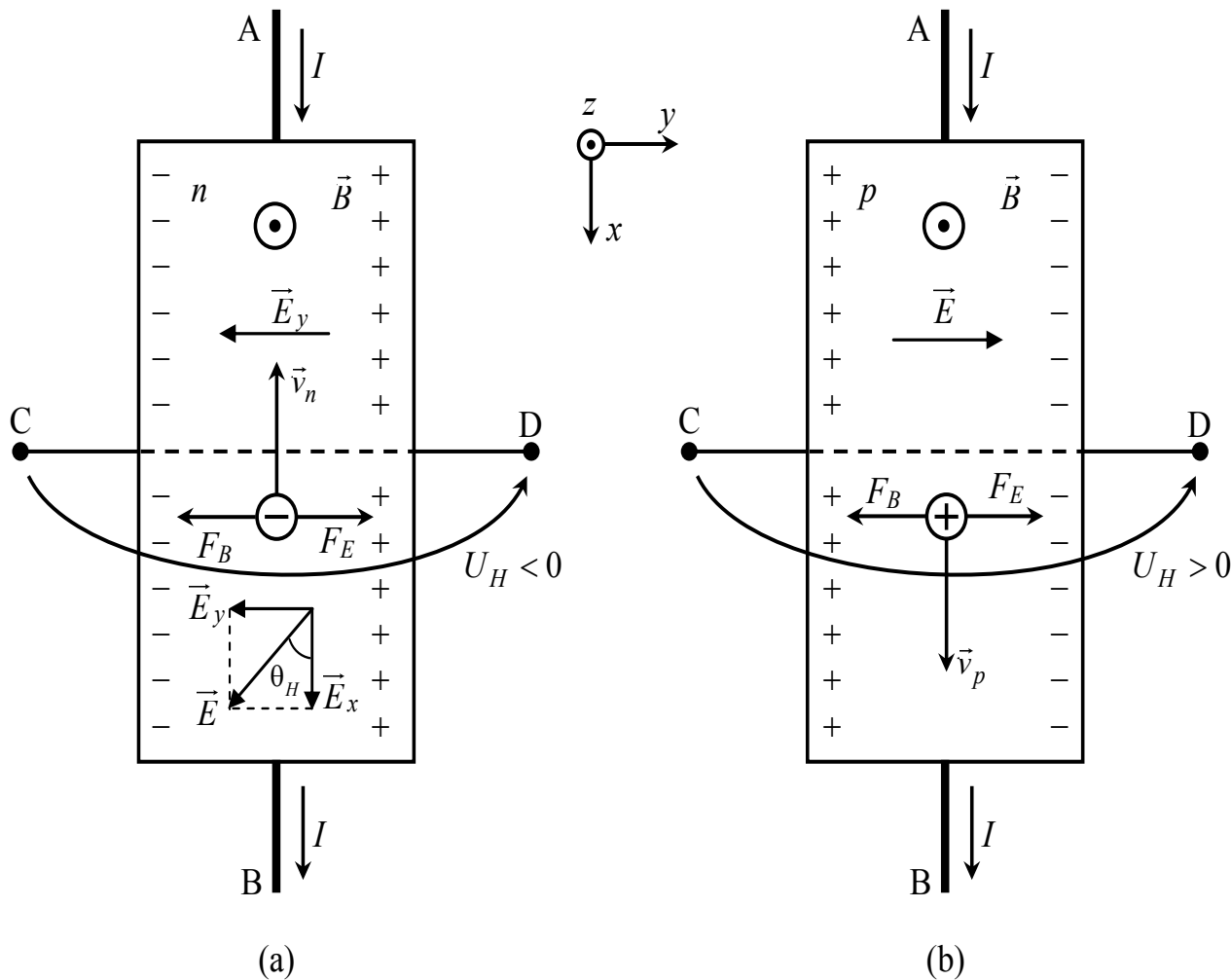


$$\vec{F}_B = -q [\langle \vec{v}_n \rangle, \mathcal{B}] \quad \vec{F}_B = q [\langle \vec{v}_p \rangle, \mathcal{B}]$$



- O vetor força magnética tem o sentido e a direção definidos pelo produto externo e pelo sinal da carga e um módulo dado por: $|\vec{F}_B| = q |\vec{v}| |\mathcal{B}| \text{sen}(\alpha)$





Considere-se, então, um semiconductor do tipo- n e despreze-se a contribuição para a corrente dos portadores minoritários.

Devido ao aparecimento de uma componente do campo segundo y , o campo total no semiconductor não será dirigido apenas segundo x . Ao ângulo formado entre o vetor campo elétrico e a sua componente segundo x , designa-se por ângulo de Hall, θ_H , que será tanto maior quanto maior for o efeito de Hall.

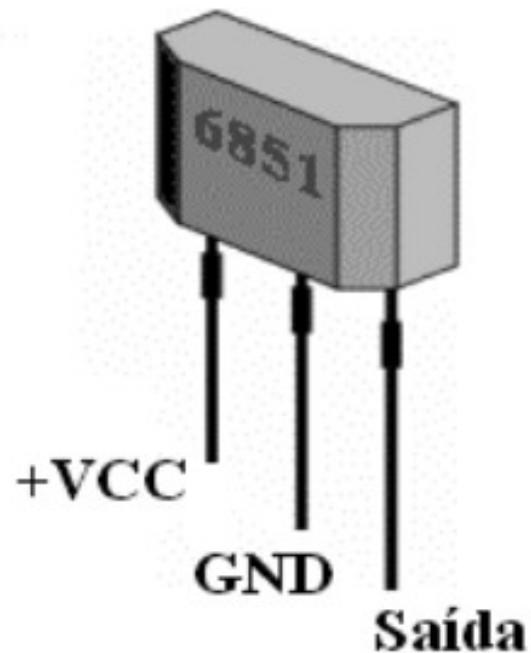
$$U_H = R_H \frac{IB}{\ell} \quad R_H = -\frac{1}{qn} \quad \text{ou} \quad R_H = \frac{1}{qp}$$



Caso ocorra a mudança do sentido do campo magnético sobre o semicondutor, a polaridade da tensão Hall também muda.

O sensor Hall é um elemento sensível aos campos magnéticos contínuos ou alternados.

Na figura seguinte, encontra-se o aspecto do sensor Hall (semicondutor).



É utilizado na indústria automovel, em sistema de automação industrial, em medidores de campo magnético, em sistema aeroespacial

A maioria dos instrumentos de medidas magnéticas (Gaussímetro) utiliza sensores de efeito Hall.

