



# Aula 1: Conceitos Básicos de Semicondutores

Prof. Allan Fagner Cupertino  
afcupertino@ieee.org



# Conteúdo

<b>Aula</b>	<b>Conteúdo</b>
Aula 1	Conceitos Básicos de Semicondutores
Aula 2	Diodos de potência
Aula 3	Associação de diodos e circuitos RLC chaveados
Aula 4	Retificadores a diodos
Aula 5	Transistores de potência - parte 1
Aula 6	Transistores de potência - parte 2
Aula 7	Conversores c.c./c.c.
Aula 8	Tiristores
Aula 9	Retificadores controlados
Aula 10	Conversores c.c./c.a.
Aula 11	Conversores c.a./c.a.
Aula 12	Conversores ressonantes

# Sumário

---

- Ionização térmica;
- Dopagem;
- Recombinação e controle de *lifetime*;
- Mecanismos de deriva e difusão;
- Ionização de impacto e avalanche.

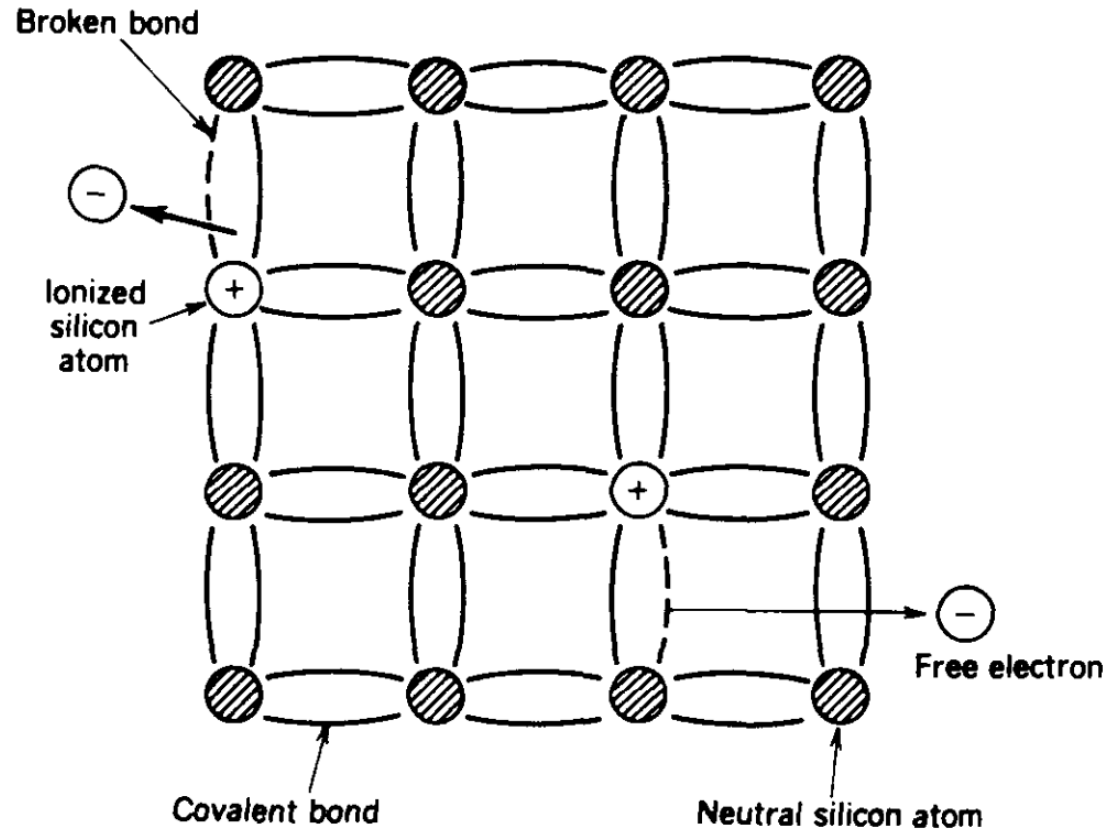


# Ionização Térmica



# Ionização térmica

- ❑ Vibrações térmicas podem ocasionar quebra as ligações covalentes!



Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 2nd. Edition, John Wiley, 1994.

# Ionização térmica – Semicondutor Intrínseco

- Densidade de elétrons livres:  $n$ ; Densidade de lacunas livres:  $p$
- Num semicondutor intrínseco:  $p = n = n_i(T)$  que é a densidade de portadores intrínsecos do material. Além disso:

$$n_i(T) \approx \sqrt{C \exp\left(-\frac{qE_g}{kT}\right)}$$

- $k = 1.4 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
- $E_g$  é a banda de energia (1.1 eV para o silício)
- $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
- T é a temperatura
- C é uma constante de proporcionalidade

Vídeo Recomendado: <https://www.youtube.com/watch?v=LRJZtuqCoMw>

# Corrente Elétrica e Condutividade

☐ Metais (ouro, platina, prata, cobre):

$$n_i \approx 10^{23} \text{ cm}^{-3} \text{ e } \sigma < 10^7 \frac{\text{cm}}{\Omega}$$

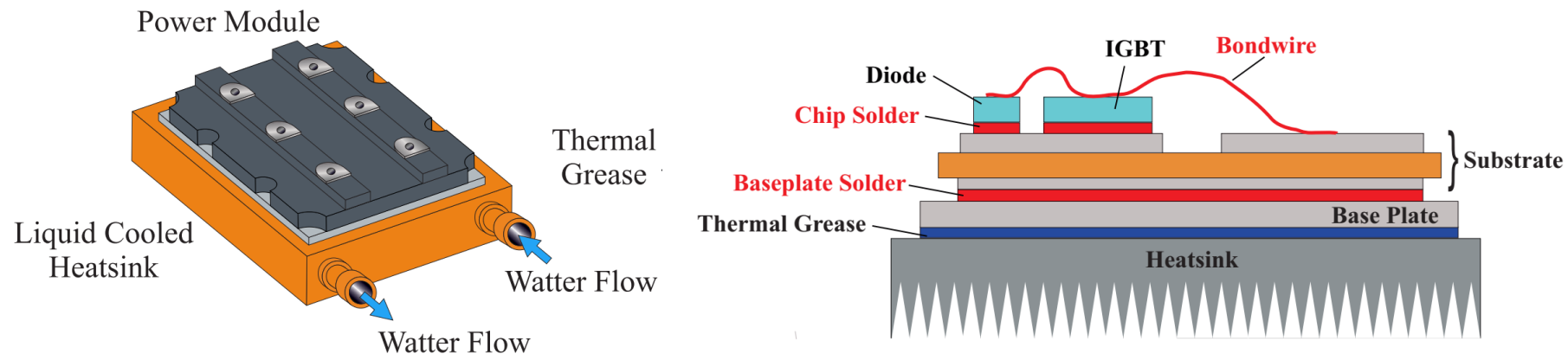
☐ Isolantes (dióxido de silício, nitreto de silício, óxido de alumínio):

$$n_i < 10^3 \text{ cm}^{-3} \text{ e } \sigma < 10^{-10} \frac{\text{cm}}{\Omega}$$

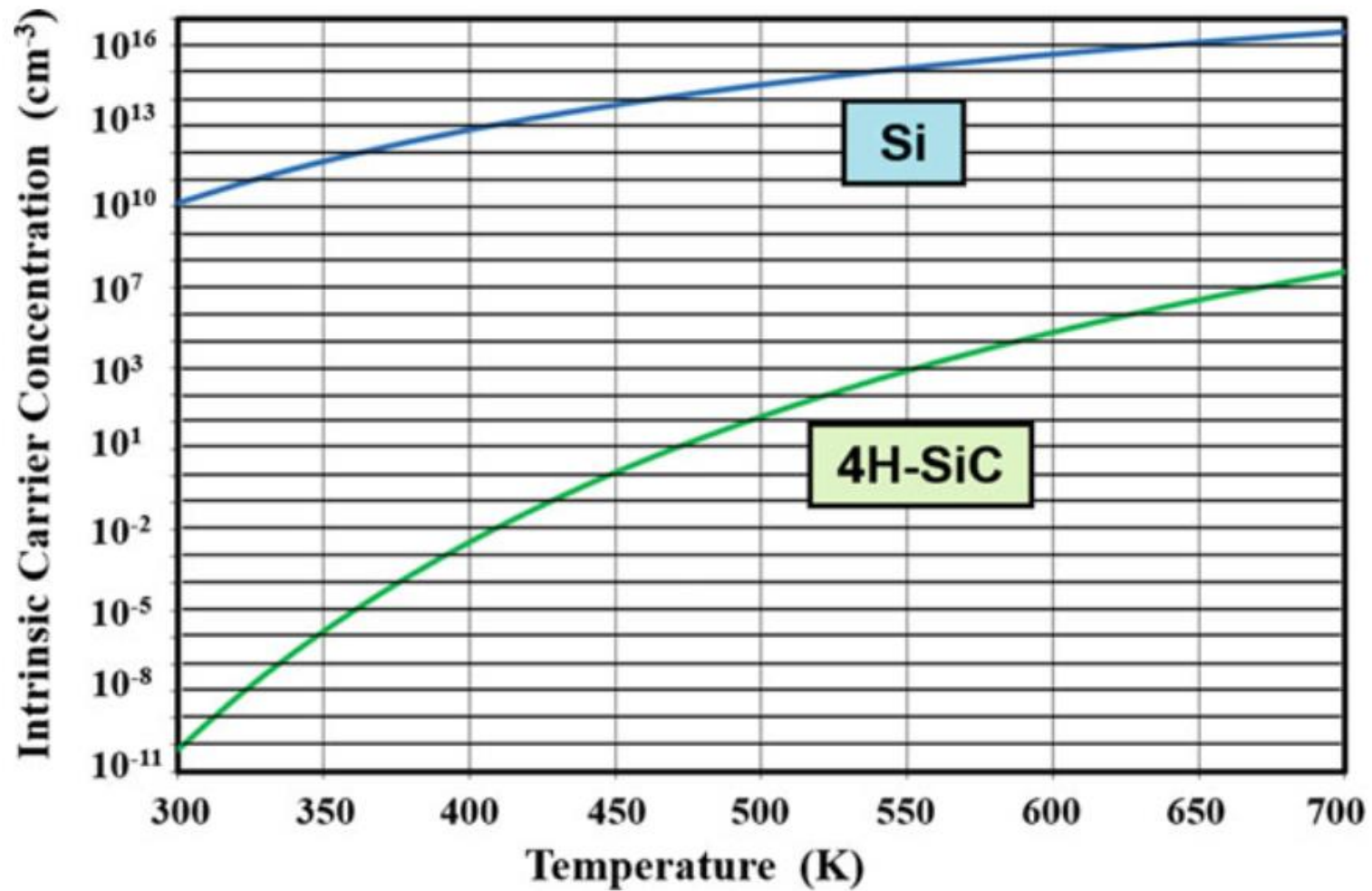
☐ Semicondutores (silício, arseneto de gálio, diamante, etc):

$$10^8 < n_i < 10^{19} \text{ cm}^{-3} \text{ e } 10^{-10} < \sigma < 10^4 \frac{\text{cm}}{\Omega}$$

Os módulos de potência modernos são constituídos de um conjunto de materiais!!!!



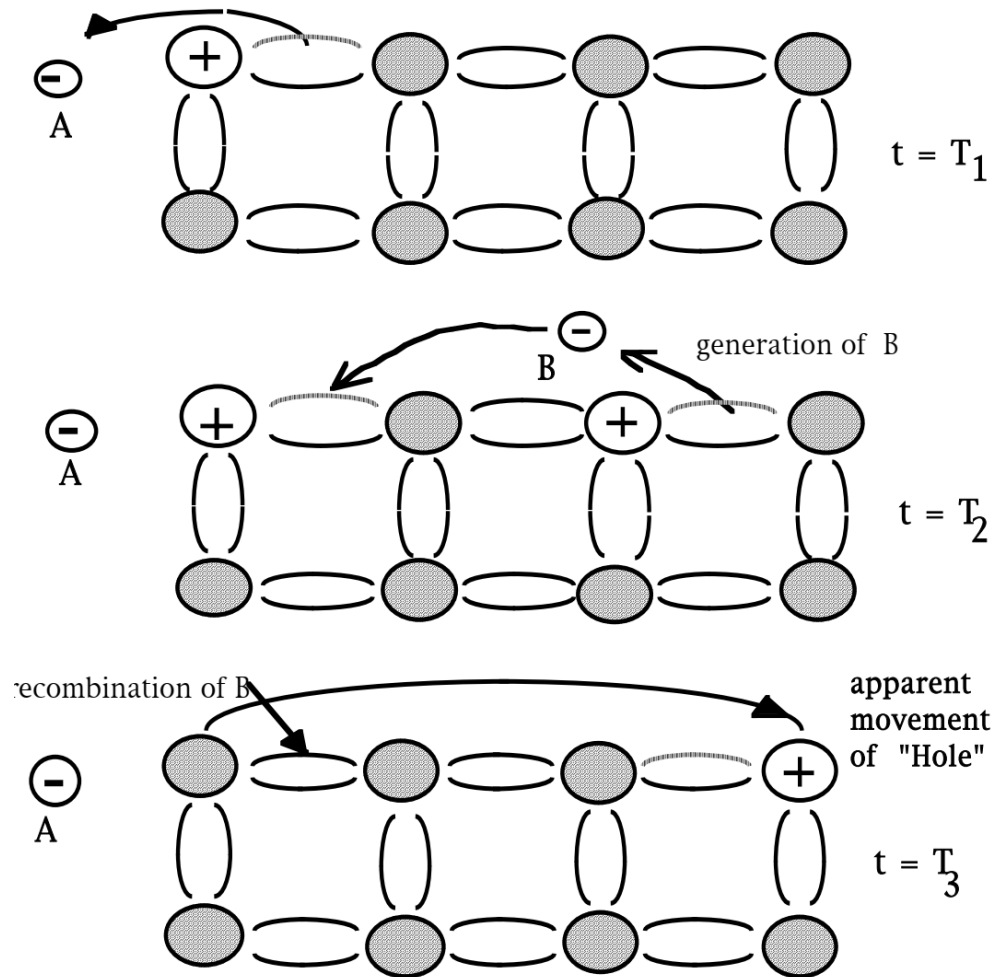
# Ionização térmica – Semicondutor Intrínseco



Fonte: Baliga, B. J. "Fundamentals of Semiconductor Devices", Springer.



# Elétrons e lacunas: movimento aparente



Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 2nd. Edition, John Wiley, 1994.



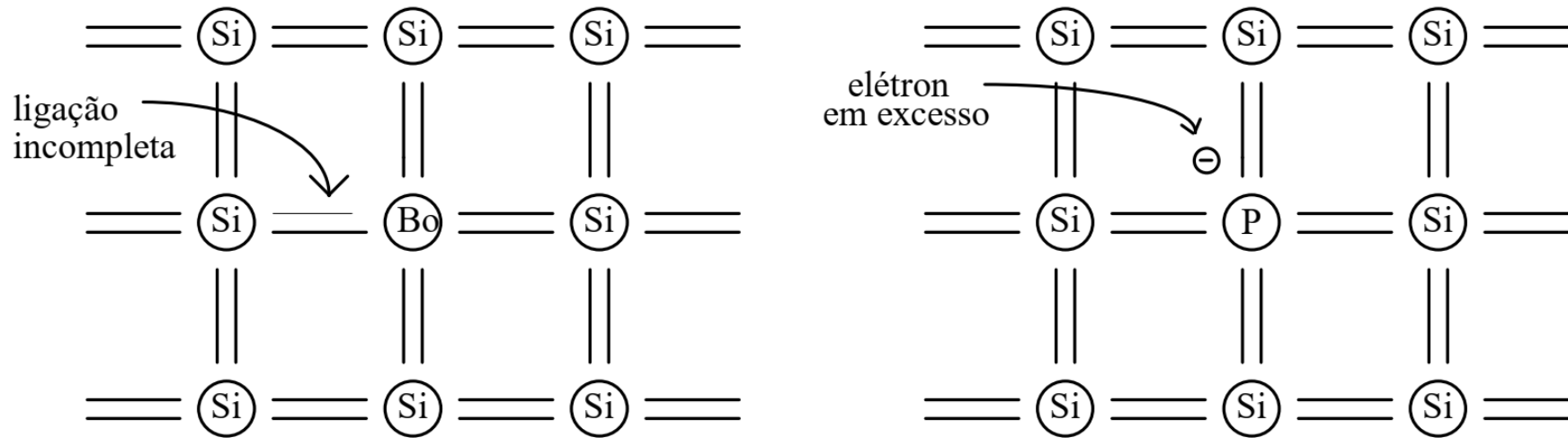
# Dopagem



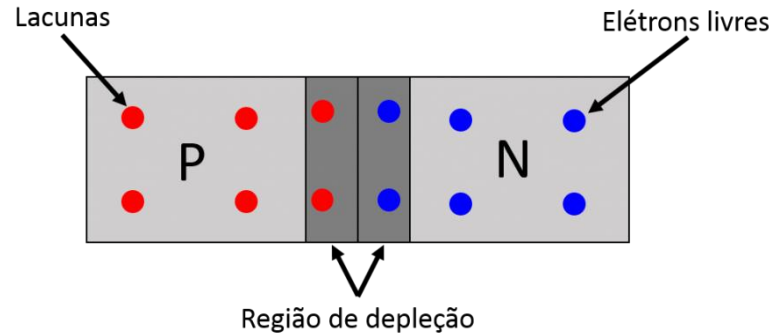
# Dopagem

- Na camada chamada de P, adiciona-se materiais aceitadores de elétrons (3 elétrons na camada de valência: boro, alumínio);
- Na camada chamada de N, adiciona-se materiais doadores de elétrons (5 elétrons na camada de valência: fósforo);
- No material tipo P, as lacunas são os portadores majoritários e os elétrons são os portadores minoritários;
- No material tipo N, os elétrons são os portadores majoritários e as lacunas são os portadores minoritários;
- Formada por fusão, difusão ou crescimento epitaxial.
- IMPORTANTE:** Note que os materiais são eletricamente neutros (o número de prótons é igual ao número de elétrons).

# Dopagem do material semiconductor



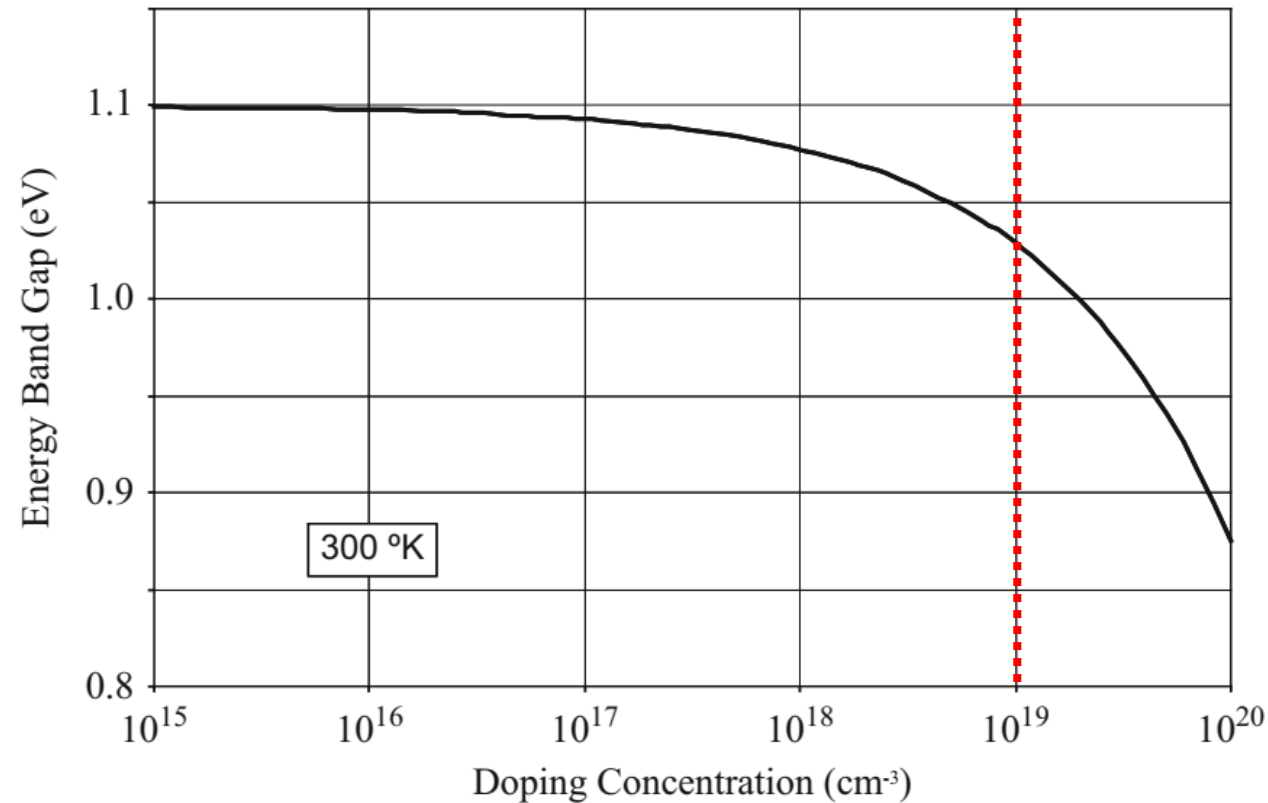
Fonte: <http://vm1-devel.fee.unicamp.br/fecce/node/493>



<http://www.vandertronic.com/index.php/diodos/?print=print>

# Efeito da dopagem

- A dopagem geralmente é limitada a concentrações da faixa de  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  que é pequena comparada a densidade de átomos (em torno de  $10^{23} \text{ cm}^{-3}$ );



Fonte: Baliga, B. J. “Fundamentals of Semiconductor Devices”, Springer.



# Recombinação e controle *De Lifetime*



# Recombinação

- ❑ Portadores minoritários são gerados em equilíbrio térmico;
- ❑ A recombinação de pares lacuna elétron é esperada;
- ❑ Portadores podem ser capturados pelas impurezas ou defeitos na estrutura cristalina;
- ❑ Fenômeno complexo de ser analisado. Abordagem simplificada:

$$\frac{d(\delta n)}{dt} = -\frac{\delta n}{\tau}$$

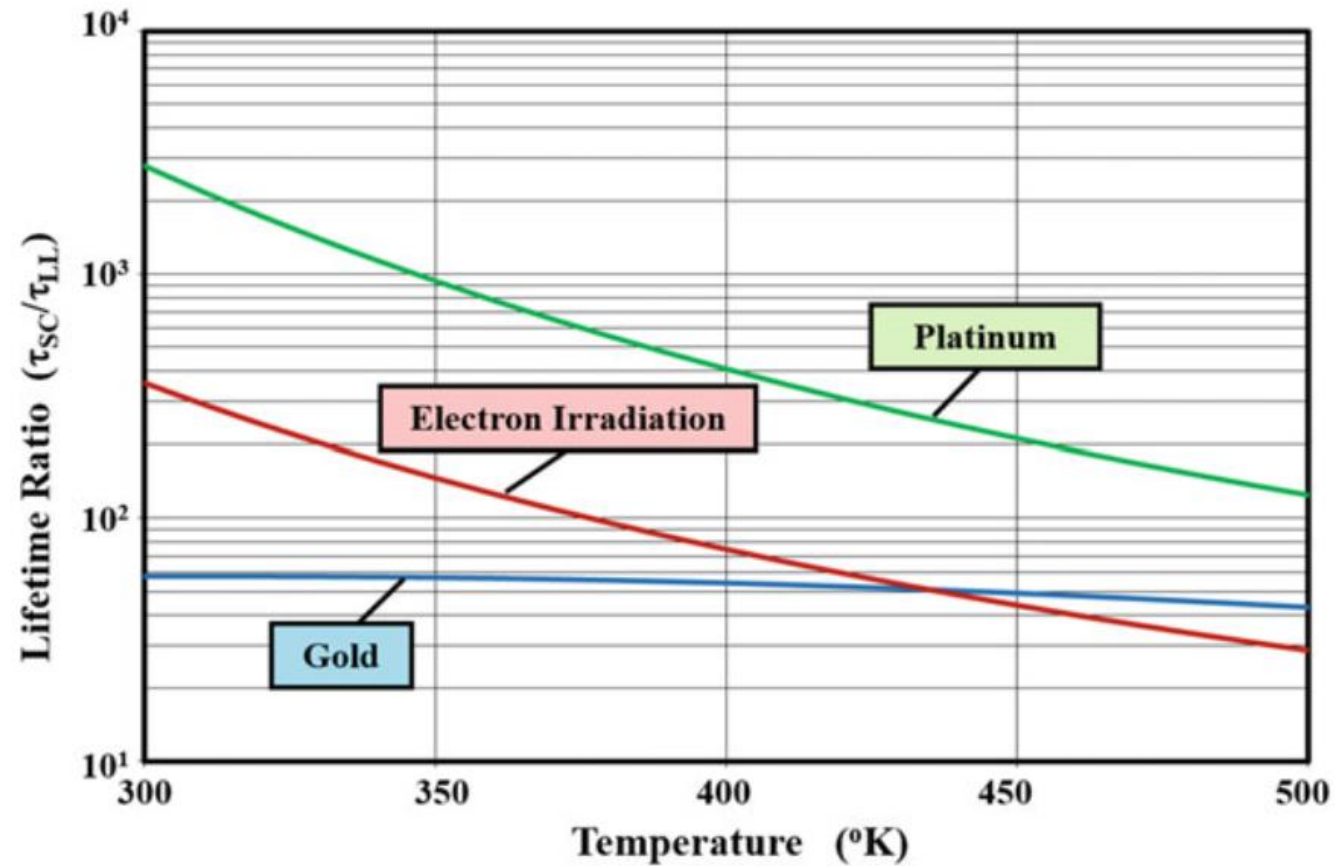
- $\delta n$  é o excesso de carga;
- $\tau$  é a constante de tempo de vida dos portadores minoritários (*lifetime*).

# Recombinação

- $\tau$  aumenta com a temperatura (isto aumenta o tempo de comutação de dispositivos bipolares).
- Afeta as perdas de condução de dispositivos bipolares;
- Afeta a corrente de saturação reversa do componente;
- Controle de *lifetime* é importante → criação de centros de recombinação!
- Inserção de platina, ouro ou irradiação eletrônica (CAL).



# Controle de *lifetime*



- ❑ Maiores valores de *lifetime* para indicam melhores performances de condução de dispositivos bipolares e maiores corrente de fuga.

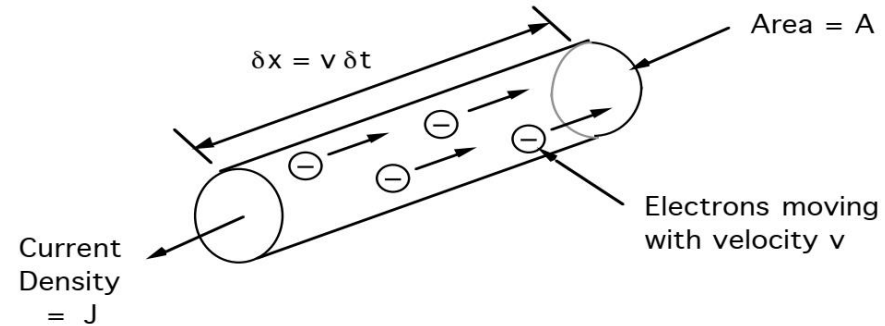
Fonte: Baliga, B. J. "Fundamentals of Semiconductor Devices", Springer.



# Mecanismos de Deriva e Difusão



# Deriva e difusão



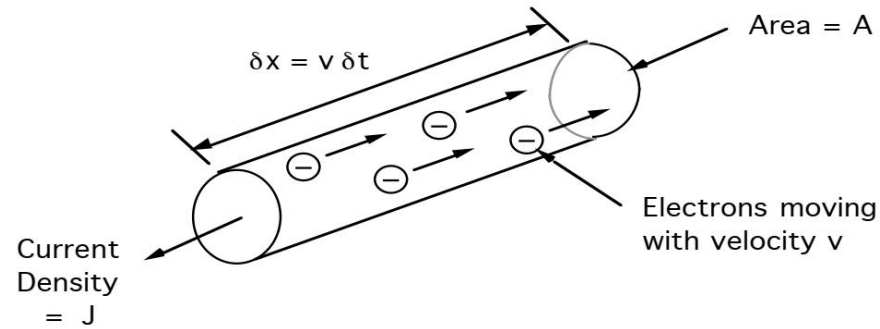
□ Para campos elétricos inferiores a  $10^4 \frac{V}{cm}$ , pode-se escrever que:

$$v_D = \mu E$$

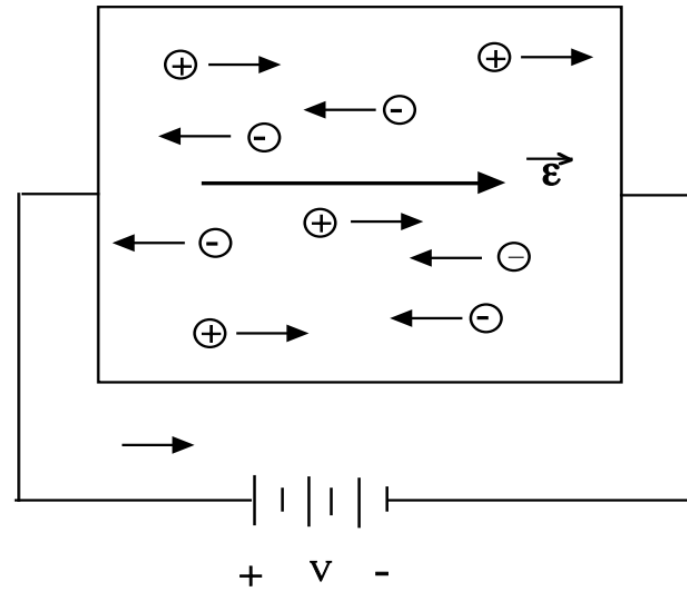
- $E$  é o campo elétrico aplicado
- $\mu_n$  e  $\mu_p$  são as mobilidades dos elétrons e das lacunas no material
- A mobilidade das lacunas e dos elétrons são diferentes!

Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 2nd. Edition, John Wiley, 1994.

# Densidade de corrente de deriva

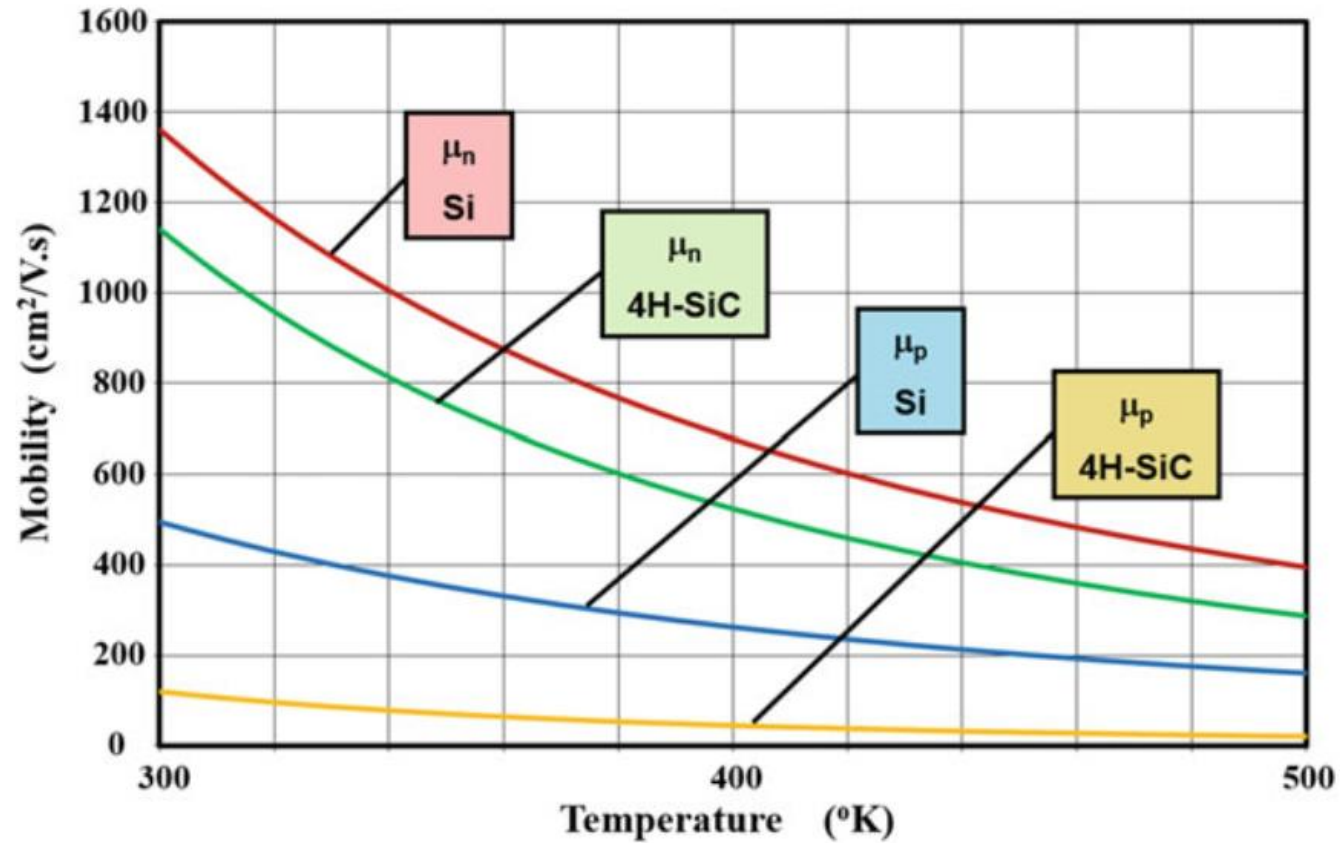


$$J_d = q\mu_n n E + q\mu_p p E$$



Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 2nd. Edition, John Wiley, 1994.

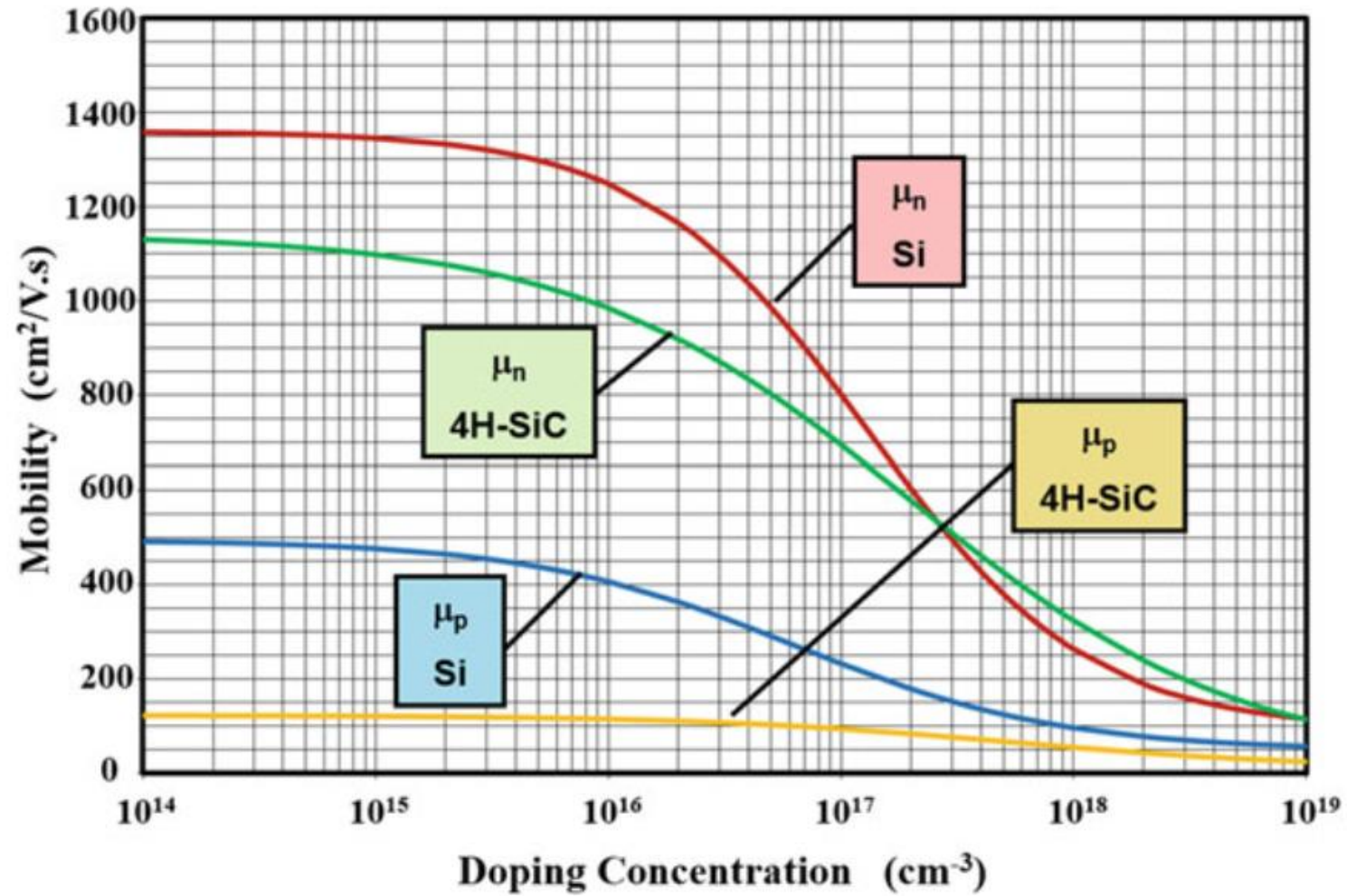
# Mobilidade dos portadores



- Por que a mobilidade cai com a temperatura?
- Por que a mobilidade do elétron e da lacuna são diferentes?

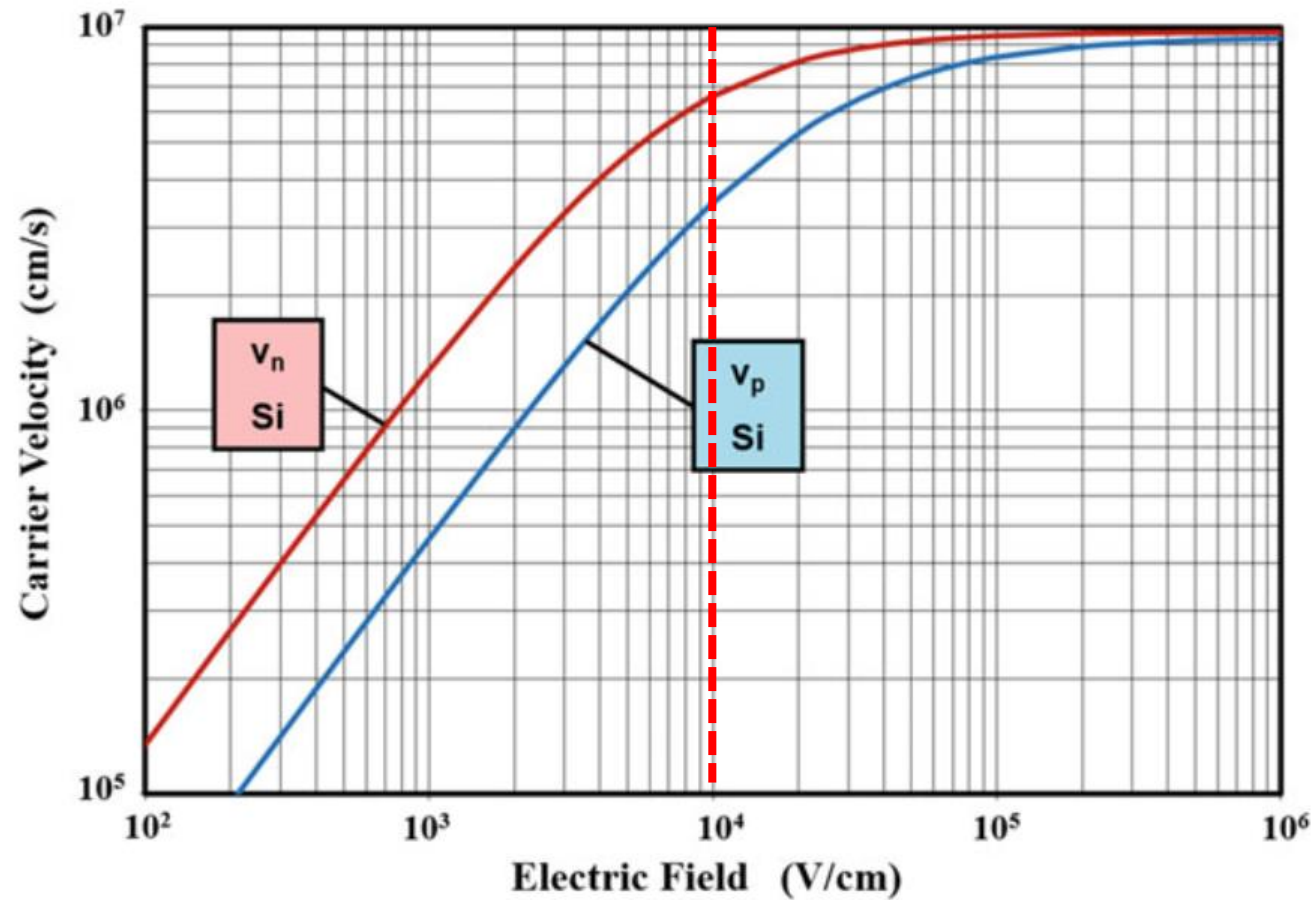
Fonte: Baliga, B. J. "Fundamentals of Semiconductor Devices", Springer.

# Mobilidade dos portadores



Fonte: Baliga, B. J. "Fundamentals of Semiconductor Devices", Springer.

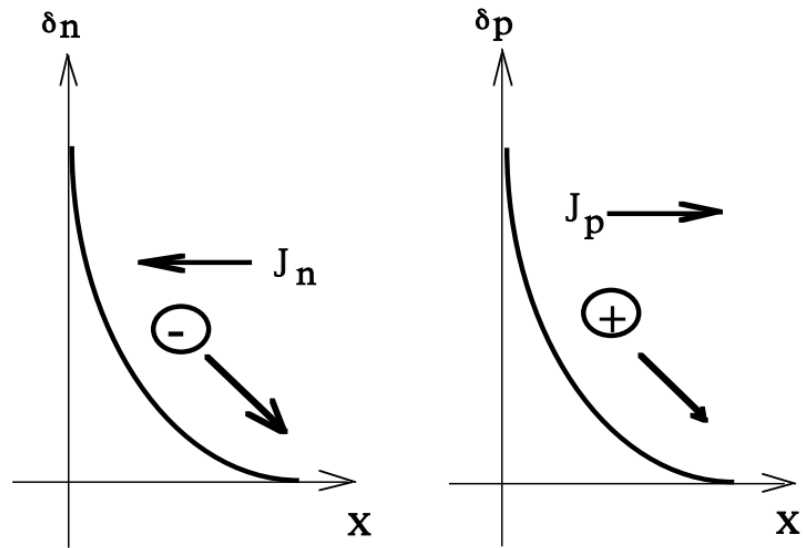
# Velocidade dos portadores versus E - Si



❑ Por que existe uma saturação na velocidade?

Fonte: Baliga, B. J. "Fundamentals of Semiconductor Devices", Springer.

# Densidade de corrente de difusão



$$J_{df} = qD_n \frac{dn}{dx} - qD_p \frac{dp}{dx}$$

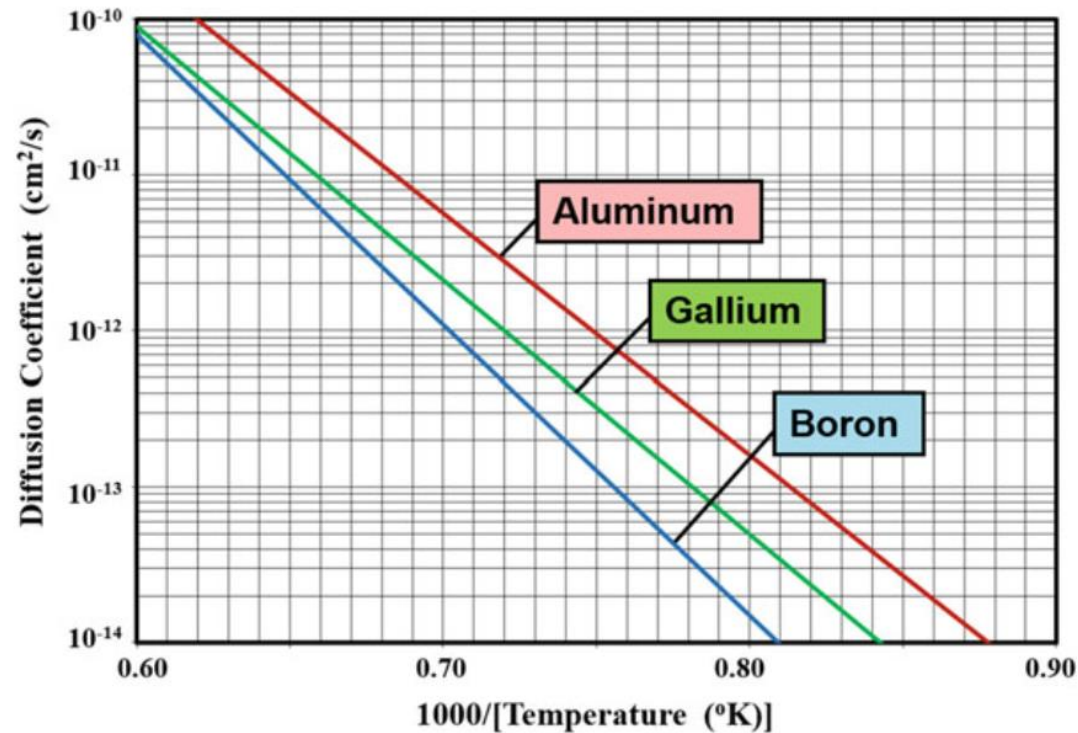
$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{D_n}{\mu_n} = \frac{kT}{q}$$

- ❑ Os mecanismos de deriva e difusão estão presentes em todos os dispositivos eletrônicos
- ❑ Na maioria das vezes, um dos fenômenos é predominante
- ❑ Num caso geral, ambas as densidades de corrente são importantes para prever o comportamento do dispositivo.

Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 2nd. Edition, John Wiley, 1994.



# Coeficiente de difusão



- ❑ Junção de 100  $\mu\text{m}$ : 98 horas para o Alumínio e 556 horas para o Boro (a 1200 °C);
- ❑ Boro – IGBT's e MOSFET's; Alumínio e Gálio – Tiristores e GTO's.

Fonte: Baliga, B. J. "Fundamentals of Semiconductor Devices", Springer.



# Ionização de Impacto



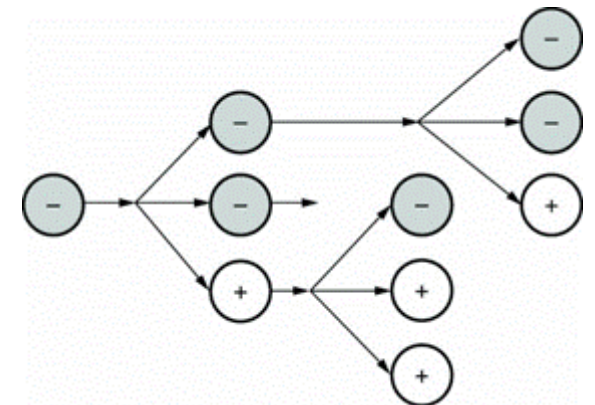
# Ionização de Impacto

- ❑ Definido como o número de pares elétron/lacunas gerados por um elétron atravessando 1 cm da região de depleção na direção do campo elétrico.
- ❑ Lei de Chynoweth:

$$\alpha = a \exp\left(-\frac{b}{E}\right)$$

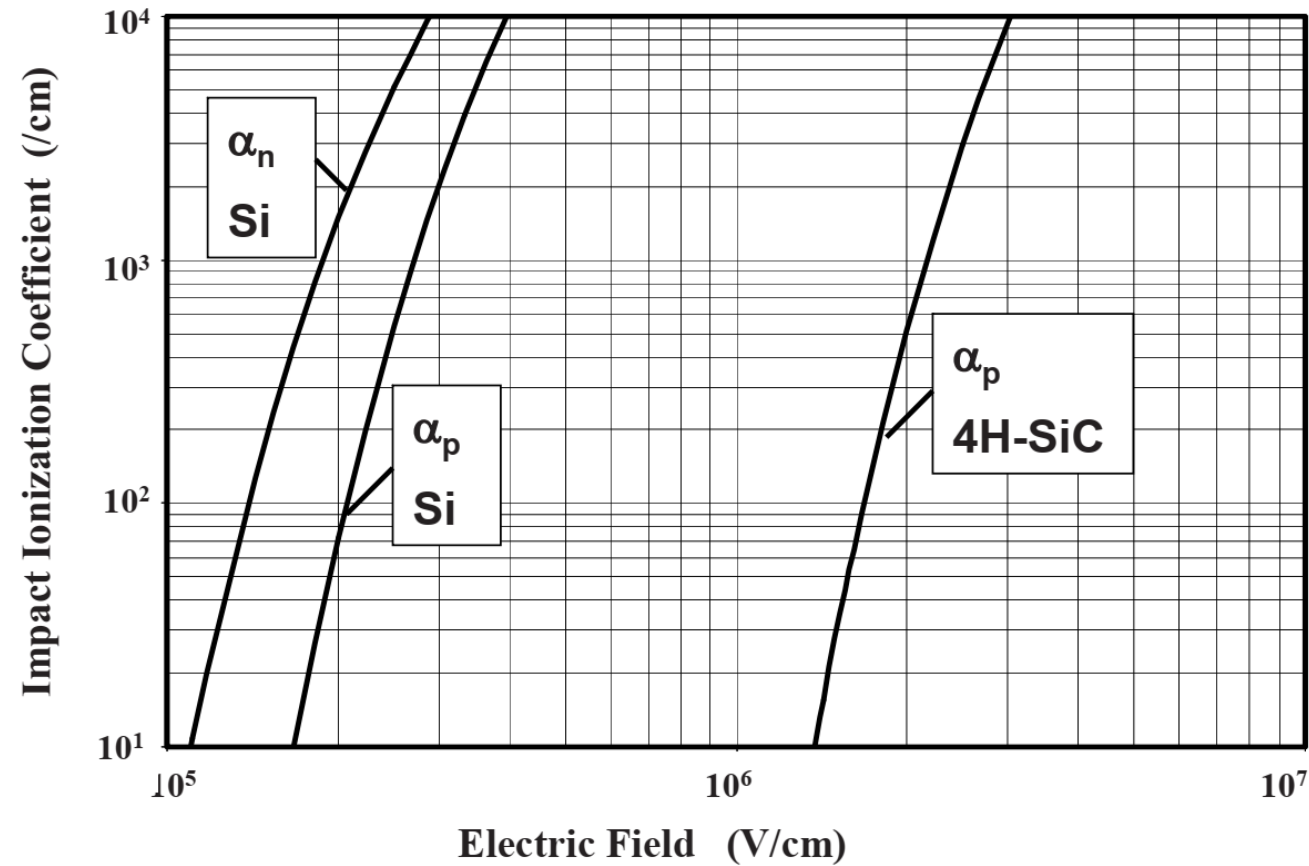
Onde  $a$  e  $b$  são parâmetros obtidos experimentalmente e dependentes da temperature.

- ❑ O processo de ionização define um limite de campo elétrico no material;
- ❑ Acima deste limite, ocorre o fenômeno conhecido como avalanche.



Fonte: Baliga, B. J. "Fundamentals of Semiconductor Devices", Springer.

# Coeficiente de ionização $\alpha$



❑ Quais dos dois materiais é capaz de bloquear mais tensão para o mesmo comprimento de junção?

Fonte: Baliga, B. J. "Fundamentals of Semiconductor Devices", Springer.

# Obrigado pela Atenção



[www.gesep.ufv.br](http://www.gesep.ufv.br)



<https://www.facebook.com/gesep>



[https://www.instagram.com/gesep\\_vicosa/](https://www.instagram.com/gesep_vicosa/)



[https://www.youtube.com/channel/UCe9KOSGORXh\\_hDBIcxMU2Nw](https://www.youtube.com/channel/UCe9KOSGORXh_hDBIcxMU2Nw)



Estimate - Sistemas  
Fotovoltaicos



<https://play.google.com/store/apps/details?id=br.developer.gesep.estimate>