



CAPITULO 3

Aula 14/15

Modelos de Cargas, junção pn na condição de circuito aberto, potencial interno da junção (Cap 3. p.127-128)

Eletrônica I – PSI3321

Programação para a Segunda Prova

14 ^a 23/05	Modelos de cargas, junção pn na condição de circuito aberto, potencial interno da junção, junção pn polarizada, exercícios.	Aula avulsa + Sedra, Cap. 3 p. 121-126	Teste 08 9h20-9h35
15 ^a 26/05	Distribuição de portadores minoritários na junção pn diretamente polarizada. Dedução elementar da equação de corrente na junção pn, exercícios.	Aula avulsa + Sedra, Cap. 3 p. 127-128	
16 ^a 30/05	Capacitância de difusão, largura da região de depleção da junção pn polarizada, capacitância de depleção. a junção pn na região de ruptura (efeito zener e efeito avalanche), exercícios.	Sedra, Cap. 3 p. 124-125	Teste 09 9h20-9h35
17 ^a 02/06	A junção pn na região de ruptura (efeito zener e efeito avalanche), exercícios.	Sedra, Cap. 3 p. 128-129	
18 ^a 06/06	Estruturas e símbolos dos transistores bipolares de junção, definição dos modos de operação (corte, ativo, saturação) do TBJ, operação do transistor npn no modo ativo (polarização e distribuição de portadores minoritários).	Sedra, Cap. 5 p. 235-238	Teste 10 9h20-9h35
19 ^a 13/06	Equações das correntes no transistor (definição do ganho de corrente em emissor comum - β - e do ganho de corrente em base comum - α), modelos de circuitos equivalentes para grandes sinais do transistor npn operando no modo ativo, exercícios.	Sedra, Cap. 5 p. 239-243.	Teste 11 9h20-9h35
20 ^a 16/06	Análise cc de circuitos com transistores, exercícios selecionados: 5.1, 5.4, 5.10.	Sedra, Cap. 5 p. 246 + 264-269	
21 ^a 20/06	O TBJ como amplificador para pequenos sinais (as condições c.c., a corrente de coletor e a transcondutância) modelos equivalentes (modelos π -híbrido e T)	Sedra, Cap. 5, p. 263-264; p. 275-279.	Teste 12 9h20-9h35
22 ^a 23/06	Aplicação dos modelos equivalentes para pequenos sinais, Efeito Early. O amplificador emissor comum (EC). O amplificador emissor comum com resistência de emissor	Sedra, Cap. 5, p. 290-302	Teste 13 7h30-7h45
23 ^a	Aula de Exercícios a ser agendada fora dos dias de aula Será realizada enquete no Moodle para marcar data e horário		
2ª. Semana de Provas (26/06 a 30/06/2023)			
Data: xx/xx/2023 (xxxx-feira) – Horário: xx:xxh			

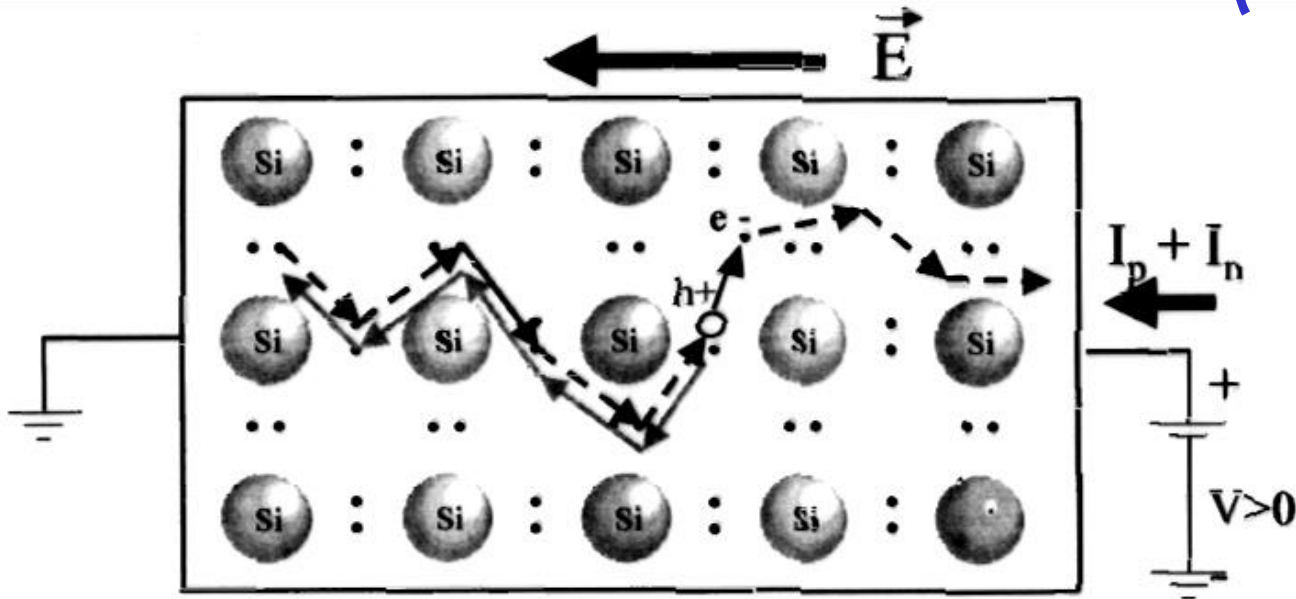
14ª Aula:

Silício dopado, mecanismos de condução (difusão e deriva)

Ao final desta aula você deverá estar apto a:

- Descrever os principais mecanismos de geração de corrente elétrica em um material semiconductor, a corrente de deriva (vista na aula passada) e a corrente de difusão
- Apresentar a expressão da corrente de difusão, tanto para elétrons como para lacunas
- Determinar a corrente total em uma barra semicondutora dopada considerando as correntes de deriva e de difusão para elétrons e lacunas.

Mecanismos de Condução de Corrente em Semicondutores: Deriva (Drift)



Resistividade:

$$\rho = 1/[q(p\mu_p + n\mu_n)]$$

μ_p e μ_n = mobilidade das lacunas e elétrons respectivamente.

$$(\mu_p = 480 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}, \mu_n = 1350 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s})$$

Relação de Einstein:

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = V_T$$

$$v_{p\text{-der}} = \mu_p E$$

$$v_{n\text{-der}} = \mu_n E$$

$$J_{p\text{-der}} = qp\mu_p E$$

$$J_{n\text{-der}} = qn\mu_n E$$

$$I_{p\text{-der}} = q \cdot A \cdot p \cdot \mu_p \cdot E$$

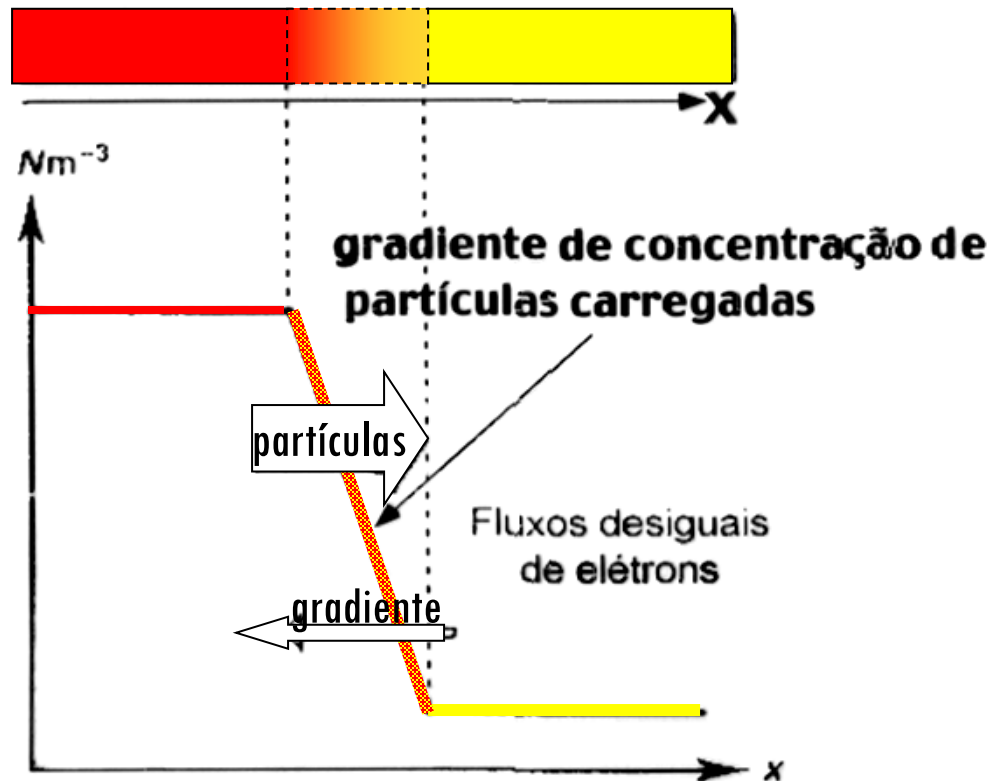
$$I_{n\text{-der}} = q \cdot A \cdot n \cdot \mu_n \cdot E$$

$$I_{T\text{-der}} = I_{p\text{-der}} + I_{n\text{-der}} = q \cdot A \cdot E \cdot (p \cdot \mu_p + n \cdot \mu_n)$$

A Corrente de Difusão

Devido a agitação térmica, as partículas carregadas movem-se aleatoriamente, mesmo na ausência de campo elétrico.

Considere a situação a seguir:



Note:

- a) Há movimento aleatório**
- b) Há um gradiente de concentração**

A Corrente de Difusão

$$\text{Fluxo}_{\text{dif}} = -D \frac{dN}{dx} \quad [1/(m^2.s)]$$

onde D é o coeficiente de difusão das partículas

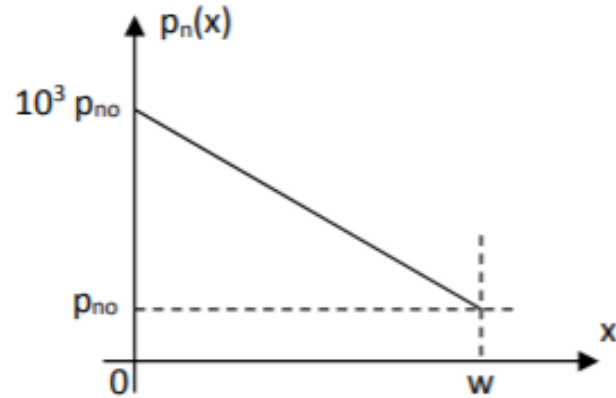
Logo:

$$J_{\text{dif}} = -qD \frac{dN}{dx} \quad [A/m^2]$$

Atividade

A Corrente de Difusão

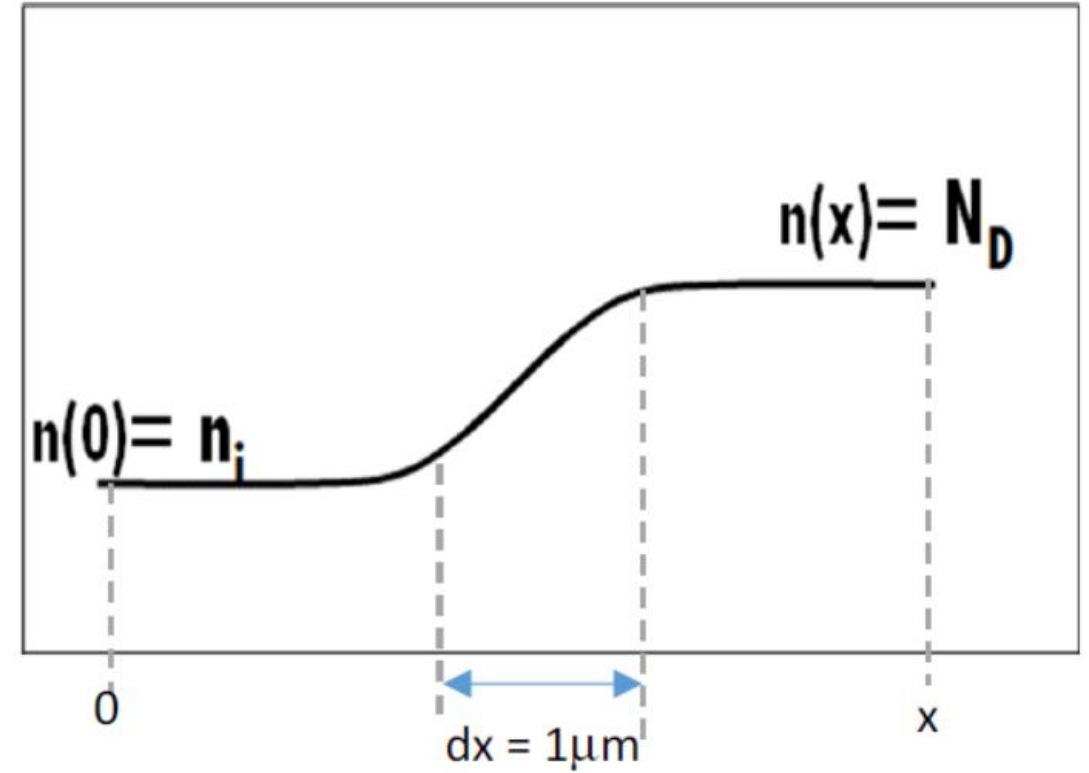
Exercício 1 – Lacunas são injetadas de forma continuada dentro da região tipo n de um cristal de silício. O perfil da concentração do excesso de lacunas, no estado estacionário, na região tipo n é mostrada na figura abaixo. Se $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $n_i = 1,5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, $W = 5 \mu\text{m}$ e $D_p = 12 \text{ cm}^2/\text{s}$, determine a densidade de corrente que fluirá na direção x.



- a) $8,64 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$
- b) $8,64 \times 10^{-9} \text{ A/cm}^2$
- c) $4,32 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$
- d) Não tenho certeza

Exemplos de Resistores em Semicondutores

2) Em materiais semicondutores existe uma outra fonte de corrente elétrica, mesmo quando não temos uma tensão aplicada. Ela surge quando há variações (gradientes) na concentração de portadores ao longo do material. Essa corrente é conhecida como corrente de difusão. Para a barra ao lado, indique o sentido da corrente de difusão de elétrons livres e seu valor. O que podemos dizer da relação das concentrações de elétrons livres e de lacunas em cada ponto do eixo x ? Desenhe em proporção no eixo y o perfil de distribuição de lacunas. Indique o sentido da corrente de difusão de lacunas e seu valor. $N_D = 1 \cdot 10^{16}$ cargas/cm³ e $n_i = 10^{10}$ /cm³



As Correntes Elétricas em Materiais Semicondutores

Quantos tipos de correntes (para elétrons e lacunas) vimos na aula passada?

A Corrente de Deriva

$$v_{p\text{-der}} = \mu_p E$$

$$J_{p\text{-der}} = qp\mu_p E$$

$$I_{p\text{-der}} = q \cdot A \cdot p \cdot \mu_p \cdot E$$

$$I_{T\text{-der}} = I_{p\text{-der}} + I_{n\text{-der}} = q \cdot A \cdot E \cdot (p \cdot \mu_p + n \cdot \mu_n)$$

$$v_{n\text{-der}} = \mu_n E$$

$$J_{n\text{-der}} = qn\mu_n E$$

$$I_{n\text{-der}} = q \cdot A \cdot n \cdot \mu_n \cdot E$$

A Corrente de Difusão

$$J_{\text{dif}} = -qD \frac{dN}{dx} \quad [\text{A/m}^2]$$

As Correntes de Deriva e de Difusão

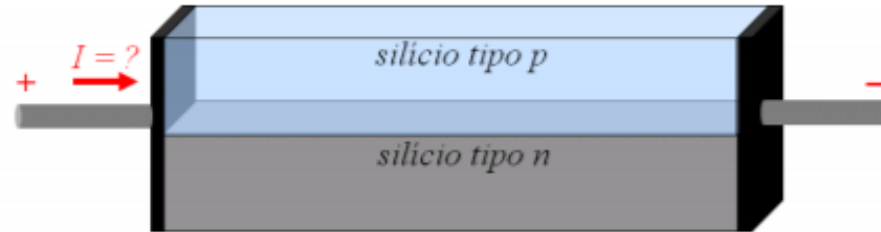
Em semicondutores observamos que em condições normais as correntes de deriva e de difusão constituem praticamente toda a corrente que flui no material. Logo:

$$\mathbf{J_{TOTAL} = J_{der} + J_{dif} \quad (\text{vale a lei da superposição!})}$$

$$\mathbf{J_{TOTAL} = Q \cdot N \cdot \mu \cdot E - QD \frac{dN}{dx} \quad [A/m^2]}$$

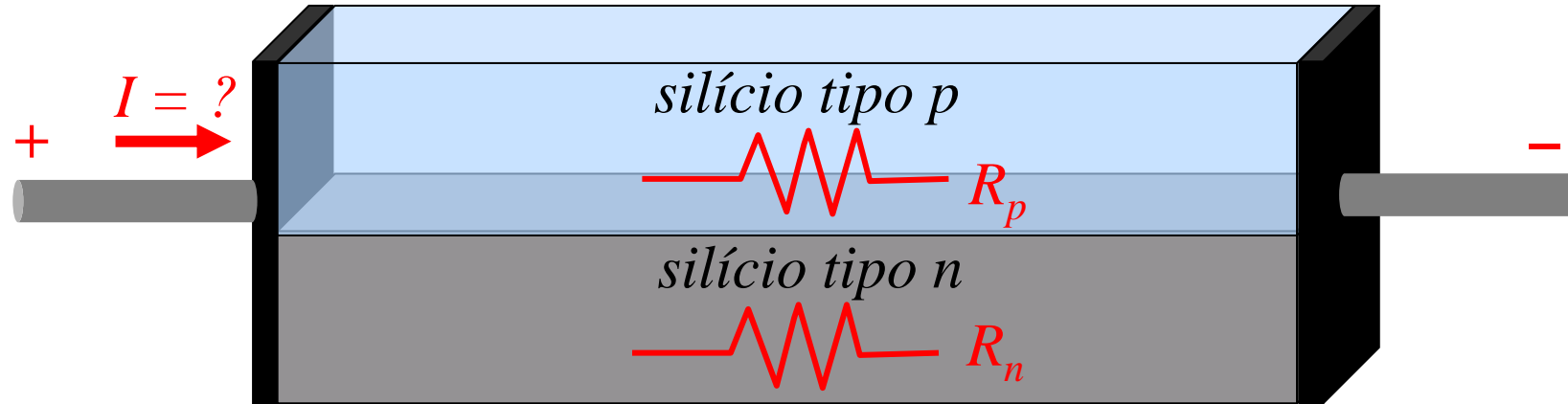
Exemplos de Resistores em Semicondutores

4) A figura ao lado é uma barra de silício. Indique os passos (resolva literalmente) para se determinar o valor da corrente I na figura ao lado. Faça as considerações que achar necessárias



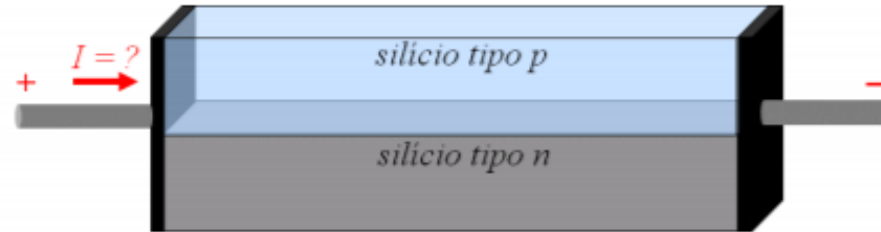
Juntando silícios p e n

$$\rho = 1/[q(p\mu_p + n\mu_n)]$$



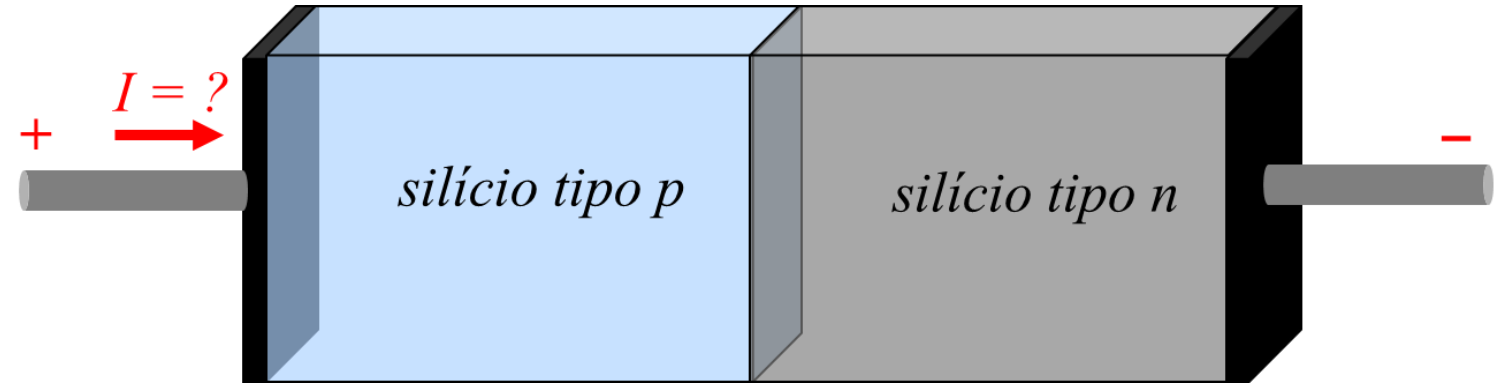
Exemplos de Resistores em Semicondutores

4) A figura ao lado é uma barra de silício. Indique os passos (resolva literalmente) para se determinar o valor da corrente I na figura ao lado. Faça as considerações que achar necessárias



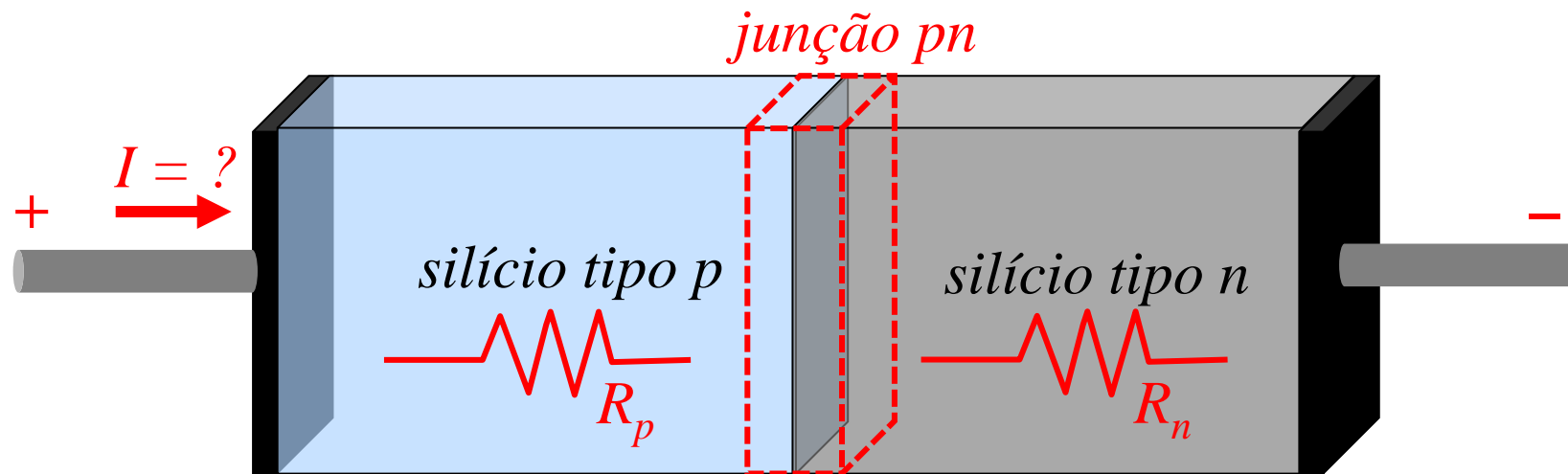
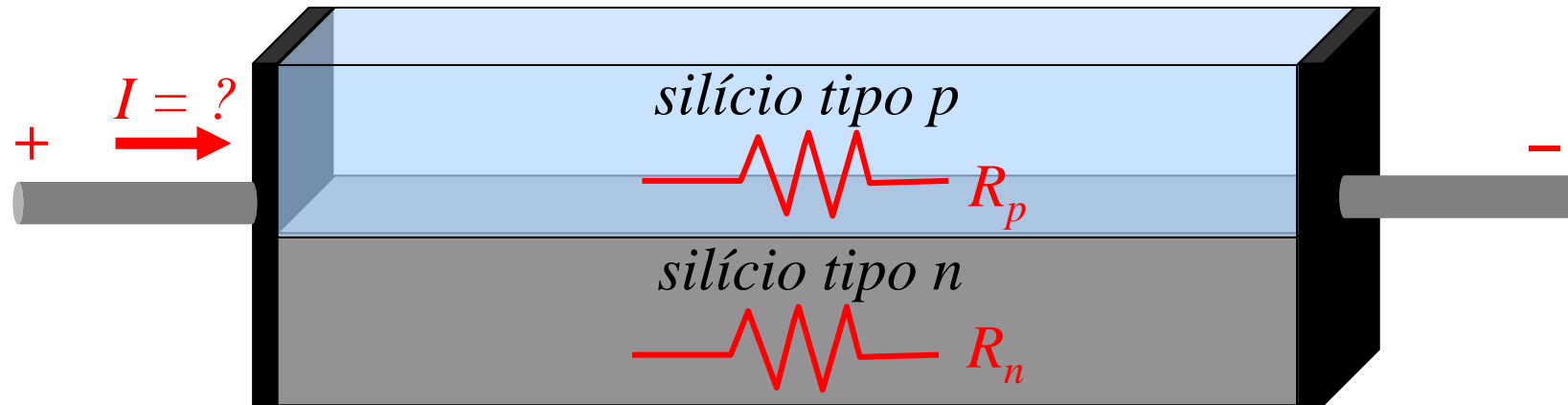
Exemplos de Resistores em Semicondutores

4) A figura ao lado é uma barra de silício. Indique os passos (resolva literalmente) para se determinar o valor da corrente I na figura ao lado. Faça as considerações que achar necessárias



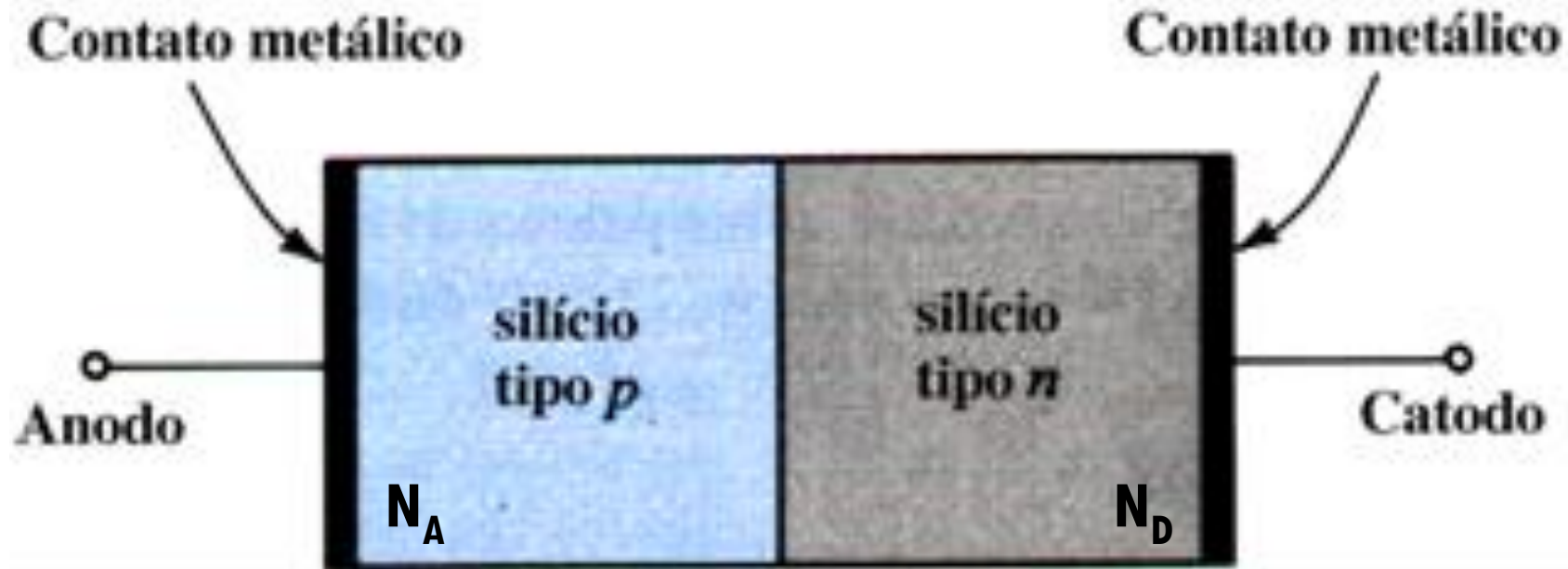
Juntando silícios p e n

$$\rho = 1/[q(p\mu_p + n\mu_n)]$$

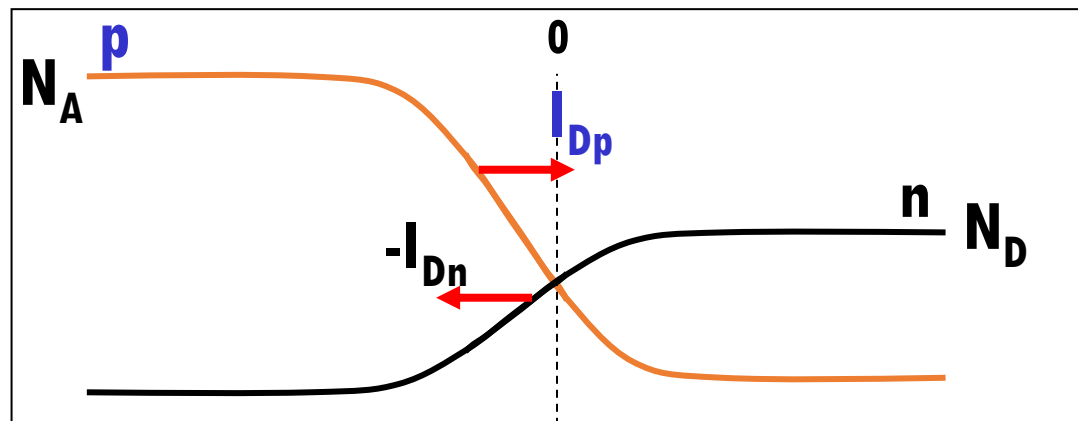
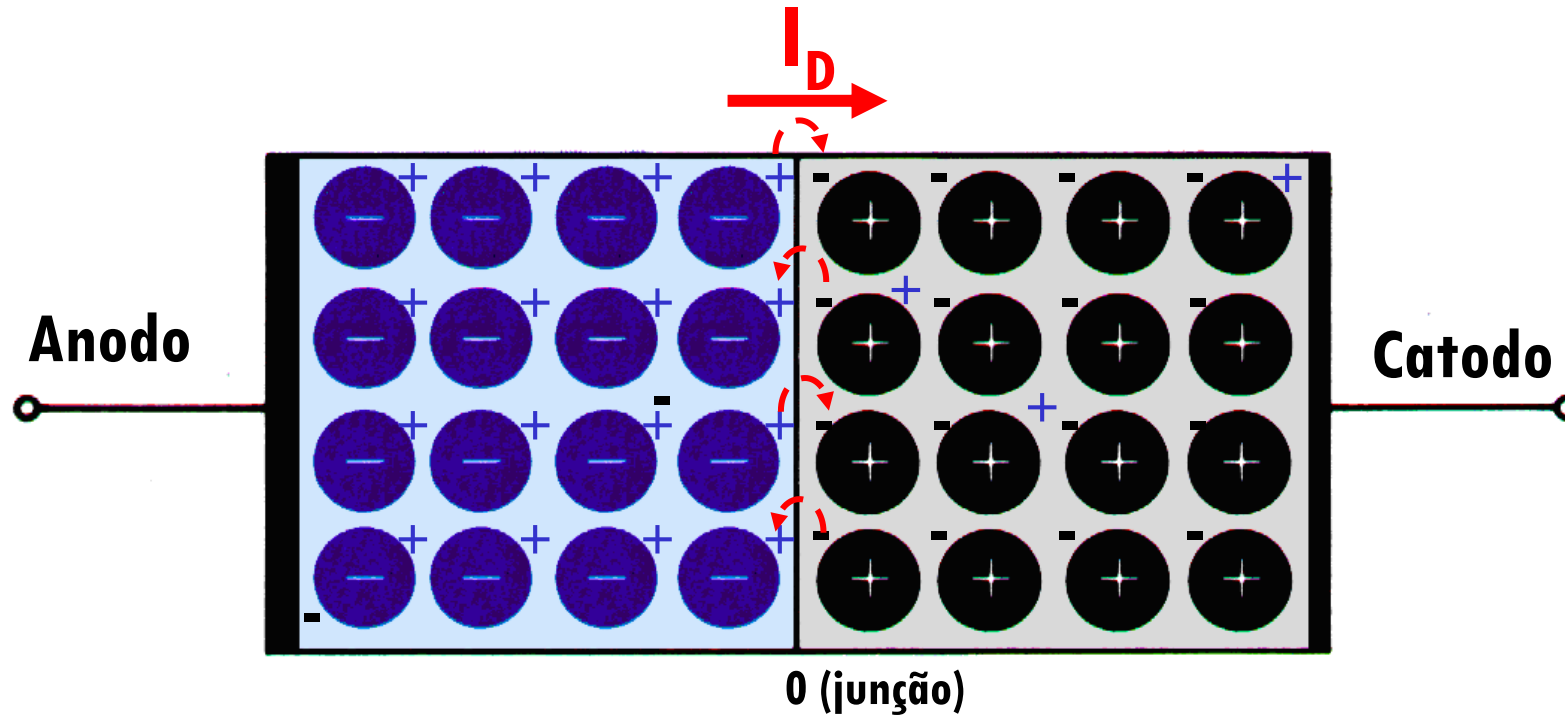


O Diodo

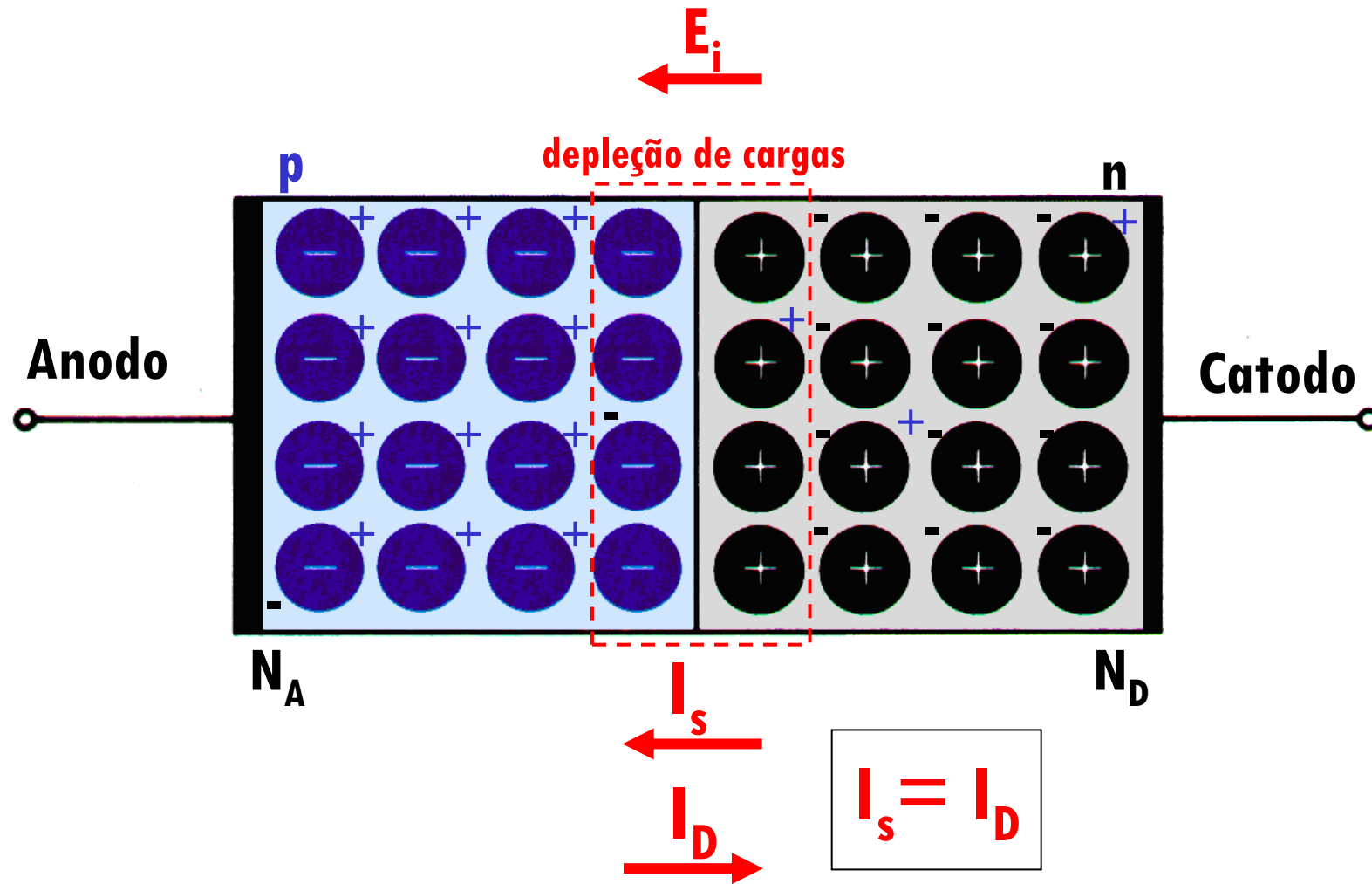
(a junção pn)



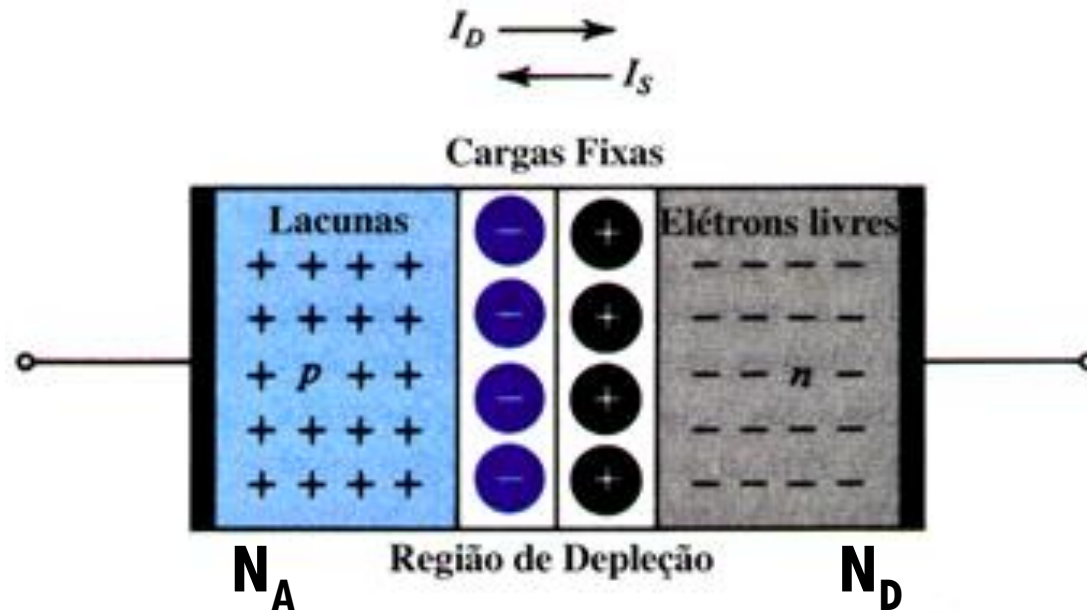
O Diodo



A dinâmica da junção pn em Aberto



O Diodo em Aberto



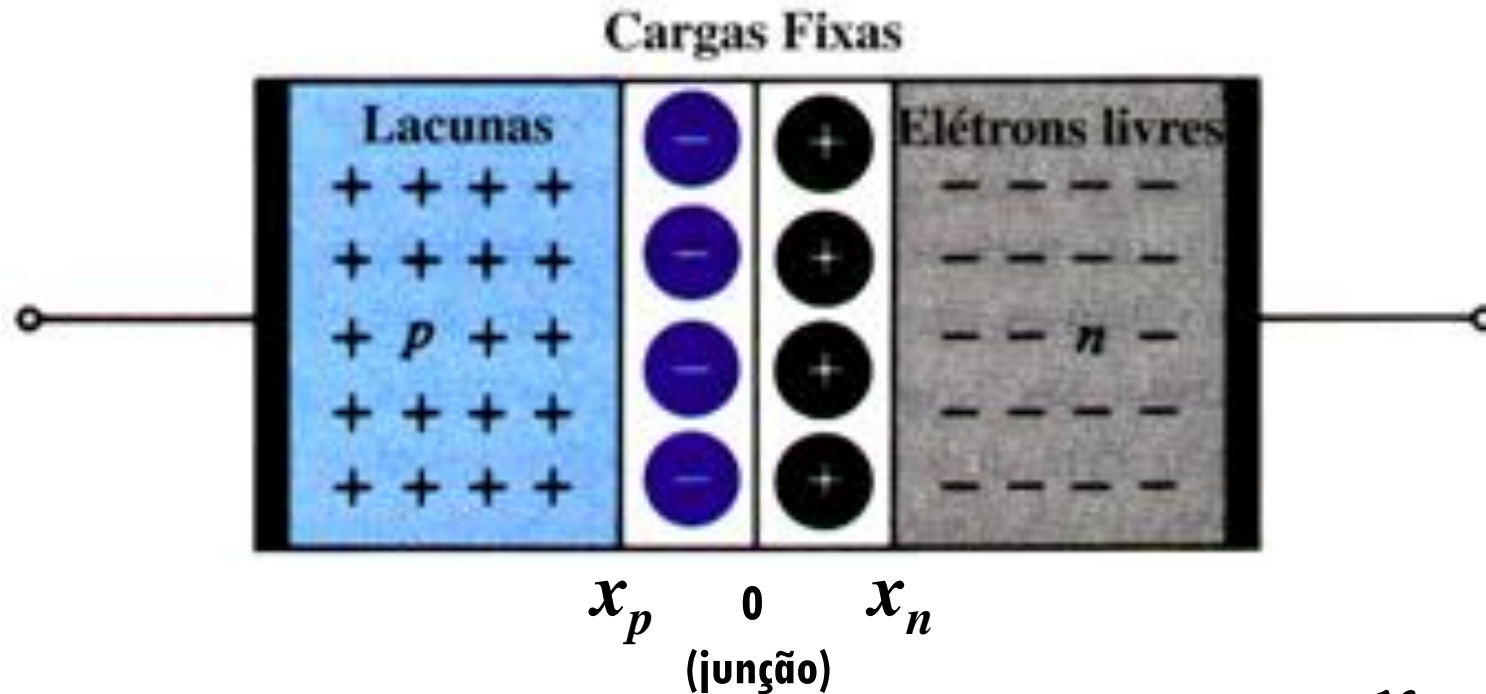
(a)



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

(b)

O Diodo em Aberto



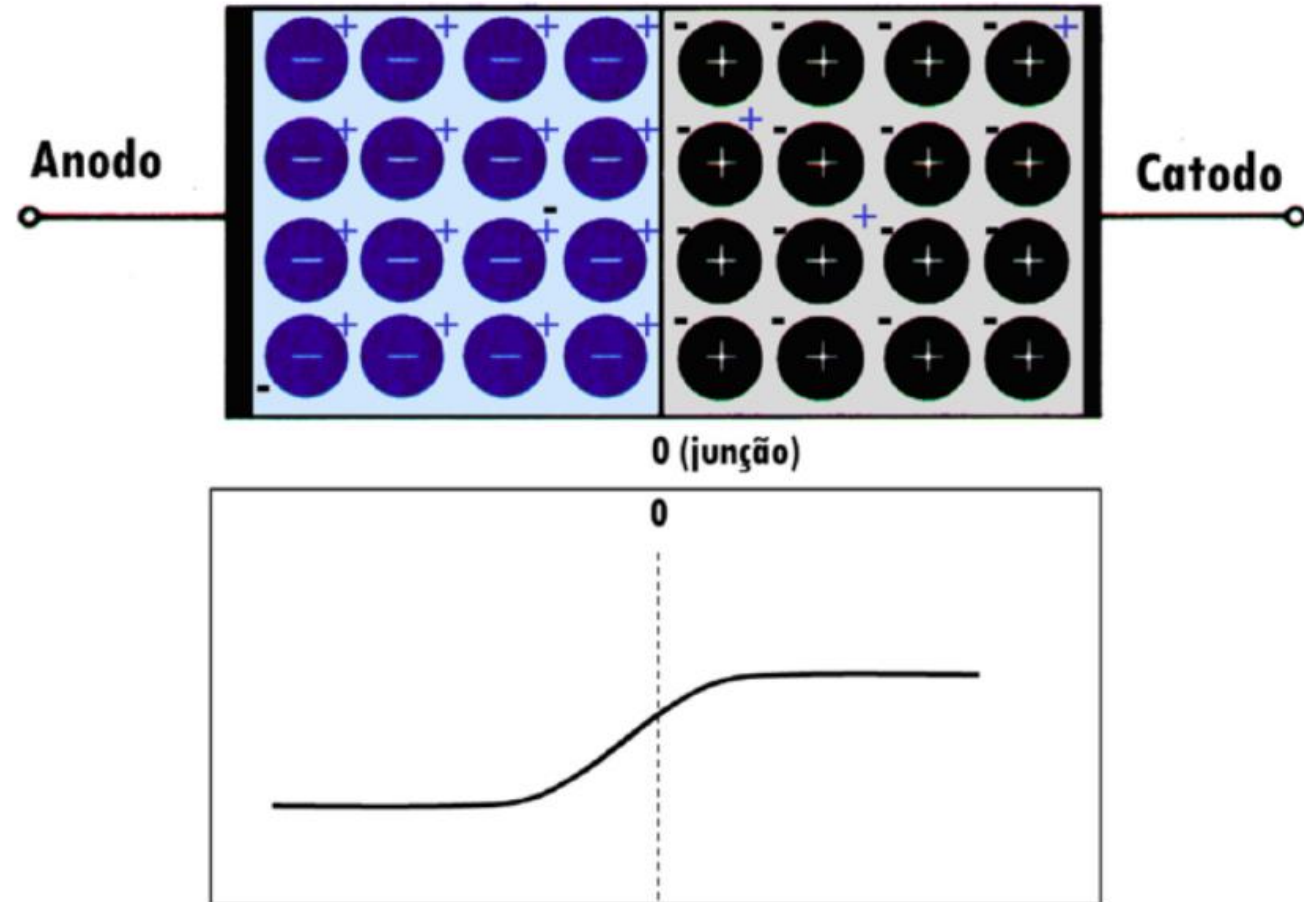
$$qx_p N_A A = qx_n N_D A \quad \text{ou} \quad \frac{x_n}{x_p} = \frac{N_A}{N_D}$$

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

Exemplos de Resistores em Semicondutores

6) Para a barra de s lcio ao lado, que não tem tensão aplicada sobre ela, pede-se:

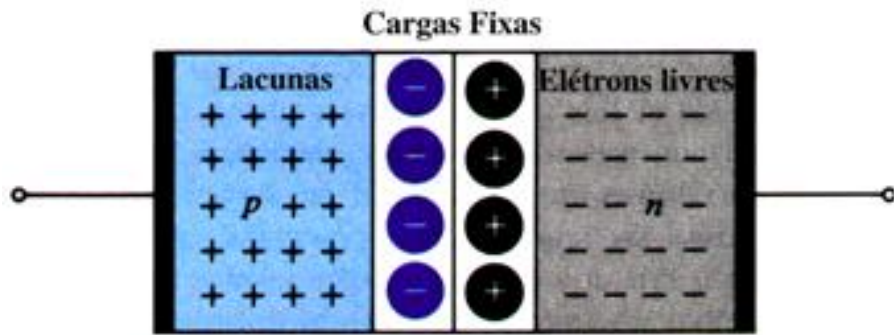
- Indique o lado p e o lado n, colocando se tem N_A ou N_D .
- Indique o valor final (mais   esquerda) da concentra o de elétrons no gráfico apresentado considerando $N_D < N_A$
- Esboce o gráfico de N_A ao longo do eixo x indicando os valores dos extremos.
- Há correntes de deriva (I_{Dn} , I_{Dp}) e de difusão (I_{dn} , I_{dp}) nessa estrutura?
- Indique o sentido das correntes de elétrons livres e de lacunas.



Exercício

Atividade

3.32 Para uma junção pn com $N_A = 10^{17}/\text{cm}^3$ e $N_D = 10^{16}/\text{cm}^3$ a $T = 300\text{ K}$, determine a tensão interna, a largura da região de depleção e as distâncias que ela se estende no lado p e no lado n . Utilize $n_i = 1,5 \times 10^{10}/\text{cm}^3$.



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

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

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

Qual o valor de V_0 ?

- a) 0,7V
- b) 800mV
- c) 728mV
- d) Não sei fazer

Qual o valor da largura em p ?

- a) 0,61 μm
- b) 0,32 μm
- c) 0,29 μm
- d) Não sei fazer

Qual o valor da largura em n ?

- a) 0,29mm
- b) 0,32 μm
- c) 0,29 μm
- d) Não sei fazer