

EN2719

Dispositivos Eletrônicos

Barreira de potencial

Capacitâncias de uma junção PN

Parâmetros incrementais

Aplicações do diodo

Prof. Carlos Reis
Sala:705-1-A

A Função de distribuição de energia de Fermi-Dirac.

A banda de condução em um semicondutor é formada por um grande número de estados “disponíveis” de energia. Se desejarmos calcular quantos elétrons ocuparão estes estados de energia para contribuir na condução elétrica, temos que considerar dois fatores:

- Quantos níveis de energia existem em um certo intervalo de energia – neste caso, a banda de condução.
- Qual é a probabilidade de cada nível de ser ocupado por um elétron.

A resposta para a segunda questão é a função de distribuição de probabilidade chamada de Fermi-Dirac, $f(E)$.

$f(E)$ é a probabilidade que um nível de energia E tem de ser ocupado por um elétron e sua expressão é:

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_F}{k_B T}}}$$

k_B é a constante de Boltzmann: 8.62×10^{-5} [eV/K]

T é a temperatura absoluta (Kelvin)

E_F é o chamado nível de energia de Fermi, que é definido como sendo **o nível de energia para o qual a probabilidade de ocupação por um elétron é 50%.**


A probabilidade de ocupação de um nível de energia localizado em 0,259eV **acima** do nível de Fermi (E_F), quando a temperatura é $T=300K$, é:

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{0,259eV}{k_B T}}} = \frac{1}{1 + e^{\frac{0,259eV}{0,0259}}} = 4,54 \times 10^{-5}$$

Aumentando a temperatura para $T=600K$, a probabilidade de ocupação passa a ser:

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{0,259eV}{0,0518}}} = 6,69 \times 10^{-3}$$

A probabilidade do nível de energia que está localizado em 0,4eV **abaixo** do nível de Fermi (E_F), não estar ocupado, quando a temperatura é $T=300K$, é:


$$1 - f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{-0,4eV}{0,0259}}} \cong 0$$

A probabilidade do nível de energia que está localizado em 0,01eV **acima** do nível de Fermi (E_F), não estar ocupado, quando a temperatura é $T=300K$, é:

$$1 - f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{0,01eV}{0,0259}}} = 0,595$$

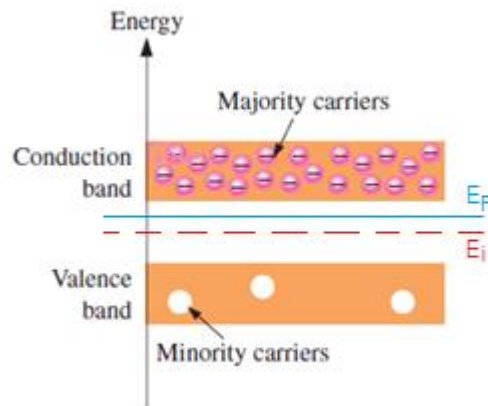
A barreira de potencial na junção PN

Em um material extrínseco do tipo-N , que tenha uma densidade de dopantes $n=n_0 \approx N_d$, o nível de Fermi é determinado pela seguinte expressão:

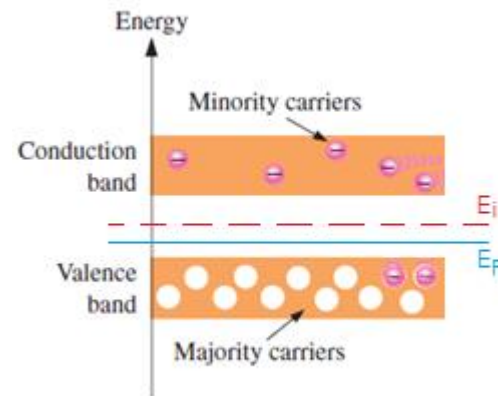
$$E_F - E_i = kT \cdot \ln \frac{n_0}{n_i} \cong kT \cdot \ln \frac{N_d}{n_i}$$

Para o material do tipo-P, que tenha uma densidade de dopantes $p=p_0 \approx N_a$:

$$E_i - E_F = kT \cdot \ln \frac{p_0}{p_i} \cong kT \cdot \ln \frac{N_a}{n_i}$$



tipo-N



tipo-P

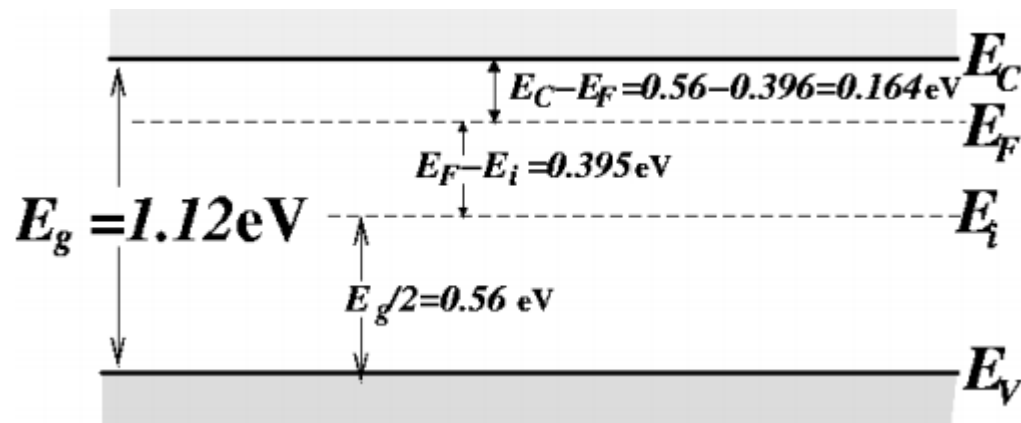
Exemplos

Determinar o nível de Fermi com relação a E_C e E_V em Silício dopado, na temperatura de 300K, com $4 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ de Fósforo:

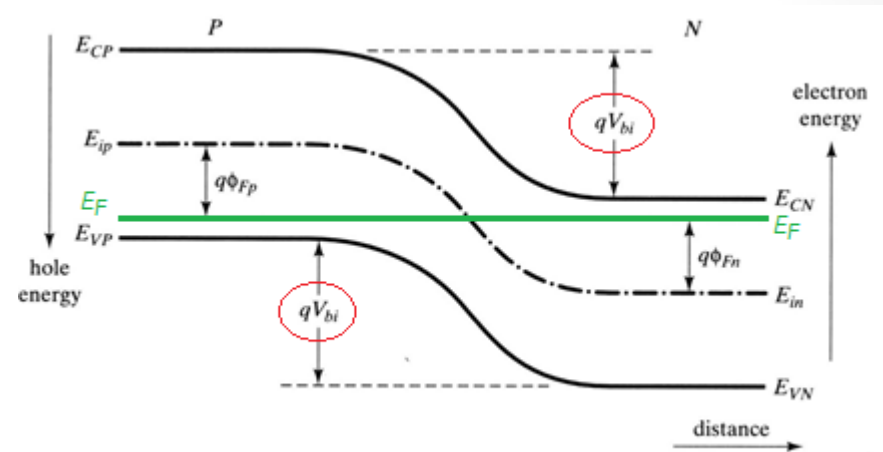
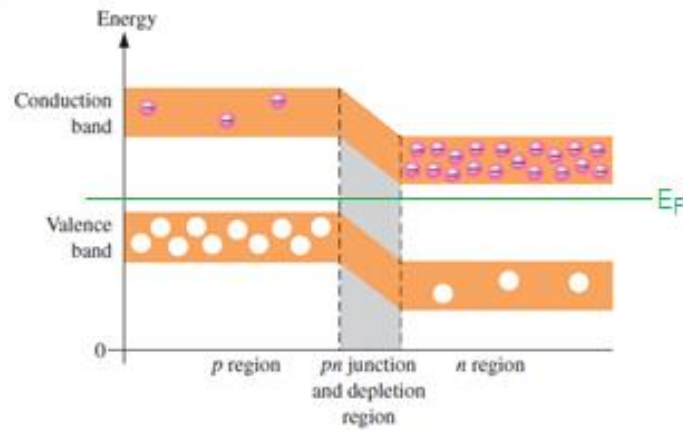
Para o Silício, na temperatura $T=300\text{K}$, a concentração intrínseca $n_i=1,0 \times 10^{10}/\text{cm}^3$. A constante de Boltzmann, $k=8,61 \times 10^{-5}\text{eV/K}$ e a energia da banda proibida do Silício $E_g=1.12\text{eV}$.

O material considerado é do tipo-N, tendo uma concentração de dopantes de $n_o \approx N_d = 4 \times 10^{16}/\text{cm}^3$.

Nestas condições, temos que:

$$E_F - E_i = kT \cdot \ln \frac{N_d}{n_i} = 0,026 \cdot \ln \frac{4 \times 10^{16}}{1,0 \times 10^{10}} = 0,395\text{eV}$$


Quando a junção é formada, as bandas de energia se dobras, enquanto o nível de Fermi é constante na nova estrutura, conforme mostram as figuras abaixo – a da direita com mais detalhes dos níveis de energia.



Considerando que a corrente de elétrons e de lacunas através da região de depleção é nula, ou seja, a componente de difusão igual à de deriva :

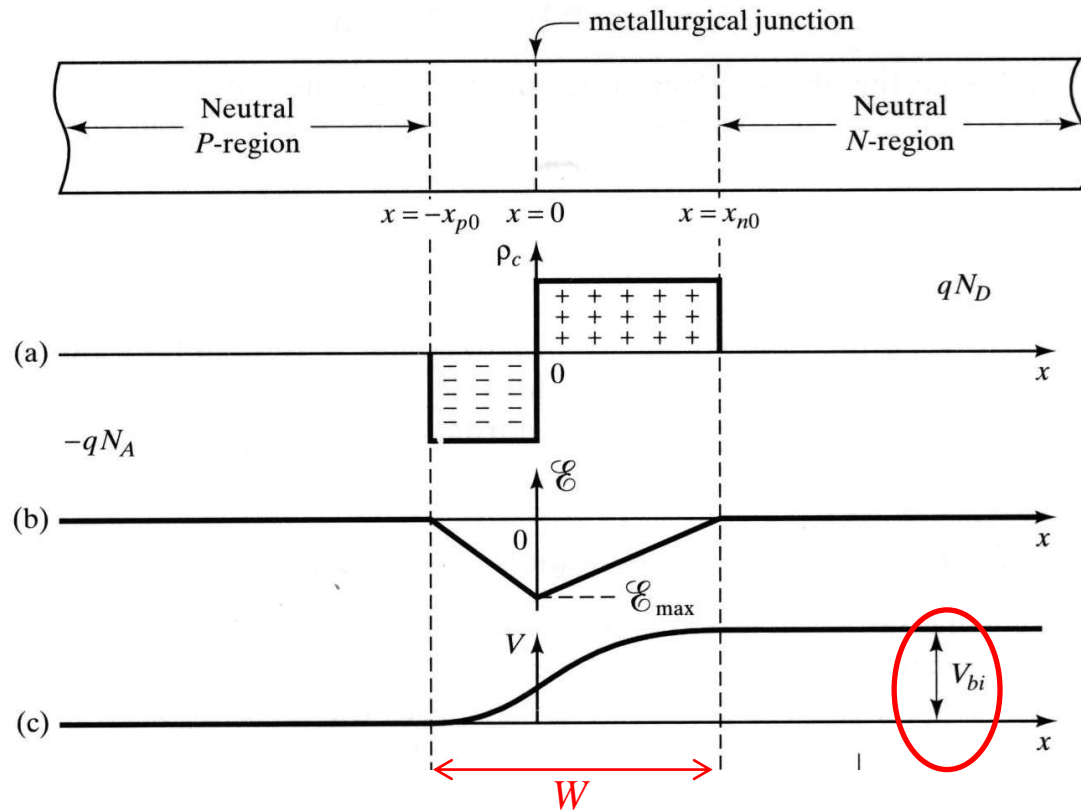
$$J_p = 0 \Rightarrow -qD_p \frac{dp}{dx} = qp\mu_p \frac{dV}{dx}$$

Utilizando a relação de Einstein, na qual $\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q}$ temos que:

$$\frac{kT}{q} = -\frac{p \cdot dV/dx}{dp/dx} \rightarrow \frac{kT}{q} \int_{p_{0p}}^{p_{0n}} \frac{1}{p} dp = \int_{-x_{p0}}^{x_{n0}} dV(x) \rightarrow V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2}$$

Lembrando que p_{0p} e p_{0n} são as concentrações de lacuna em equilíbrio nas regiões p e n, respectivamente. As variáveis $-x_{p0}$ e x_{n0} são as fronteiras da região de depleção.

Na figura abaixo são mostrados detalhes de uma junção PN abrupta.



A largura da região de depleção, dada pelo comprimento $(x_{n0} + x_{p0})$, pode ser deduzida para chegar na expressão:

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \frac{(N_a + N_d)}{N_a \cdot N_d} V_{bi}}$$

ϵ – é a permissividade do Silício ($1,04 \times 10^{-12} \text{ F / cm}$)

Exemplos

Determinar a amplitude da barreira de potencial em um diodo de Silício, cujas concentrações de dopantes são: $N_a=10^{17}/\text{cm}^3$ e $N_d=10^{15}/\text{cm}^3$. O diodo está na temperatura $T=300\text{K}$ e a área da junção é de 10^{-5} cm^2 . A permitividade relativa do Silício é 11.8

Para o Silício, na temperatura $T=300\text{K}$, a concentração intrínseca é $n_i=1,0 \times 10^{10}/\text{cm}^3$. O termo kT/q , conhecido como Tensão Termodinâmica, vale $0,026\text{V}$ quando $T=300\text{K}$. Assim:

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} \quad V_{bi} = 0,026 \cdot \ln \frac{10^{17} \times 10^{15}}{(1,0 \times 10^{10})^2} = 0,715 \text{ Volts}$$

Para este mesmo dispositivo, determinar a largura da região de depleção e as cargas armazenadas em cada um dos lados (P e N) da região de depleção:

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \frac{(N_a + N_d)}{N_a \cdot N_d} V_{bi}} \quad W = \left(\frac{2 \times 11,8 \times 8,854 \times 10^{-14}}{1,6 \times 10^{-19}} \frac{(10^{17} + 10^{15})}{(10^{17} \cdot 10^{15})} 0,715 \right)^{1/2}$$
$$\therefore W = 97,1 \times 10^{-6} \text{ cm} = 0,971 \mu\text{m}$$

Para determinar a carga em cada lado, lembrar que as cargas nos dois lados têm sinais contrários, porém o mesmo valor. Assim:

$$\frac{x_{p0}}{x_{n0}} = \frac{N_d}{N_a} \quad \text{e como} \quad x_{p0} + x_{n0} = W$$

$$Q(\text{lado} - P) = q \cdot N_a \cdot A \cdot x_{p0}$$

Capacitâncias de um diodo: Capacitância de junção

Um diodo de junção PN possui duas capacitâncias intrínsecas. Uma delas, a **capacitância de junção** (ou de transição) tem características físicas similares às de um capacitor de placas paralelas. A expressão que define a capacitância de junção em termos dos parâmetros físicos é idêntica à que define a capacitância de um capacitor de placas paralelas.

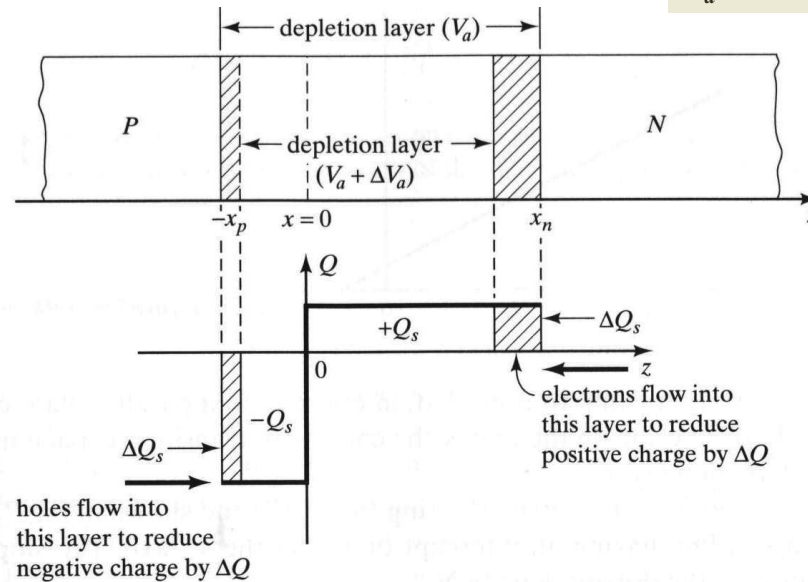
A outra capacitância, conhecida como **capacitância de difusão**, (ou de armazenamento) também tem a propriedade de acumulação de cargas, como tem um capacitor de placas paralelas, mas não tem nenhuma semelhança física com ele.

A capacitância de um capacitor de placas paralelas depende somente das suas dimensões e das características dielétricas do material entre as placas. Esta capacitância é tida como sendo linear, porque o gráfico que relaciona a carga Q em cada placa com a tensão aplicada entre as placas é uma reta que passa pelo zero. As capacitâncias de um diodo, por outro lado, são não lineares, porque o gráfico da relação entre Q e V não é uma reta.

A capacitância de junção existe tanto quando o diodo está diretamente polarizado como quando está reversamente polarizado. **A capacitância de difusão, no entanto, ocorre somente quando o diodo está diretamente polarizado.**

Capacitância de junção

A região de depleção de um diodo consiste em átomos doadores ionizados positivamente e de átomos aceitadores ionizados negativamente, tal como ilustra a figura abaixo.



V_a é a tensão aplicada externamente.

A região de depleção se estende mais profundamente na região menos dopada. Assim, se $N_a > N_d$, então $x_p < x_n$. No entanto, as cargas contidas em cada uma das regiões (P e N) são iguais. Ou seja:

$$Ax_n q N_d = Ax_p q N_a$$

Considerando as três relações abaixo, vistas anteriormente.

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \frac{(N_a + N_d)}{N_a \cdot N_d} V_{bi}}$$

$$\frac{x_{p0}}{x_{n0}} = \frac{N_d}{N_a}$$

$$x_{p0} + x_{n0} = W$$

Substituindo na equação anterior, que define a quantidade de carga Q_s em cada lado da região de depleção, temos.

$$Q_s = AqN_dx_n = AqN_ax_p = A\sqrt{\frac{2q\varepsilon V_j N_a N_d}{N_a + N_d}}$$

A tensão V_j , no caso, correspondente à diferença de potencial resultante na junção, ou seja, é a diferença entre a tensão da barreira de potencial V_{bi} e a tensão aplicada externamente, V_a .

$$V_j = V_{bi} - V_a$$

Como a capacitância de junção é definida pela variação da carga em consequência da variação do potencial da junção:

$$C_j = \frac{dQ_s}{dV_j} \longrightarrow C_j = A\sqrt{\frac{q\varepsilon N_a N_d}{2(N_a + N_d)}} \frac{1}{\sqrt{V_j}}$$

Quando temos $N_a \gg N_d$, a expressão da capacitância de junção pode ser simplificada:

$$C_j = A \sqrt{\frac{q\epsilon N_d}{2V_j}} = A \sqrt{\frac{q\epsilon N_d}{2(V_{bi} - V_a)}}$$

A equação acima mostra que com o aumento da tensão V_j a capacitância de junção diminui.

Mantendo a condição em que $N_a \gg N_d$, e fazendo com que a barreira de potencial V_{bi} seja substituída por V_j , a largura da região de depleção é dada por:

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \frac{(N_a + N_d)}{N_a \cdot N_d} V_{bi}} \longrightarrow W \approx x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon V_j}{q N_d}}$$

Da expressão acima, resulta que:

$$V_j \approx \frac{x_n^2 q N_d}{2\epsilon}$$

Substituindo V_j na expressão da capacitância de junção, temos:

$$C_j = A \sqrt{\frac{q\epsilon N_d}{2V_j}} = A \sqrt{\frac{q\epsilon N_d}{2 \frac{x_n^2 q N_d}{2\epsilon}}} \Rightarrow C_j = \frac{\epsilon A}{x_n}$$

O resultado anterior evidencia a dependência da capacitância de junção à tensão aplicada, através da dependência de X_n a V_j :

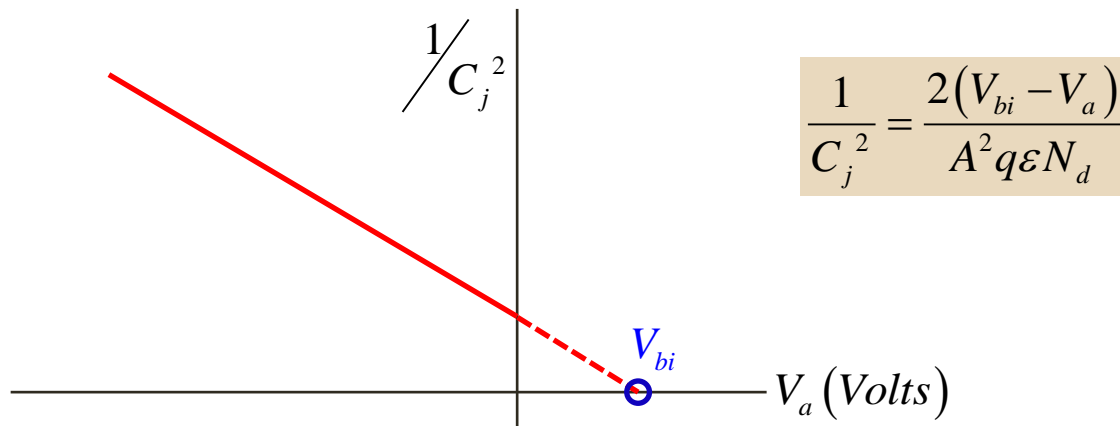
Esta propriedade da capacitância de junção permite sua aplicação em circuitos de sintonia, por exemplo de televisões.

É importante notar que, diferente do que ocorre em um capacitor de placas paralelas, no qual as cargas residem nas placas, as cargas em uma capacitância de junção estão localizadas na região de depleção.

Usando a expressão (já mostrada) que relaciona a capacitância de junção com a tensão externa aplicada, ou seja:

$$C_j = A \sqrt{\frac{q\epsilon N_d}{2(V_{bi} - V_a)}}$$

podemos traçar o seguinte gráfico:



A inclinação da reta anterior pode ser usada para determinar a dopagem N_d .

Exemplos

As densidades de dopagem em um diodo de junção abrupta PN de Silício são $N_a=10^{17}$ átomos/cm³ e $N_d=8 \times 10^{15}$ átomos/cm³. A área da junção é 2×10^{-5} cm².

Calcule as capacitâncias de junção nas seguintes condições:

- a) Sem polarização,
- b) Com polarização reversa de 6V
- c) Com polarização direta de 0,7V.

A expressão para a capacitância de junção de uma junção abrupta é:

$$C_j = A \sqrt{\frac{q \epsilon N_a N_d}{2(N_a + N_d)}} \frac{1}{\sqrt{V_j}} \quad \text{onde:} \quad V_j = V_{bi} - V_a$$

Quando não há polarização, $V_a=0$. Portanto, $C_j=C_{j0}$. Ou seja:

$$C_j = C_{j0} = 2 \times 10^{-5} \sqrt{\frac{1,6 \times 10^{-19} \cdot 1,04 \times 10^{-12} \cdot 10^{17} \cdot 8 \times 10^{15}}{2(1,08 \times 10^{17})}} \frac{1}{\sqrt{V_{bi}}}$$

$$V_{bi} = 0,0259 \cdot \ln \frac{8 \times 10^{32}}{10^{20}} = 0,77 \text{ Volts}$$

$$\therefore C_{j0} = 0,56 \text{ pF}$$

Com polarização reversa de 6V, $V_a = -6V$. Logo, $V_j = 0,77 + 6 = 6,77V$:

$$C_j = C_{j0} \sqrt{\frac{V_{bi}}{V_{bi} - V_a}} \quad \therefore C_j = 0,56 \times \sqrt{\frac{0,77}{6,77}} = 0,188 pF$$

Com polarização direta de 0,7V, $V_a = 0,7V$. Portanto, $V_j = 0,77 - 0,7 = 0,07V$:

$$\therefore C_j = 0,56 \times \sqrt{\frac{0,77}{0,07}} = 1,85 pF$$

Com estes resultados, concluímos que para o mesmo diodo, a capacitância de junção, com o diodo diretamente polarizado, é muito maior do que quando está reversamente polarizado. A razão disto é que a largura da região de depleção é muito menor sob polarização direta.

A aplicação de uma tensão de polarização direta, V_a , tem as seguintes consequências no diodo:

- a) Redução da barreira de potencial
- b) Redução da largura da região de depleção (também chamada de região de carga espacial)
- c) Injeção de portadores majoritários, através da região de depleção, na região oposta onde são armazenados como portadores minoritários excedentes.

Conforme visto anteriormente (slide-31/Aula-3), o número de lacunas minoritárias excedentes na região-N é determinado pela expressão:

$$p' = p - p_{0n} = p_{0n} \left[\exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1 \right] \exp\left(-\frac{x - x_n}{L_p}\right)$$

Com o artifício do deslocamento do zero através da variável $x' = 0 \Rightarrow x = x_n$

O número de lacunas minoritárias excedentes na região-N, quando $W_n \gg L_p$

$$p' = p_{0n} \left[\exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1 \right] \exp\left(-\frac{x'}{L_p}\right)$$

A carga armazenada na região-N devida a estas lacunas excedentes, na condição em que $W_n \gg L_p$, é dada por:

$$Q_B = qA \int_0^\infty p' dx'$$

$$Q_B = qAL_p p_{0n} \left(\exp \frac{qV_a}{kT} - 1 \right)$$

A capacitância de difusão (ou de armazenamento) C_s é determinada por:

$$C_s = \frac{dQ_B}{dV_a} = \frac{Aq^2}{kT} L_p p_{0n} \exp \left(\frac{qV_a}{kT} \right)$$

A equação mostra que a capacitância de difusão cresce exponencialmente com a tensão (de polarização direta) aplicada. Além desta capacitância, já vimos que sob polarização direta o diodo tem uma capacitância de junção que é bem maior do que quando o diodo está reversamente polarizado.

Sob polarização direta, as capacitâncias de difusão e de junção se somam e a capacitância de difusão é muito maior do que a capacitância de junção.

Exemplos

As densidades de dopagem em um diodo de junção abrupta PN de Silício são $N_a=10^{17}$ átomos/cm³ e $N_d=10^{15}$ átomos/cm³. A área da junção é 2×10^{-5} cm² e o tempo de vida da lacunas minoritárias é 0,1 uS. Considerando que a constante de difusão das lacunas na região-N é 16 cm²/s. Calcule as capacitâncias de difusão na temperatura ambiental para $V_a=0,6V$ e $V_a=0,65V$.

Como $N_a \gg N_d$, a capacitância de difusão é dada por:
$$C_s = \frac{Aq^2}{kT} L_p p_{0n} \exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right)$$

A densidade de lacunas na região-N em equilíbrio térmico é:
$$p_{0n} \cong \frac{n_i^2}{N_d} = \frac{10^{20}}{10^{15}} = 10^5 / cm^3$$

O comprimento de difusão das lacunas é:
$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$

Consequentemente, temos: $V_a = 0,6V \Rightarrow C_s = 179 pF$

$$V_a = 0,65V \Rightarrow C_s = 1234,3 pF$$

Parâmetros incrementais e Aplicações do diodo

Modelo equivalente de pequenos sinais:

Define-se a resistência incremental de um diodo como.

$$r_d = \frac{dV_a}{dI}$$

Considerando que a relação entre a tensão e a corrente em um diodo é exponencial e dada por:

$$I = \frac{qAD_p p_{0n}}{L_p} \exp \frac{qV_a}{kT} \quad \text{Na condição em que} \quad N_a \gg N_d \Rightarrow n_{op} \ll p_{on} \text{ e que } V_a \gg \frac{kT}{q}$$

A resistência incremental é dada por:

$$r_d = \left(\frac{dI}{dV_a} \right)^{-1} = \frac{L_p}{\frac{q}{kT} qAD_p p_{0n} \exp \frac{qV_a}{kT}} \Rightarrow r_d = \frac{kT}{qI}$$

Multiplicando as expressões da resistência incremental e da capacitância de difusão, temos:

$$r_d C_s = \frac{L_p^2}{D_p} = \tau_p \quad \tau_p \text{ é o tempo de vida das lacunas na região-N}$$

Exemplos

As densidades de dopagem em um diodo de junção abrupta PN de Silício são $N_a=10^{17}$ átomos/cm³ e $N_d=10^{15}$ átomos/cm³. A área da junção é 2×10^{-5} cm² e o tempo de vida das lacunas minoritárias é 0,1 uS. Considerando que a constante de difusão das lacunas na região-N é 16 cm²/s. Calcule as resistências incrementais, na temperatura ambiental, para $V_a=0,6V$ e $V_a=0,65V$.

Como $N_a \gg N_d$, a simples expressão que determina r_d é:

$$r_d C_s = \tau_p$$

Usando os valores de C_s determinados anteriormente e substituindo o tempo de vida das lacunas pelo valor dado, teremos:

$$\text{Para } V_a = 0,6V, \text{ temos que } C_s = 179 pF \Rightarrow r_d = 558,6 \Omega$$

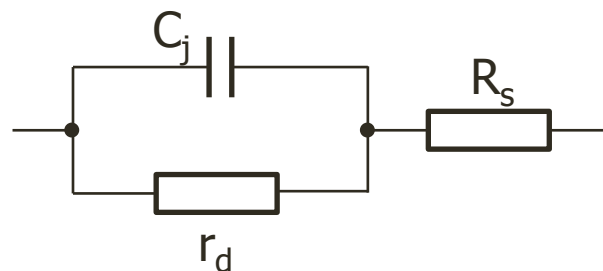
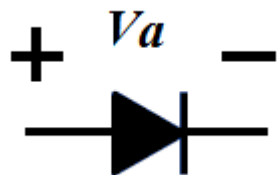
$$\text{Para } V_a = 0,65V, \text{ temos que } C_s = 1234,3 pF \Rightarrow r_d = 81 \Omega$$

Circuito equivalente de um diodo:

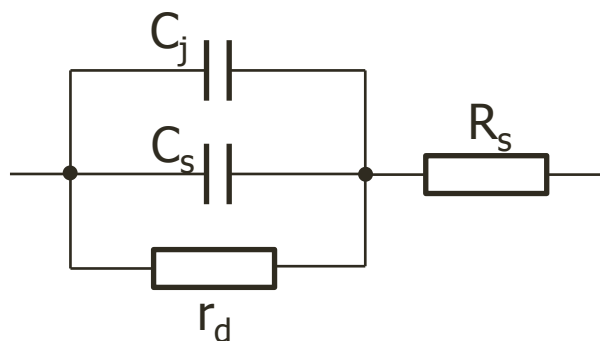
Um circuito contendo as capacitâncias e a resistência incremental pode ser usado para determinar o comportamento de um diodo quando submetido a variações de tensão e corrente incrementais.

Quando ocorre uma variação incremental na tensão aplicada no diodo, a correspondente variação da corrente que conduz pode ser determinada analisando o correspondente circuito equivalente.

Conforme visto, os valores destes elementos dependem da tensão DC que polariza o diodo.

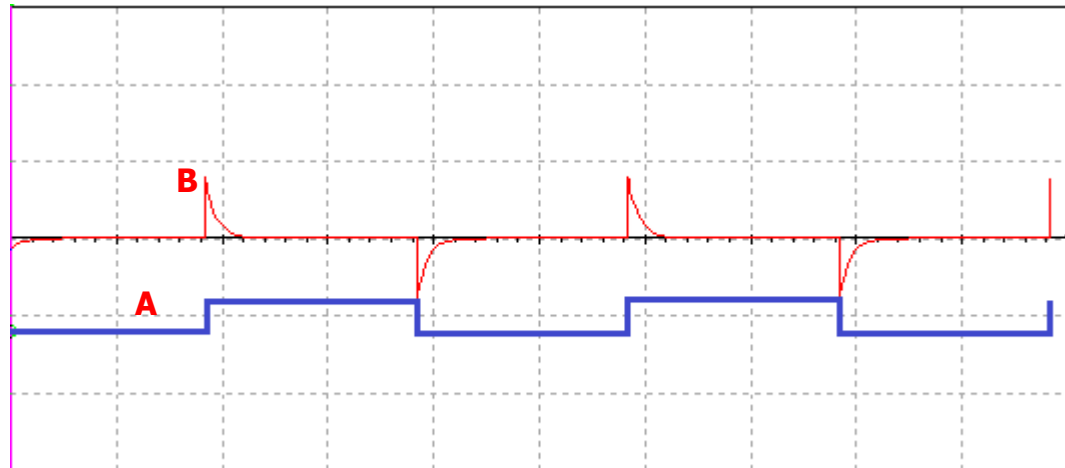
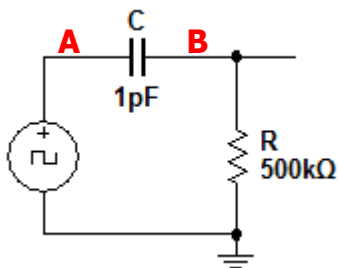
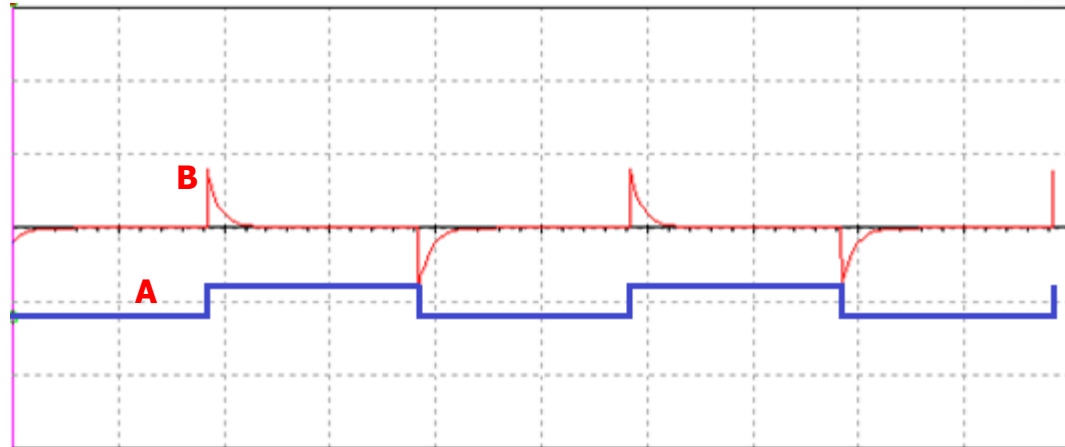
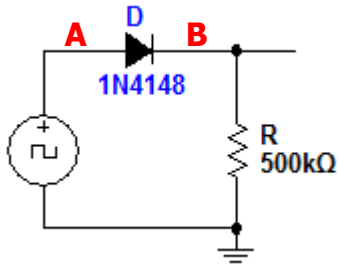


Diodo com polarização
reversa: $V_a < 0$

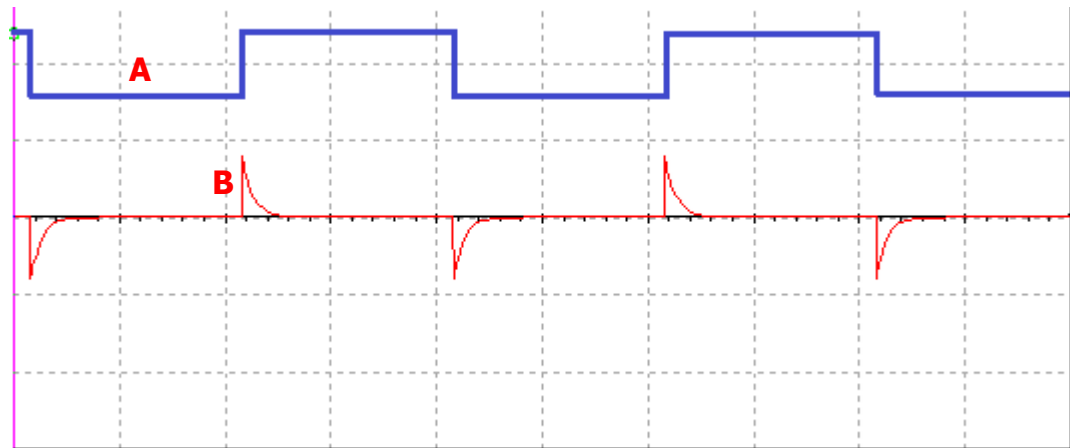
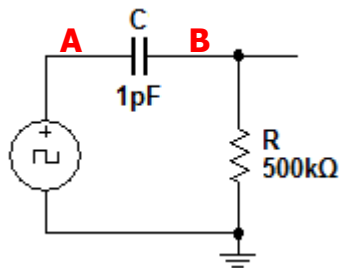
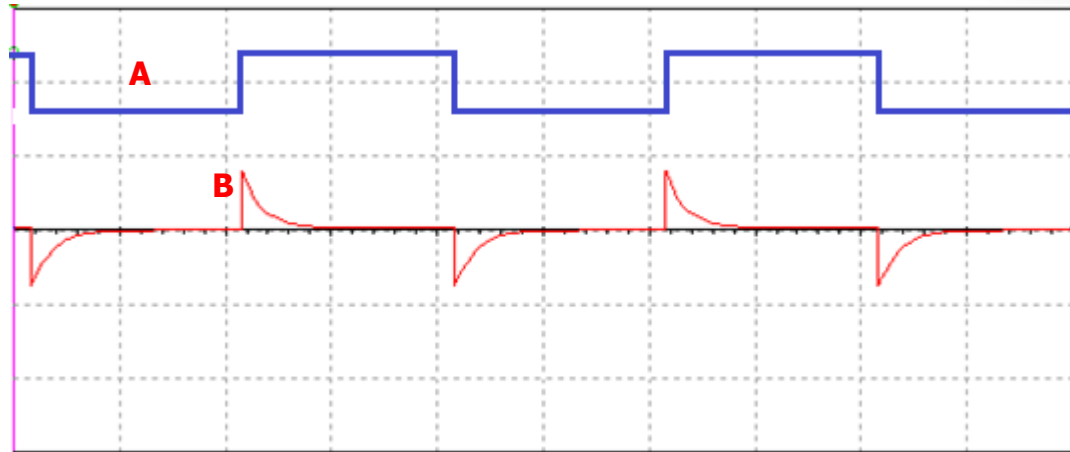
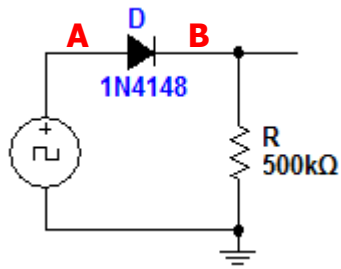


Diodo com polarização
Direta: $V_a > 0$

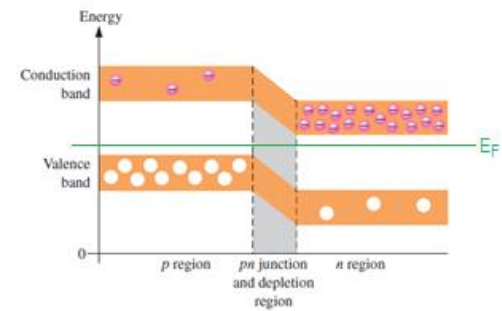
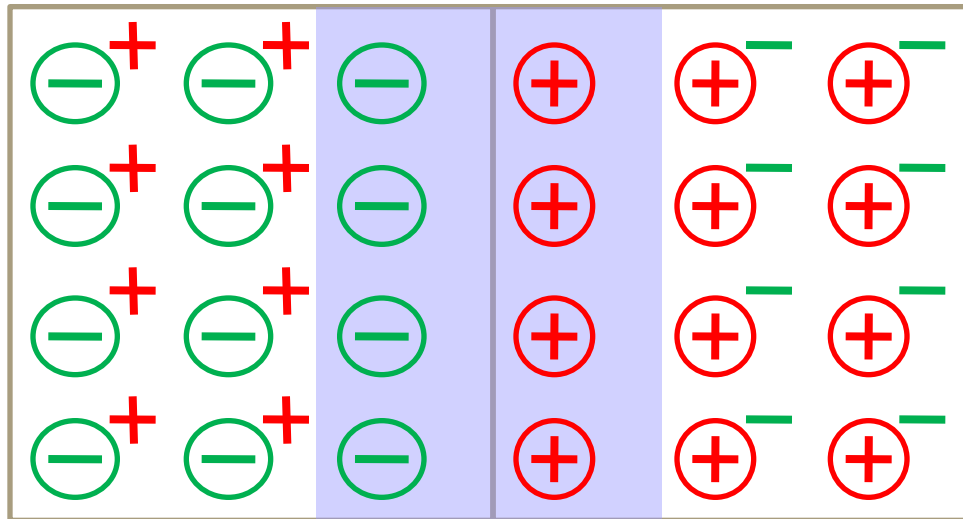
No circuito abaixo, o diodo está sempre reversamente polarizado, pois a tensão aplicada em A varia entre -1V e -0,8V (pulso com amplitude de 200mV e offset de -1V). A forma de onda no ponto B é praticamente a mesma quando o diodo é substituído por um capacitor de 1pF.

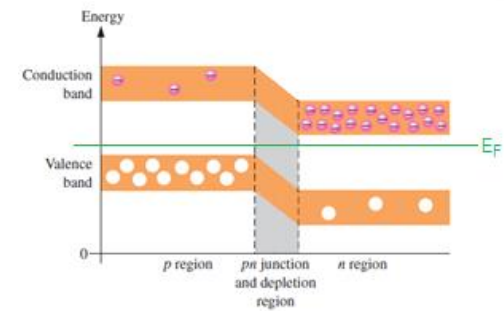
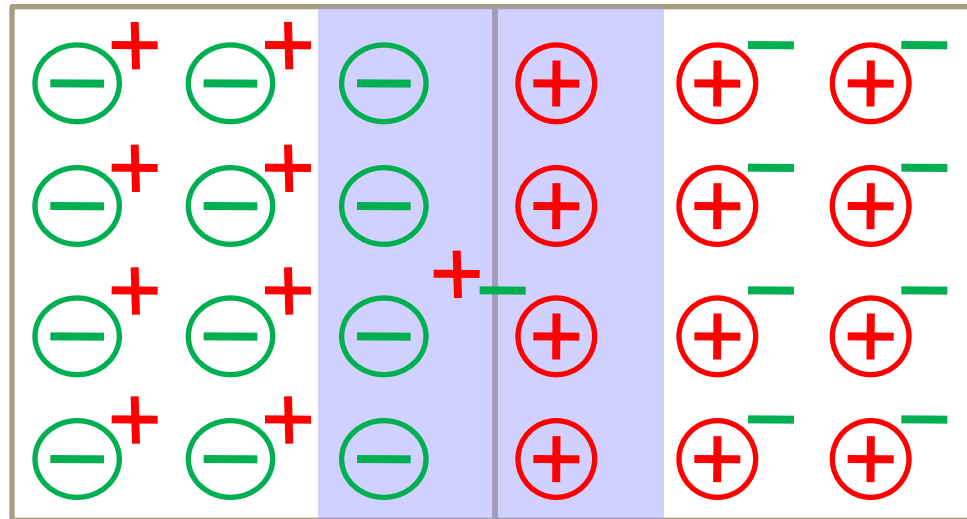


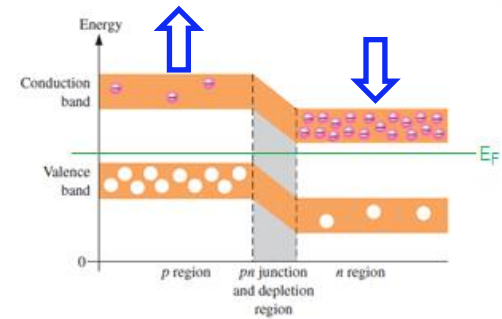
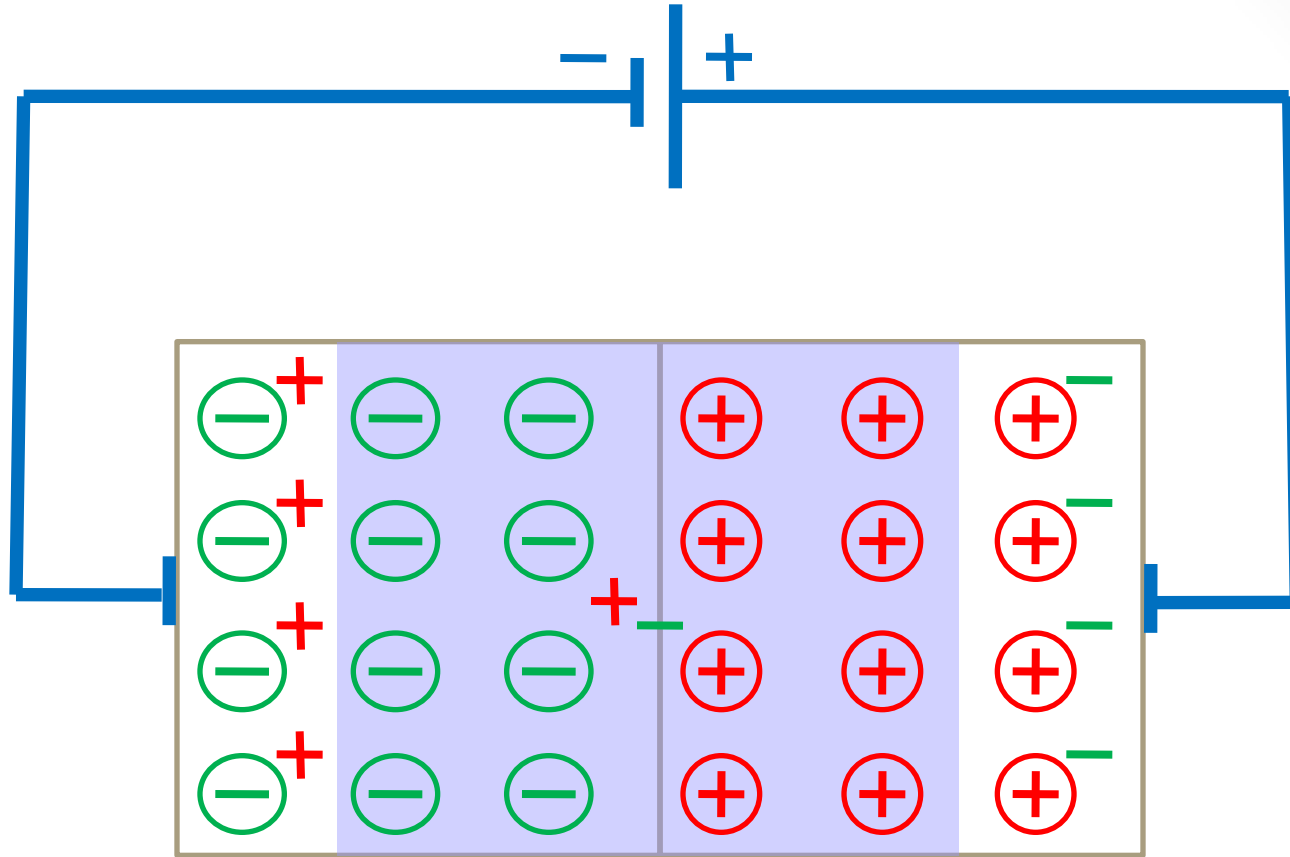
No circuito abaixo a tensão aplicada em A varia entre 0 e 0,2V (pulso com amplitude de 200mV e offset nulo). Ou seja, quando o pulso é aplicado, o diodo conduz. Conforme previsto, sua capacitância aumenta.

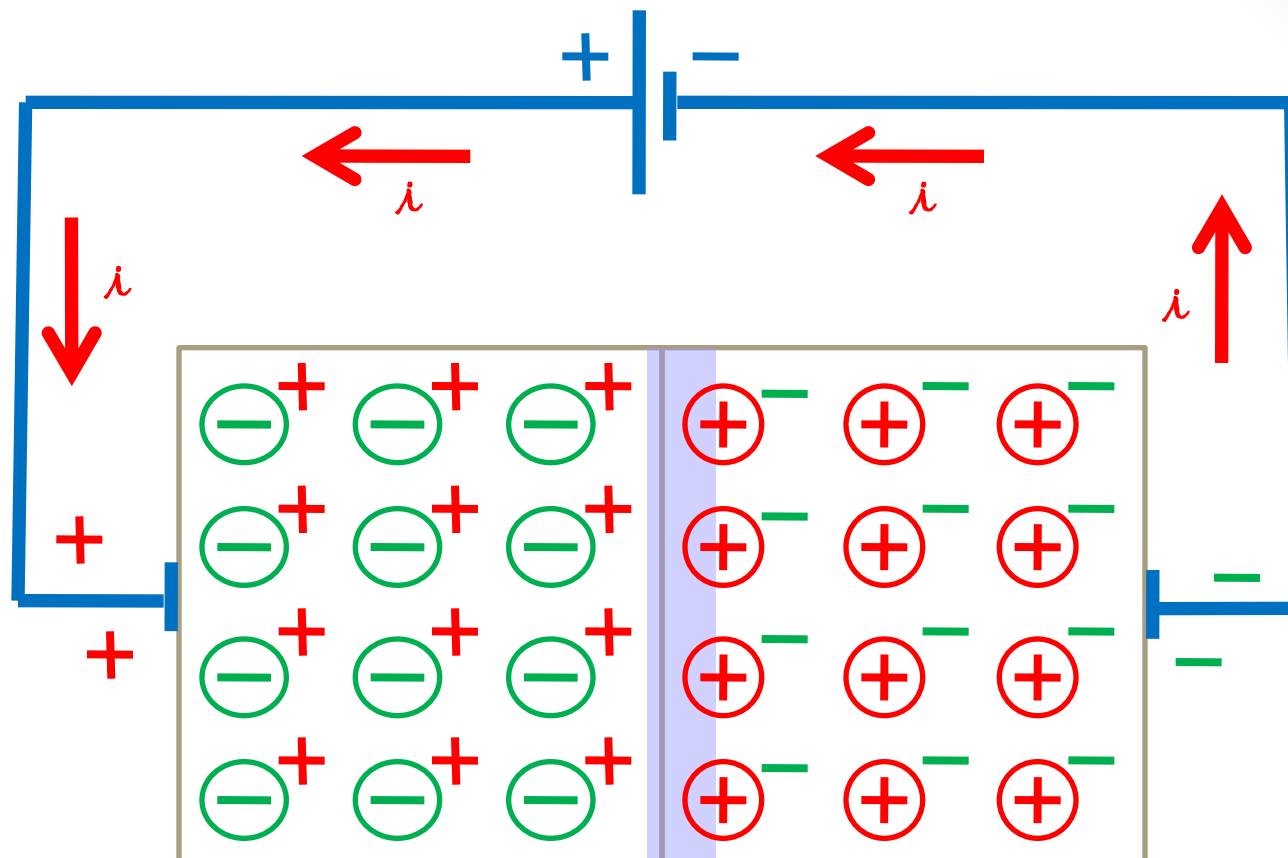


Região de Depleção





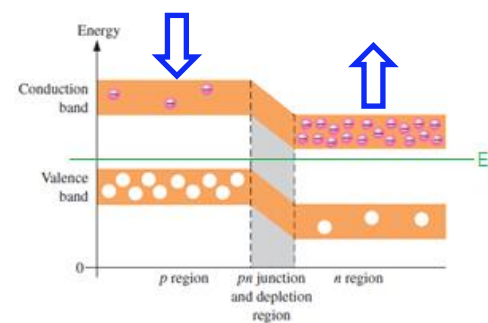




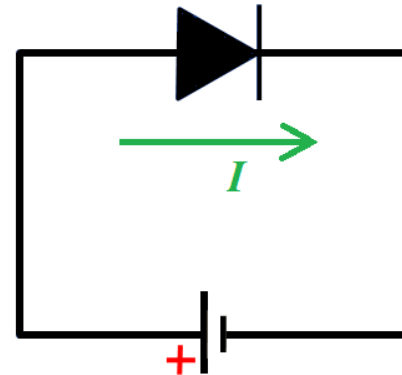
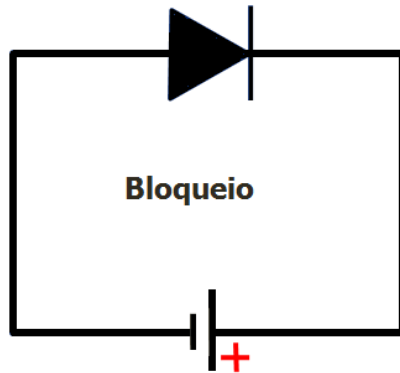
P



N



Diodo

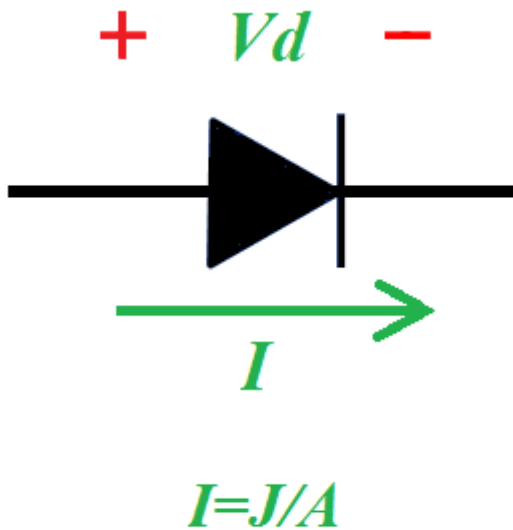


Equação de Shockley:

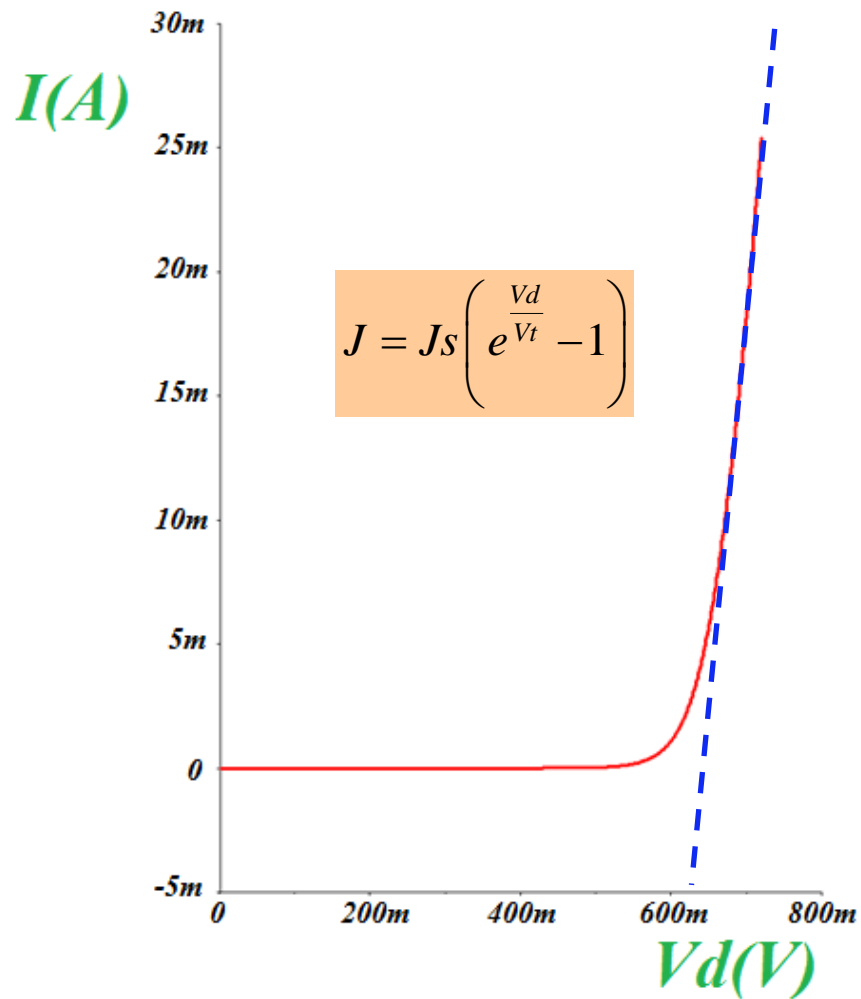
$$J = J_s \left(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right)$$

onde $V_t = \frac{kT}{q}$

e $J = \frac{I}{A}$ é a densidade de corrente (corrente por área da junção)

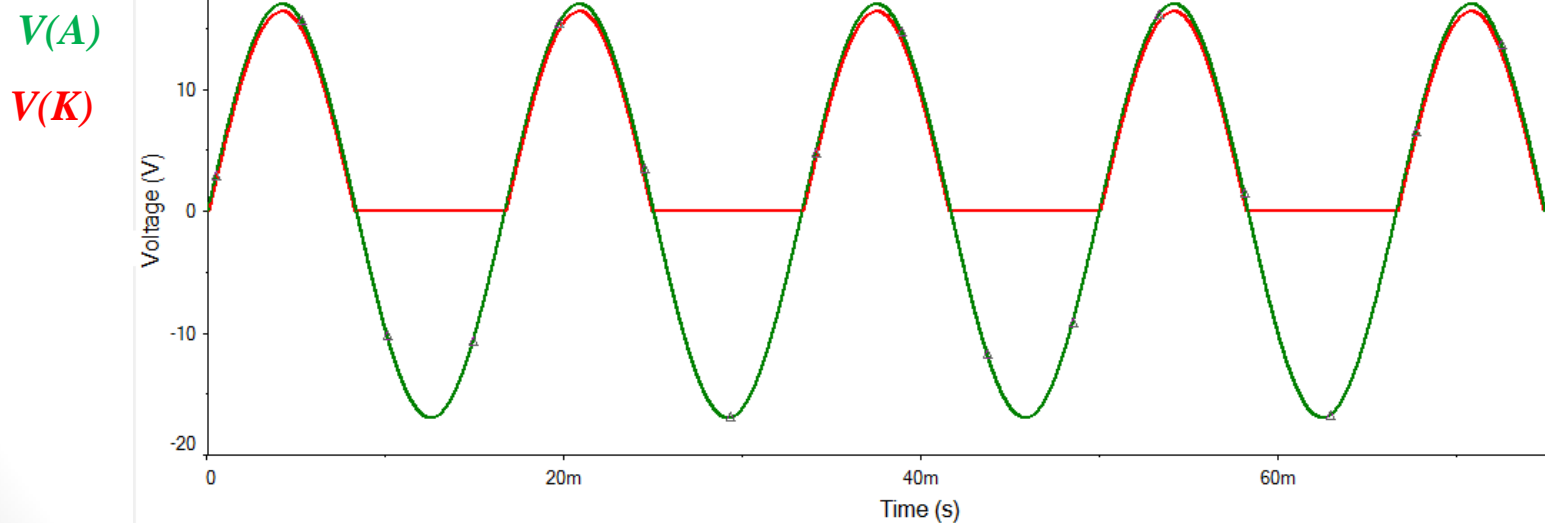
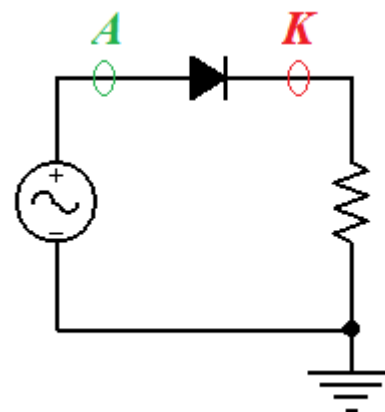


J =densidade de corrente
 A =área da junção



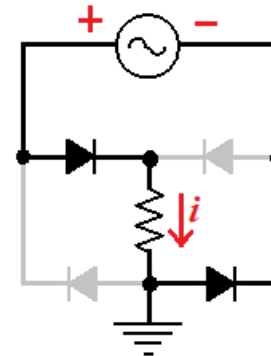
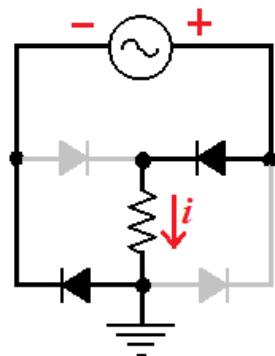
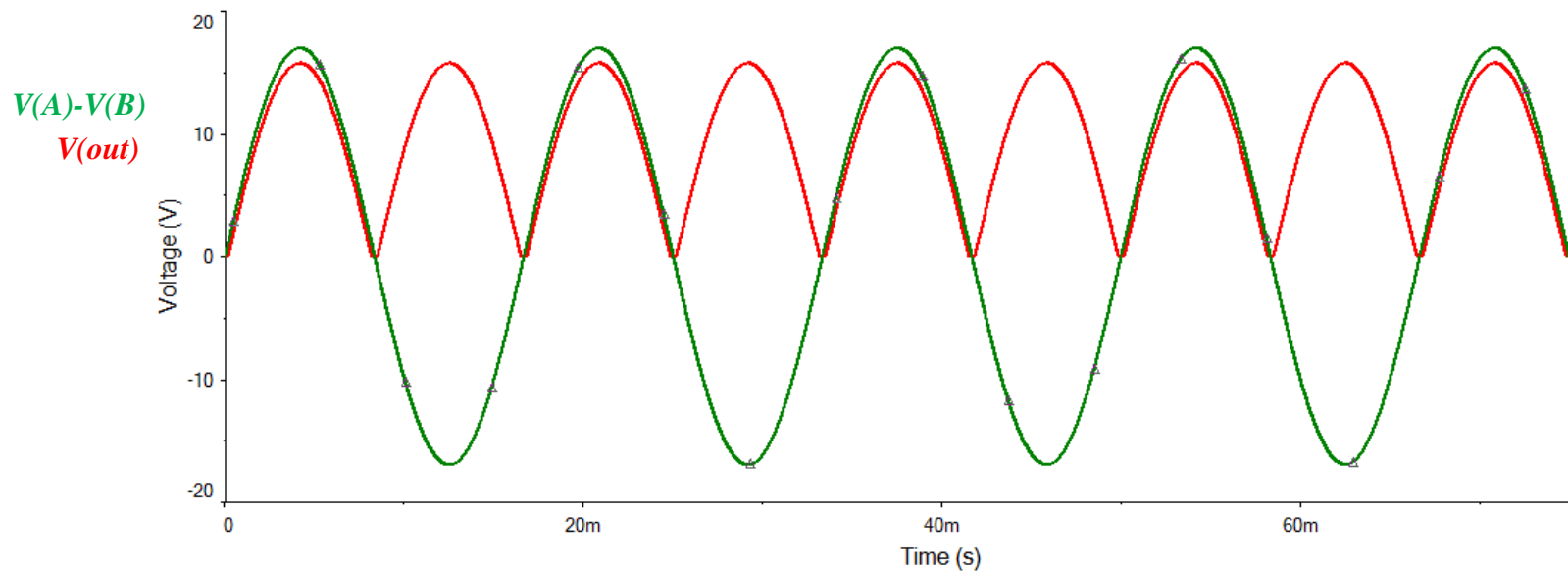
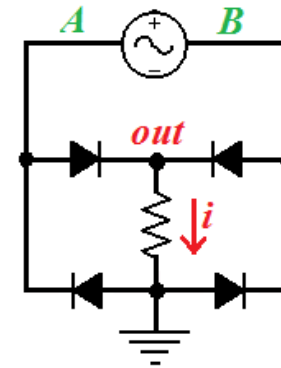
Circuito retificador (de meia onda)

Neste circuito, a tensão senoidal de entrada é aplicada sobre a resistência de carga somente quando o potencial do anodo (A) do diodo é maior do que o potencial do catodo (K). Para amplitudes negativas da senóide de entrada, não flui corrente sobre a carga porque o diodo está reversamente polarizado.



Circuito retificador (de onda completa)

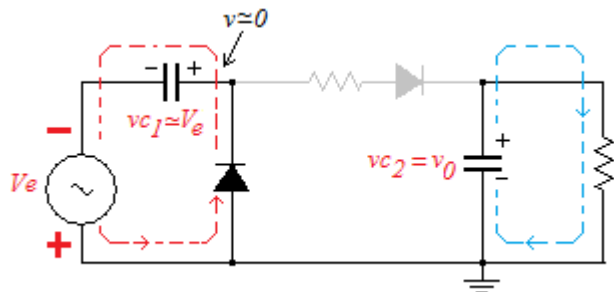
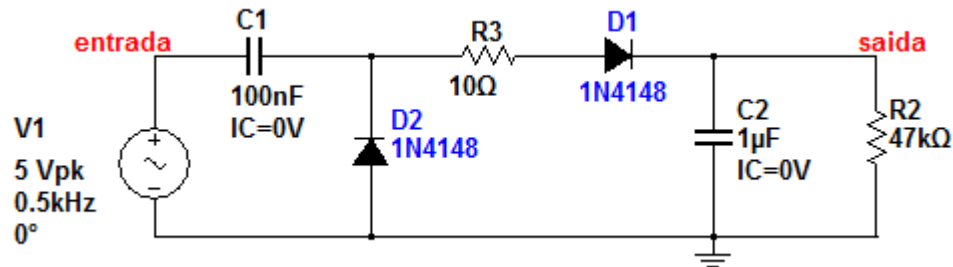
Neste circuito, o sentido da corrente que flui sobre a carga independe da polaridade da tensão (senoidal) aplicada, conforme ilustra o grafico abaixo.



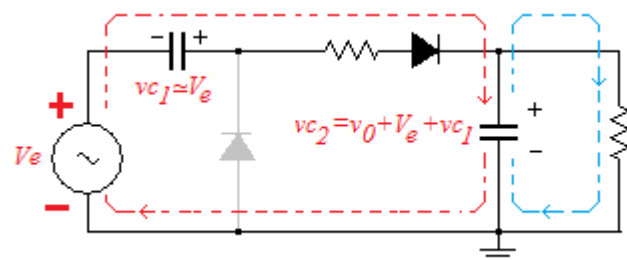
Circuito “dobrador” de tensão

No circuito dobrador de tensão mostrado abaixo, os diodos D1 e D2 operam como chaves que controlam as cargas dos capacitores aos quais estão diretamente conectados. D1, por exemplo, permite que C2 seja recarregado quando a tensão de entrada (V1) ultrapassa a tensão de C2 e impede que o mesmo se descarregue quando a tensão de entrada diminui. Desse modo, em cada ciclo do sinal de entrada, C2 tem um acréscimo de carga (supondo que a perda de carga para R2 é sempre menor do que a reposição de carga devida ao sinal de entrada).

O diodo D2, por sua vez, permite que C1 seja carregado quando a tensão de entrada é negativa. Quando a polaridade do sinal de entrada é invertida (volta a valores positivos), D2 deixa de conduzir e o potencial sobre C1 é praticamente mantido, contribuindo assim para a recarga de C2.

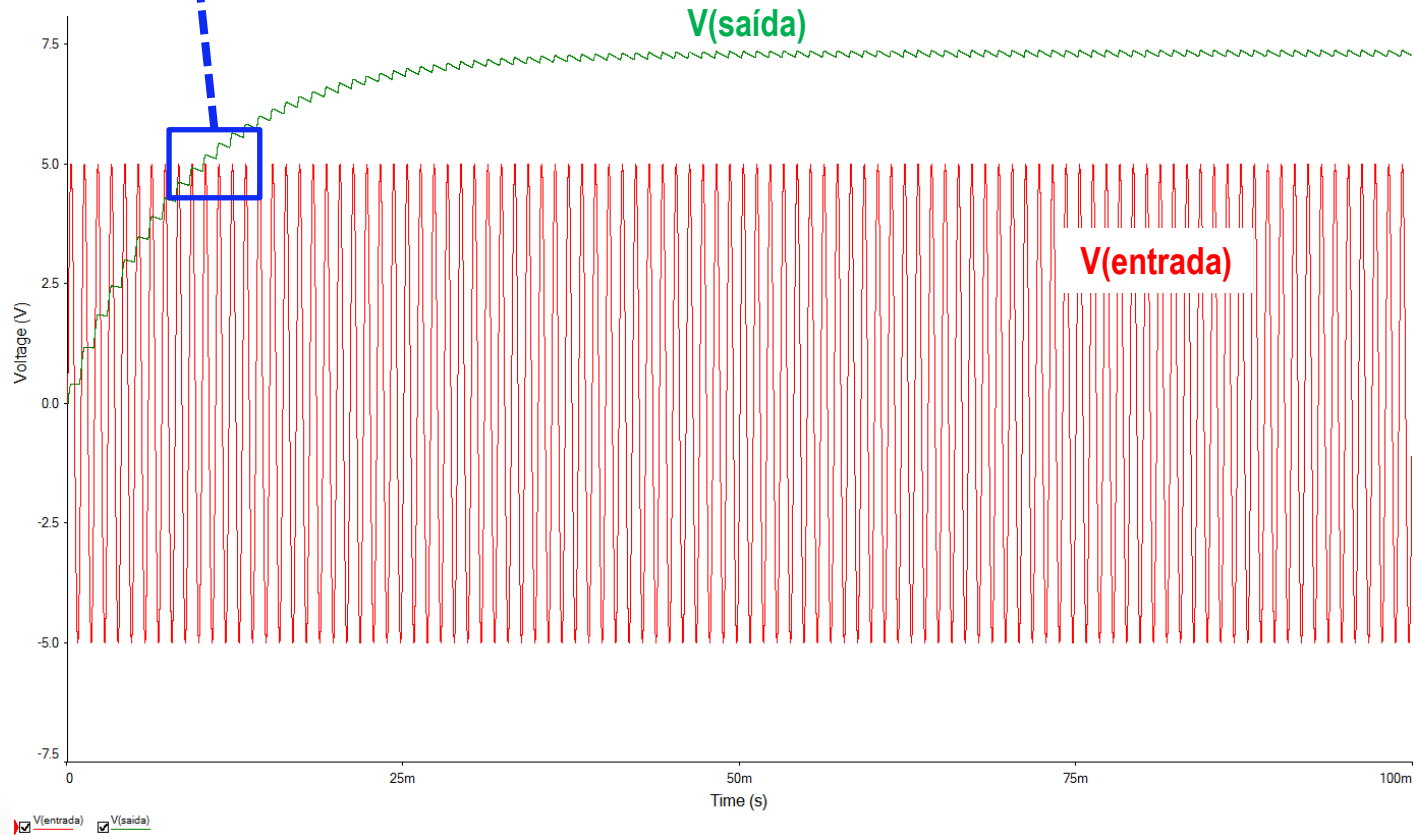
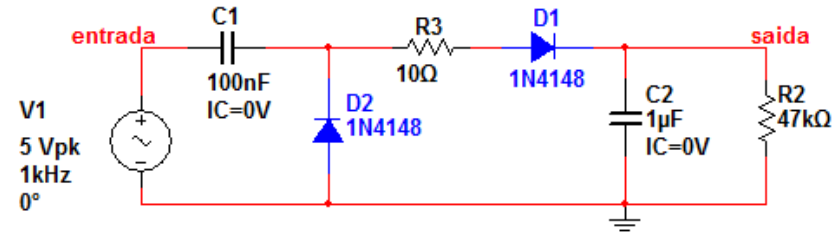
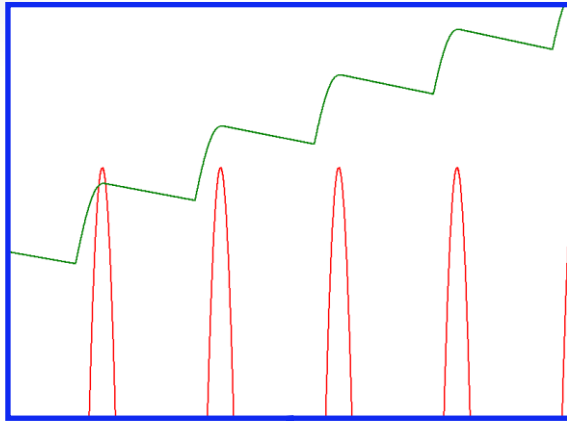


Tensão de entrada negativa



Tensão de entrada positiva

Simulação do Circuito "dobrador" de tensão



Exercício

Um diodo de silício tem as seguintes propriedades:

N_A na região-P = $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
 N_D na região-N = $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
Área da junção = $2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$

Tempo de vida das lacunas minoritárias = 10 μs
Tempo de vida dos elétrons minoritários = 50 μs
 $D_n = 34 \text{ cm}^2/\text{s}$
 $D_p = 13 \text{ cm}^2/\text{s}$

Determine $J_n(-x_p)$, $J_p(x_n)$ e a corrente total do diodo, submetido à tensão $V_a = 0,66 \text{ V}$ e $T = 300 \text{ K}$.

Na temperatura de 300K, a concentração intrínseca é $n_i = 1,0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.

Como tanto N_A como N_D são muito maiores que n_i , podemos considerar que:

$$n_{0n} \approx N_D = 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \quad \text{e} \quad p_{0p} \approx N_A = 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

Sabendo que:

$$p_{0n} \cdot n_{0p} \approx n_i^2 \Rightarrow p_{0n} = 5 \times 10^3 \quad \text{e} \quad n_{0p} = 5 \times 10^2$$

como

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \Rightarrow L_p = \sqrt{10 \times 10^{-6} \times 13} = 11,4 \times 10^{-3} \text{ cm}$$

e

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \Rightarrow L_n = \sqrt{50 \times 10^{-6} \times 34} = 41,2 \times 10^{-3} \text{ cm}$$

Utilizando as expressões dos slides 12-13 (aula-3), lembrando que x_n coincide com $x' = 0$ e que $-x_p$ coincide com $x'' = 0$.

$$J_p(x_n) = \frac{1,6 \times 10^{-19} \times 13 \times 5 \times 10^3}{11,4 \times 10^{-3}} \left[\exp\left(\frac{0,66}{0,026}\right) - 1 \right] = 106,4 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2 \quad \text{e} \quad J_n(-x_p) = 7,74 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$$

Logo, a corrente total do diodo é: $I = A [J_p(x_n) + J_n(-x_p)] = 2 \times 10^{-3} [106,4 \times 10^{-3} + 7,74 \times 10^{-3}]$

$$I = 228 \times 10^{-6} \text{ A}$$