

EE530/EE532 - Simulação B1 - Física da Junção PN

Eletrostática da Junção PN sem polarização externa

A junção PN possui uma interface de transição da concentração de portadores livres, entre uma região de dopagem do tipo-p e uma do tipo-n. Para simplificação dos cálculos podemos considerar esta transição como abrupta e localizada em $x=0$, com N_A e N_D constantes sendo as dopagens das regiões p e n, respectivamente, conforme a Figura 1.a.

Em um instante inicial, antes do contato entre o lado-n e o lado-p, temos a distribuição líquida de portadores conforme Figuras 1.b e 1.c: a densidade de lacunas no lado-p (p_p) é igual a N_A , a densidade de elétrons livres no lado-p (n_p) é igual a n_i^2/N_A , a densidade de elétrons no lado-n (n_n) é N_D , e a densidade de lacunas no lado-n é igual a n_i^2/N_D .

Após o contato entre as duas regiões, uma corrente de difusão se estabelece devido ao gradiente de elétrons livres e lacunas, fazendo com que a inicial neutralidade em todos os pontos do semiconductor seja interrompida. A remoção de lacunas na borda da junção do lado-p faz com que apareça uma densidade de carga fixa de valor negativo, pois os átomos próximos à interface deixam de ser neutralizados por suas lacunas. Analogamente, a borda da junção do lado-n transforma-se numa região de carga líquida positiva. Estas duas regiões em torno da interface da junção formam uma região de carga especial, também chamadas de região de depleção devido a ausência de portadores livres (mas não de cargas elétricas).

Estas regiões de cargas especiais dão origem a um campo elétrico, que por vez dá origem a uma corrente de deriva que contrabalança a corrente de difusão. No equilíbrio, a distribuição de portadores é representado como na Figura 1.F. (Swart, 2004, pág 3:5)

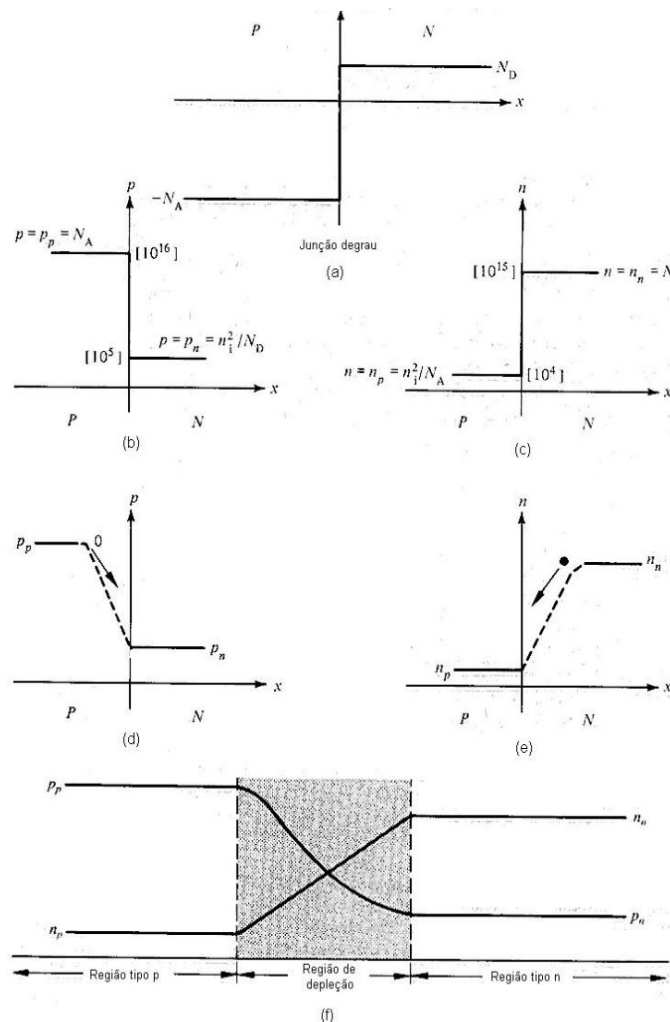


Figura 1: a) Variação da concentração de dopagem numa junção pn abrupta; b/c) variação hipotética inicial das concentrações de lacunas/elétrons; d/e) variação final de equilíbrio das concentrações de lacunas/elétrons; f) combinação das curvas d/e, com indicação da formação da região de depleção. Fonte: Swart, 2004.

Na sequência analisamos a distribuição líquida da densidade de cargas (ρ). Fora da região de depleção, a condição de neutralidade de carga se mantém, visto que

$$\rho = q (p - n + N_A - N_D) = 0. \quad (1)$$

Dentro da região de depleção, temos total depleção de cargas do tipo-p e tipo-n. N_D só existirá no lado p, e N_A só existirá no lado n. Assim,

$$\rho (\text{região depleção lado-p}) = -q.N_A \quad (2)$$

$$\rho (\text{região depleção lado-n}) = +q.N_D \quad (3)$$

Apesar da neutralidade de carga ser espacialmente interrompida ao longo de cada lado da junção, quando analisamos toda a

região de depleção devemos ter uma soma líquida nula de cargas. Sendo x_p a largura da região de depleção no lado-p, e x_n do lado-n, as áreas abaixo e acima do gráfico da Figura 2.b devem ser iguais (Swart,2004, pág3:5).

$$N_A \cdot x_p = N_D \cdot x_n \tag{4}$$

Podemos ainda, a partir da lei de Gauss determinar a variação do campo elétrico a partir da distribuição de cargas. Na aproximação unidimensional da junção PN, teremos que: (Swart, 2004, pág 6:7)

$$E(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\epsilon_s} \rho(x) \, dx \tag{5}$$

ϵ_s é a constante de permissividade. Como $E(x)$ é medido do lado-p para o lado-n, e no lado-p da região de depleção a carga é negativa, $E(x)$ assume valores negativos. Na interface da junção temos uma inversão do sinal da densidade de cargas, originando uma inflexão na curva do campo elétrico. Podemos obter o valor máximo do campo elétrico resolvendo a equação acima para $x=0$. (Swart, 2004, pág 12:14)

$$E(0) = -\frac{q \cdot N_A}{\epsilon_s} x_p = -\frac{q \cdot N_D}{\epsilon_s} x_n \tag{6}$$

E dado que o campo elétrico é o gradiente do potencial elétrico, no caso do problema unidimensional teremos:

$$V(x) = -\int_{-\infty}^x E(x') \, dx' \tag{7}$$

A equação acima indica que mesmo sem aplicar uma tensão externa, a junção em equilíbrio terá uma tensão interna que será dependente apenas do material e de sua dopagem. Podemos determinar analiticamente o valor da barreira de potencial ($V_{bi} = V_o$) considerando que no equilíbrio a corrente de deriva e difusão de elétrons ou lacunas são iguais e opostas, conforme apresentado em aula. (Swart, 2004, pág 9:10)

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} \tag{8}$$

Na equação 6, podemos determinar o campo elétrico máximo, mas ainda não temos x_n ou x_p . Resolvendo-se a equação 7, de $V(x)$ em função de V_{bi} , podemos determinar x_n .

(Swart, 2004, pág 14:16). Junto com a equação 4 podemos determinar também x_p e W (largura total da região de depleção = $x_n + x_p$).

$$x_n = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon_s}{q} V_{bi} \frac{N_A}{N_D (N_A + N_D)}} \tag{9a}$$

$$x_p = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon_s}{q} V_{bi} \frac{N_D}{N_A (N_A + N_D)}} \tag{9b}$$

$$x_n = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon_s}{q} V_{bi} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D}} \tag{9c}$$

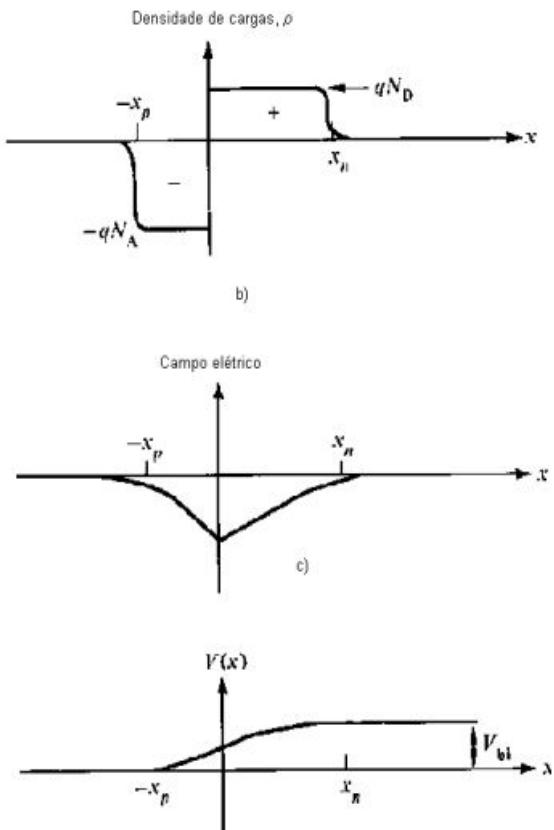


Figura 2: De cima para baixo: Densidade de carga, campo elétrico e potencial Elétrico. Fonte: Swart, 2004.

Eletrostática da Junção PN com polarização externa

Na presença de polarização externa (V_A), a tensão efetiva sobre a região de depleção (V_j será $V_{bi}-V_A$. As fórmulas anteriores se mantêm válidas se substituirmos V_{bi} por V_j . (Swart, 2004, pág 17:21)

PN Junction Lab

Este roteiro foi proposto para observar as principais propriedades de uma junção PN. O software PN Junction LAB, desenvolvido na Universidade Purdue (Indiana, EUA), será utilizado para este propósito e pode ser acessado livremente no endereço apontado na referência [1].

“PN Junction Lab - is a fully interactive app that enables the visualization and exploration of P-N junctions. Users immediately see the conduction and valence band diagrams as well as the quasi-Fermi levels as the app starts up. A slider at the bottom enables users to pan through various bias points and visualize the band-edge diagram as a function bias. Other critical quantities such as charge densities, electric fields, current densities as well as full current-voltage and capacitance-voltage characteristics can be explored interactively with a click of a button.”

Podemos observar na figura 3 a página de acesso à ferramenta, que é executada diretamente no navegador após clicar em *Launch Tool*.

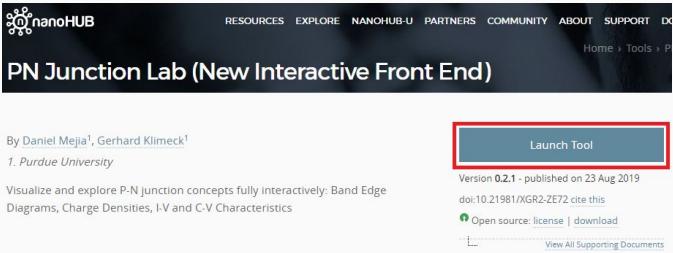


Figura 3: Front-page do PN Junction Lab.

Ao acessar o menu lateral esquerdo é possível selecionar os resultados gráficos disponíveis (Figura 4). A última opção deste menu, “Settings”, serve personalizar as características físicas do dispositivo.

Três submenus estão disponíveis para configuração: *Structure*, *Materials*, *Environment*. Dentro de *Structure* é possível alterar o comprimento total de cada material semiconductor, bem como o número de nós que o programa irá simular. Estas opções devem ser mantidas como padrão nesta simulação. Os parâmetros de especial interesse nesta seção são o *Acceptor concentration (Na-)*, e o *Donor concentration (Nd+)*, ambos dados em [cm⁻³]. A fim de

simular corretamente a junção, estes dois valores devem ser alterados manualmente.

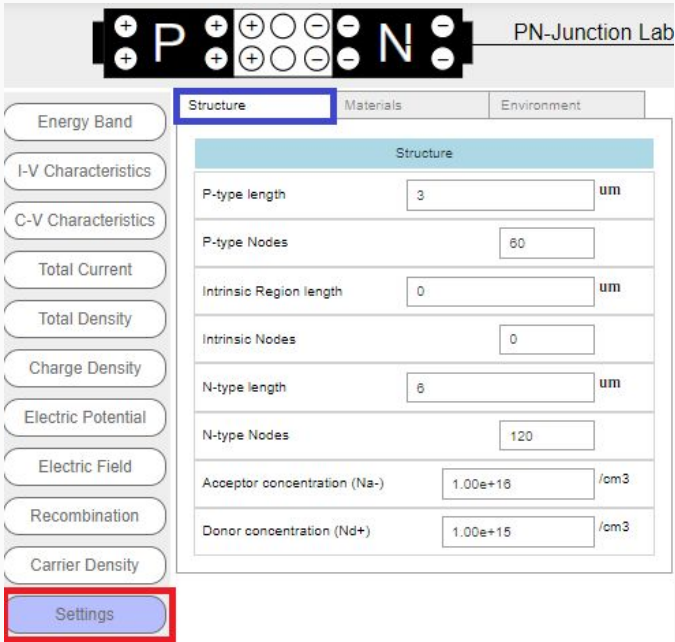


Figura 4: Interface inicial do *PN Junction Lab*. Em vermelho menu lateral destacando o acesso ao “Settings”. Em azul acesso ao submenu “Structure”.

O submenu *Materials*, apresentado na Figura 5, é para alterarmos o tipo de material usado e parâmetros como a meia vida de elétrons livres e lacunas. Não há necessidade de alterá-los. Uma última opção permitiria adicionar um região intermediária com impurezas. Esta opção não será explorada neste roteiro, mas seria especialmente útil para estudos de diodos de potência, por exemplo, que possuem uma região intermediária do tipo N- com baixa dopagem para permitir grandes valores de campo elétrico no bloqueio.

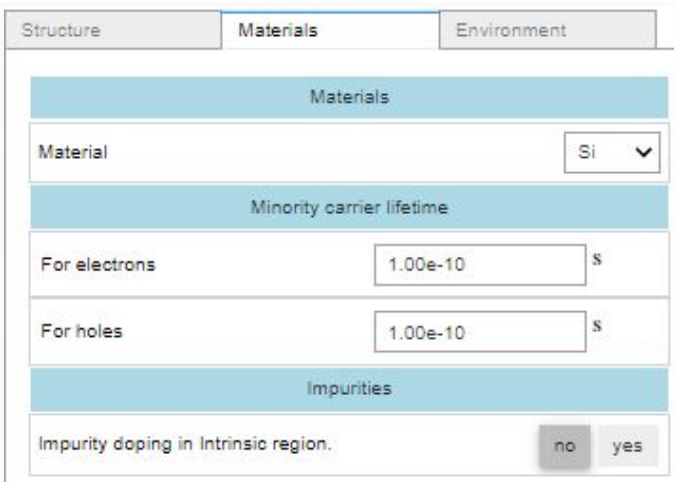


Figura 5: Interface do submenu *Materials*.

O terceiro submenu, *Environment*, serve para alterar a temperatura e a tensão externa aplicada (Figura 6). A temperatura será mantida em 300K. O *Applied Voltage* representa a máxima tensão aplicada que o

software irá simular. Na realidade, o software irá sempre simular o resultado para uma tensão aplicada de 0V (ausência de polarização externa), e irá incrementar esta tensão um número definido de vezes até alcançar o *Applied Voltage* definido. O parâmetro *Number of points* indica exatamente o número total de incrementos de tensão que o programa irá simular, entre 0V e *Applied Voltage*; o valor mínimo é 2, mas iremos manter o valor padrão que é 20. Por fim, note que o valor inicial do *Applied Voltage* é positivo, indicando uma polarização direta. Para polarização reversa utilize um sinal de *menos* (ex: -5V).



Figura 6: Interface do submenu *Environment*.

Após definir todos os parâmetros de interesse, podemos acessar o resultado gráfico desejado clicando diretamente na opção desejada no menu lateral (Figura 4). Para evitar erros dê apenas 1 clique, e aguarde o software carregar completamente o resultado antes de solicitar um outro resultado. Se necessário, atualize a página. Estaremos particularmente interessados em observar a densidade total (de portadores), a densidade de carga, o potencial elétrico, o campo elétrico e a curva I-V.

A Figura 7 representa o resultado da dopagem e das densidade de elétrons e lacunas (para a polarização definida) em uma junção PN hipotética, sendo o lado esquerdo o lado-P e o lado direito o lado-N. Ao mover o mouse em cima de qualquer curva é apresentado o nome da curva, da posição x e do valor medido. Na figura 7, observamos ao posicionar o mouse em cima de um ponto da curva verde que esta é a curva de densidade de elétrons livres. Em cinza pontilhado é apresentado o nível de dopagem em cada lado da junção, e podemos notar que o contato entre as duas junções ocorreu exatamente em 3um.

É importante notar ainda, que o resultado apresentado é para uma polarização com uma fonte externa nula, conforme podemos observar no destaque em azul da Figura 7. Independente do valor que configuramos em *Applied Voltage*, o software irá inicialmente apresentar o resultado para 0V.

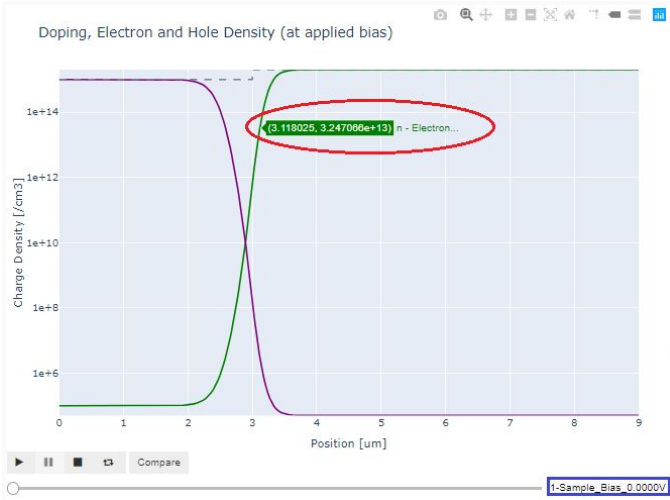


Figura 7: Gráfico da dopagem / densidade de cargas livres x posição.. Em destaque, em vermelho, uma medição realizada. Em azul indicação da tensão externa aplicada.

Para visualizar os resultados para o resultado para o *Applied Voltage* solicitado é necessário alterar a polarização diretamente na parte inferior da janela do resultado, conforme Figura 8.

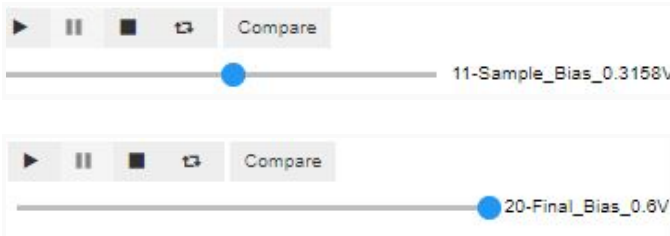


Figura 8: Ferramenta para selecionar o resultado da polarização desejada. Na parte superior é selecionado uma polarização intermediária, e na parte inferior é selecionado a polarização final definida pelo parâmetro *Applied Voltage*.

REFERÊNCIAS

[1] MEJIA, D.; KLIMECK, G. "PN Junction Lab (New Interactive Front End), 2019. (DOI: 10.21981/XGR2-ZE72) Disponível em <https://nanohub.org/resources/pnjunctionlab>

[2]SWART, JACOBUS W. Materiais elétricos: fundamentos e semicondutores. Capítulo 10. CAMPINAS: UNICAMP, 2004. Disponível em <https://www.ccs.unicamp.br/cursos/ee941/download/cap04.pdf>

Exercício proposto.

Valor: 10 pontos.

0. Leia as orientações gerais do arquivo “EE530/EE532 - Notas sobre os trabalhos de simulação”. O trabalho é individual.

1. Dado uma junção PN em silício a 300K, com $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ e $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, calcule o potencial interno da junção PN ($V_{bi} = V_0$). Determine a largura de depleção na região N (x_n), da região P (x_p), e a largura total da região de depleção (W) na ausência de fonte de tensão externa. Calcule ainda o campo elétrico máximo (1 ponto).

$$\begin{aligned} &\text{Use } n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3} \\ &q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \quad [F] = \\ &C/V \\ &kT/q = 26 \cdot 10^{-3} \text{ V} \\ &kT = 26 \cdot 10^{-3} \text{ eV} \\ &\epsilon_{Si} = 1,045 \cdot 10^{-12} \text{ F/cm} \end{aligned}$$

2. Execute o simulador disponível em [1] e simule a junção do exercício 1 na ausência de polarização externa. Para isso, siga o roteiro apresentado na seção “PN Junction LAB” e altere apenas os parâmetros necessários definidos no exercício 1.

- a. Apresente o perfil da dopagem da junção com o perfil da densidade de portadores (sem polarização externa). Quem são os portadores minoritários e majoritários em cada material? Compare com o cálculo (1 ponto).
- b. Apresente o perfil de densidade de cargas no equilíbrio. Verifique os valores de x_n , x_p e W (aproxime o limite da região de depleção como aquela na qual a densidade de carga é 10% da carga máxima) com os valores calculados. Verifique e explique a razão numérica entre x_p , x_n , N_D e N_A . (1 ponto)
- c. Apresente o perfil do potencial elétrico ao longo da camada de depleção, e

compare o valor calculado da barreira de potencial ($V_{bi} = V_0$). (1 ponto)

- d. Apresente o perfil do campo elétrico dentro da região de depleção, e compare o valor máximo com o valor calculado. (1 ponto)

3. Repita a simulação para um Applied Voltage igual a -5V (polarização reversa).

- a. O que aconteceu com o valor da barreira de potencial? Explique. (1 ponto)
- b. O que aconteceu com o tamanho total da região de depleção (W)? Discuta. (1 ponto)
- c. O que aconteceu com valor máximo do campo elétrico, e por quê isso ocorreu? Qual importância prática disto? Pesquise e discuta os fenômenos de efeito zener e efeito avalanche que o diodo estará sujeito, e explique como eles podem destruir o componente. DICA: Em junções não fortemente dopadas (como a deste trabalho), o efeito zener raramente é observado, sendo o efeito avalanche determinante. (1 ponto)
- d. Pesquise em um datasheet de um diodo de uso geral qual a máxima tensão reversa suportada. (0,5 ponto bônus - nota máxima satura em 10,0)

4. Repita a simulação para um Applied Voltage igual a +2V (polarização direta), repita:

- a. O que aconteceu com o valor da barreira de potencial? Explique. (1 ponto)
- b. O que aconteceu com o tamanho total da região de depleção (W)? Explique. (1 ponto)