

## SEMICONDUCTORES

Prof. Dr. Hercilio Gomes de Melo

### Monitores da disciplina

M. Sc. Juan David Santos Martinez

M. Sc. Leandro de Souza Domingues

Compêndio realizado com base nas referências apresentadas ao final do texto, a partir das quais foram retiradas as figuras apresentadas.

### Definição de semicondutores:

Os semicondutores abrangem uma classe de materiais caracterizados por apresentarem **resistividade elétrica** da ordem de  $10^{-4}$  até  $10^7$  ohm.m, que é uma faixa de resistência situada entre os materiais metálicos (resistividade entre  $10^{-7}$  e  $10^{-6}$  ohm.m) e os materiais isolantes (resistividade entre  $10^{10}$  e  $10^{14}$  ohm.m).

Os semicondutores se manifestam em diferentes tipos de composições químicas e uma ampla variedade de estruturas cristalinas, desde semicondutores de tipo elementar como silício (Si), carbono na forma de nanotubos  $C_{60}$ , selênio (Se) ou compostos binários tais como arseneto de gálio (GaAs). Muitos compostos orgânicos, como poliacetileno  $(CH)_n$ , são semicondutores. Alguns semicondutores exibem comportamento magnético ou ferroelétrico e outros se tornam supercondutores quando dopados com suficiente quantidade de portadores de carga.

A resistividade dos semicondutores (o contrário da condutividade) varia de acordo com a quantidade de impurezas adicionadas (Figura 1), o que faz com que eles sejam ótimos para aplicações na indústria eletrônica, como por exemplo, na fabricação de diodos, transistores e outros dispositivos de maior complexidade tecnológica, como microprocessadores e nanocircuitos. Na Figura abaixo verifica-se que, dependendo do grau de dopagem a resistividade do Si pode variar de aproximadamente 10 ordens de grandeza.

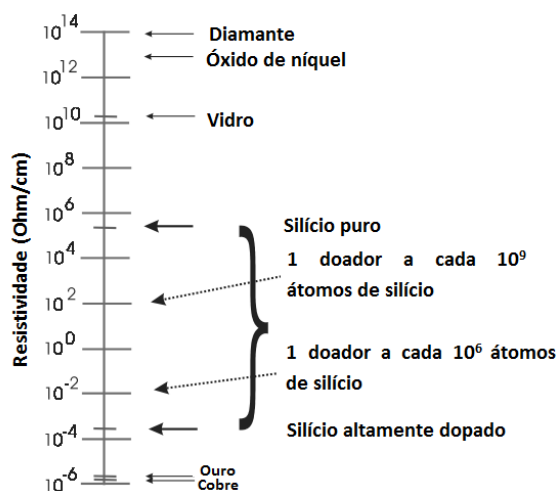
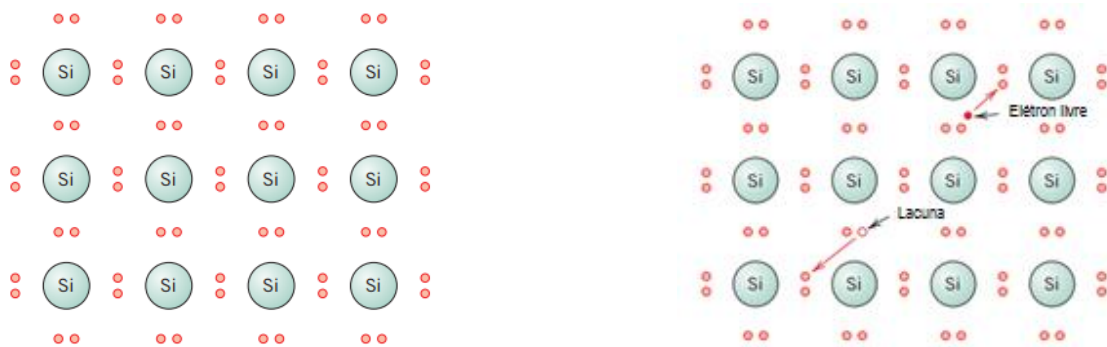


Figura 1: Comparação da resistividade de diferentes materiais

### Tipos de semicondutores:

Os semicondutores são subdivididos em dois tipos: intrínsecos e extrínsecos. A condutividade de um semicondutor intrínseco (Figura 2) é limitada pela excitação térmica dos elétrons desde a banda de valência preenchida até a banda de condução vazia através da energia de espaçamento (**gap**) entre bandas,  $E_g$ , que oscila entre um valor de 1,1 e 0,7 eV. Este processo deixa lacunas na banda de valência e elétrons na banda de condução, ambos participando da condução. Elementos como silício e germânio são classificados como semicondutores intrínsecos, além de uma gama de compostos envolvendo a combinação de elementos dos grupos IIIA e VA da tabela periódica, como arseneto de gálio (GaAs) e antimoneto de índio (InSb). Estes exibem diferentes configurações de estrutura cristalina, tais como monoclinica, triclinica, etc, dependendo do número de coordenação. Na proporção em que os elementos apresentam maior diferença de eletronegatividade e um maior caráter iônico das ligações atômicas, aumenta a magnitude de energia de espaçamento entre bandas, tendo como resultado um material mais isolante. A ionicidade causa mudanças significativas nas propriedades dos semicondutores, acrescentando a interação de Coulomb entre os íons e também aumentando a resistividade elétrica.



**Figura 2:** Condução eletrônica de um semicondutor intrínseco

Os semicondutores extrínsecos são desenvolvidos através da dopagem de um semicondutor intrínseco com “átomos de um elemento estranho” ao seu reticulado cristalino. O procedimento é realizado durante a produção do semicondutor, e consiste em introduzir no reticulado deste (matriz) uma quantidade controlada do átomo dopante. A condutividade atingida depende da quantidade de dopante introduzida na estrutura do semicondutor.

Em um semicondutor extrínseco (Figura 3a e Figura 3b) a condutividade depende da quantidade e do tipo de impurezas presentes no material, o que definirá se a condução ocorrerá pela presença de excesso de elétrons (semicondutores do tipo-n) ou então pela presença de lacunas na banda de valência (semicondutores do tipo-p).

Um semicondutor do tipo-n pode ser estabelecido a partir de um semicondutor intrínseco, por exemplo, silício, dopado com átomos com maior número de elétrons de valência, denominados espécies doadoras, fazendo com que se tenha um excesso de cargas negativas. A dopagem com estes átomos introduz um nível energético doador próximo à banda de condução (Figura 3a). Como mostra a figura, o espaçamento (**gap**) entre este nível doador e a banda de condução é menor que para a matriz do

semicondutor. A excitação destes elétrons através deste gap faz com que o semicondutor possa conduzir energia elétrica.

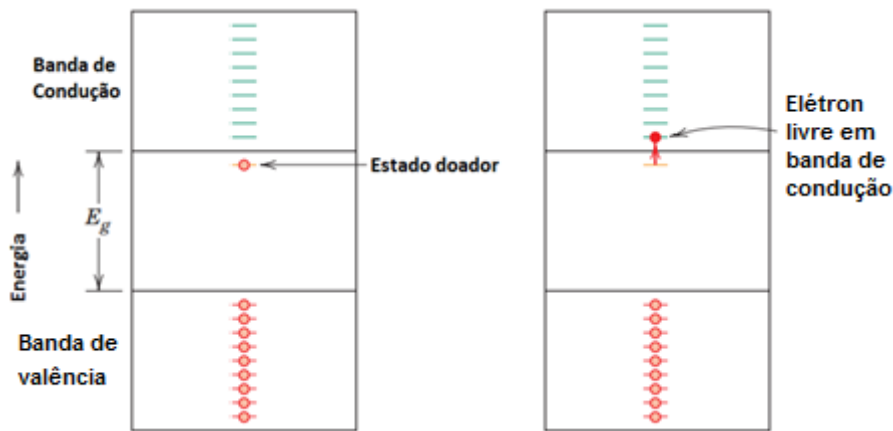


Figura 3a: Esquema de bandas para um semicondutor extrínseco do tipo-n



Figura 3b: Condução elétrica em um semicondutor extrínseco do tipo-n

Analogamente, os semicondutores do tipo-p são produzidos a partir da dopagem de um semicondutor intrínseco com um elemento com menor número de elétrons de valência (tipicamente elementos da família 3A). Este procedimento introduz um nível energético receptor próximo à banda de valência. A promoção de um elétron da banda de valência para o nível condutor introduzido gera na primeira um buraco eletrônico (Figura 4a). Quando da aplicação de uma diferença de potencial os buracos se deslocam para o polo positivo devido à “saltos” dos elétrons entre buracos adjacentes.

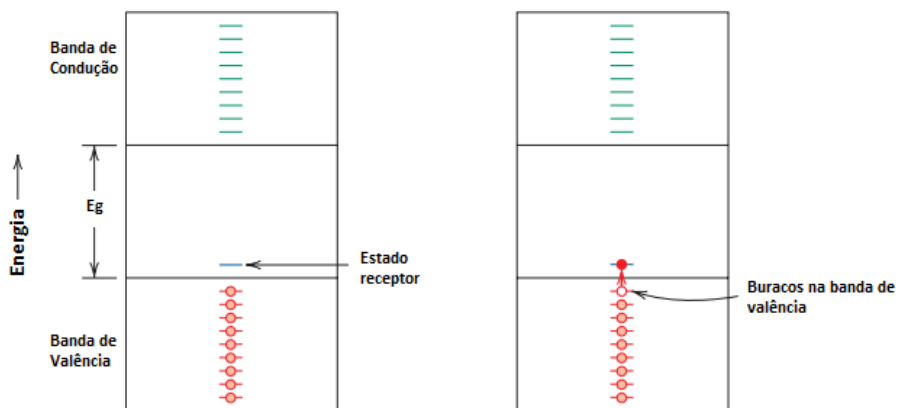


Figura 4a: Esquema de bandas para um semicondutor extrínseco do tipo-p

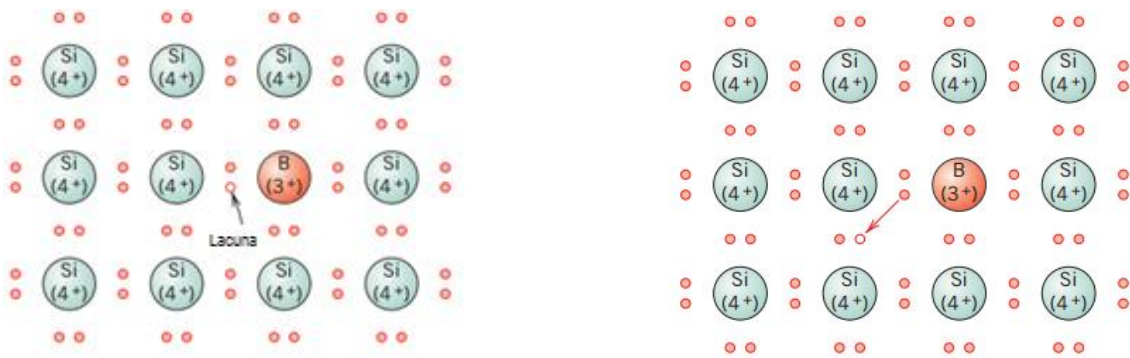


Figura 4b: Condução elétrica em um semicondutor extrínseco do tipo-p

Junções de um semicondutor extrínseco do tipo n com um semicondutor extrínseco do tipo p gera uma junção do tipo p-n, que é amplamente utilizada em componentes eletrônicos (Figura 5a). Este tipo de diodo tem função retificadora e permite a condução da corrente elétrica em apenas uma direção. Para que o diodo se torne condutor, é necessário ligar o polo negativo da bateria ao semicondutor do tipo n, enquanto o semicondutor do tipo p é conectado ao polo positivo da bateria.

Quando do funcionamento do dispositivo os elétrons gerados são introduzidos no semicondutor do tipo n e se dirigem à junção com o semicondutor do tipo p onde ocuparão um buraco eletrônico e dirigindo-se ao polo positivo da fonte. Por sua vez, no semicondutor do tipo p, buracos eletrônicos são gerados no ponto de contato com o fio condutor ligado ao polo positivo. O deslocamento dos elétrons através dos buracos gerados faz com que estes se desloquem em direção à junção com o semicondutor do tipo n onde receberão novos elétrons. Na prática é como se os buracos eletrônicos (cargas positivas) estivessem se dirigindo ao polo negativo da fonte de tensão (Figura 5b).

Por sua vez, se o semicondutor do tipo n for ligado ao polo positivo da fonte de tensão e o semicondutor do tipo p for ligado ao polo negativo o diodo funcionará como isolante. Nesta configuração o excesso de elétrons do semicondutor do tipo n se dirigirá ao polo positivo da fonte, enquanto os buracos eletrônicos do semicondutor do tipo p serão ocupados por elétrons provenientes do polo negativo da fonte. Assim, na região de junção, será gerada uma zona de depleção (sem portadores de carga) e o dispositivo não será mais capaz de conduzir (Figura 5c).

A junção de semicondutores do tipo p e do tipo n gera um dispositivo retificador, no qual a corrente só será conduzida em uma única direção.

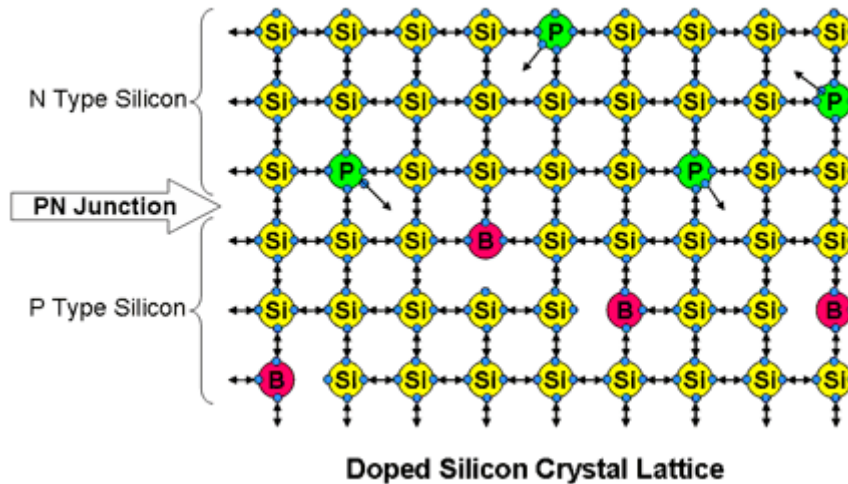


Figura 5(a) – Representação esquemática de uma junção do tipo p-n.

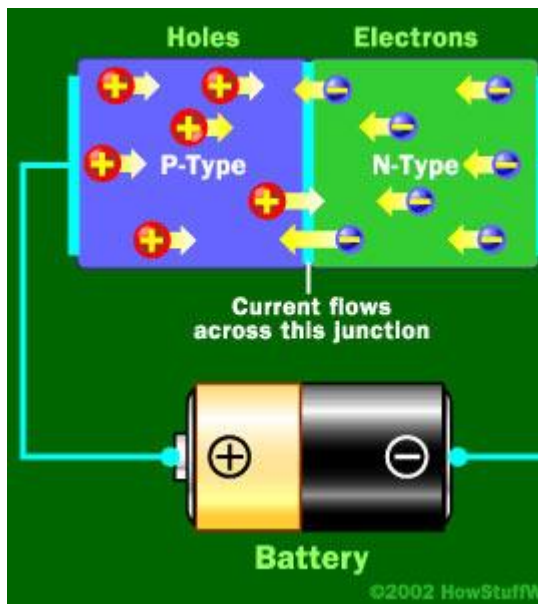


Figura 5(b) – Junção p-n no modo de condução

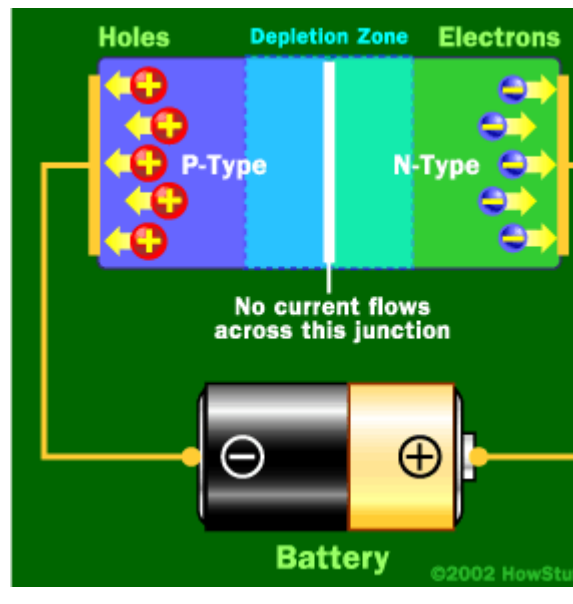


Figura 5(c) – Junção p-n no modo isolante

Fontes: <https://www.mpoweruk.com/semiconductors.htm> e <http://electronics.howstuffworks.com/led1.htm>. Acesso em 12/06/2018

### Condutividade dos semicondutores:

A condução dentro dos semicondutores se dá pelos chamados portadores de carga (elétrons livres e os buracos), que obedecem a equação 1.

$$\sigma = n|e|\mu_e + p|e|\mu_p \quad (1)$$

Onde  $p$  representa o número de buracos por  $m^3$  e  $\mu_p$  corresponde à sua respectiva mobilidade, caracterizada por ser inferior ao valor de  $\mu_e$ , mobilidade eletrônica. No caso dos semicondutores intrínsecos, o número de elétrons livres é igual ao número de buracos eletrônicos, logo:

$$n = p = n_i \quad (2)$$

Onde  $n_i$  corresponde à concentração de portadores intrínsecos.

Em contrapartida, nos semicondutores extrínsecos, a condutividade se dá pela presença de impurezas no material. No caso do tipo-n, como existe um excesso de elétrons livres em relação à quantidade de buracos, o segundo termo da equação 1, que abrange a condutividade em função dos buracos existentes no material, se torna ínfimo. Logo a equação pode ser reescrita apenas em função do primeiro termo do segundo membro, conforme apresentado na equação 3.

$$\sigma \cong n|e|\mu_e \quad (3)$$

Similarmente, para o tipo-p, a quantidade de buracos é muito superior se comparada à quantidade de elétrons livres ( $p \gg n$ ), tornando o primeiro termo do segundo membro desprezível, sendo possível reescrever a equação 1 apenas em função da condutividade promovida pelos buracos presentes no semicondutor, conforme apresentado na equação 4.

$$\sigma \cong p|e|\mu_p \quad (4)$$

### **Efeito óptico nos semicondutores:**

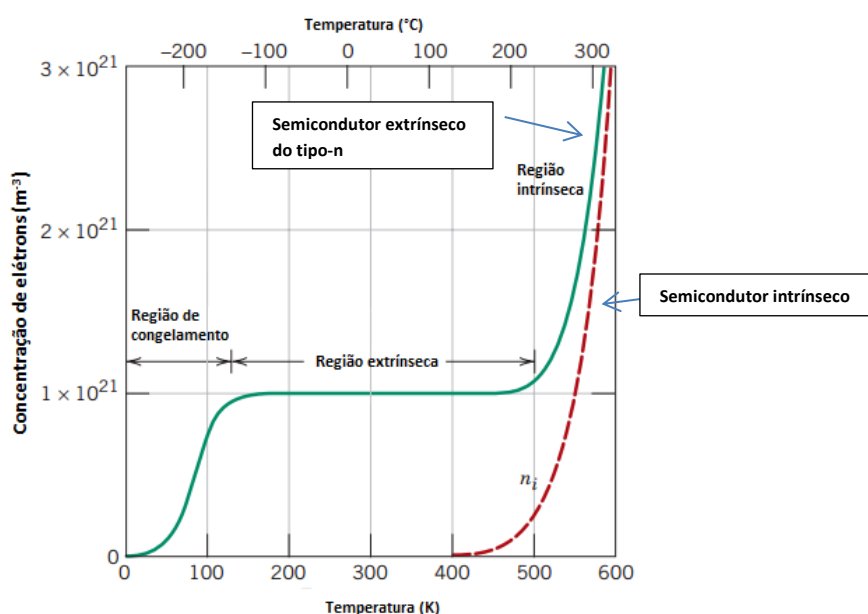
A energia fundamental do espaçamento entre bandas na maioria dos semicondutores é caracterizada por se apresentar em uma faixa entre 0 e 6eV. Assim sendo, é possível que fótons que apresentem energia suficiente consigam excitar os elétrons da banda de valência totalmente preenchida, promovendo-os para a banda de condução vazia. Como resultado, o espectro óptico dos semicondutores pode fornecer um excelente recurso para obter informações referentes às suas respectivas propriedades eletrônicas, bem como a dos defeitos presentes no material. Essas propriedades ópticas são à base de importantes aplicações desses tipos de materiais, como são o caso de lasers, diodos emissores de luz e fotodetectores.

Com o intuito de caracterizar as propriedades ópticas dos semicondutores, é incidido na superfície um feixe de luz que tem uma parcela refletida e outra transmitida. No interior da superfície do material, parte dessa radiação incidida é absorvida, que pode vir a se dissipar na forma de calor ou ser retransmitida em diferentes frequências, enquanto que o restante ou é disperso pelo seu interior ou passa através deste. A luz refletida corresponde à parcela absorvida pelos elétrons em saltos quânticos e posteriormente reemitida quando estes retornam a seu estado fundamental (caem para uma menor condição energética). O espaçamento entre as bandas de condução e de valência determina a energia e também a cor da luz emitida.

### **Efeito da temperatura nos semicondutores:**

A temperatura exerce uma grande influência sobre a concentração dos portadores de carga dos semicondutores. Para os semicondutores intrínsecos, o aumento da temperatura promove um aumento na concentração de elétrons e buracos disponíveis para a condução eletrônica, uma vez que uma maior energia térmica estará disponível

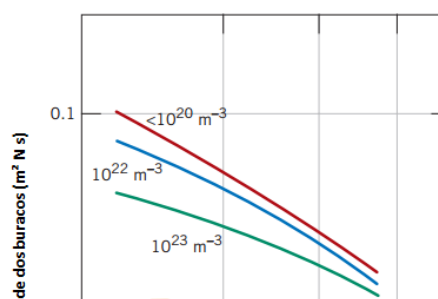
para excitar esses elétrons, promovendo-os para a banda de condução. Em contrapartida, a concentração de portadores não aumenta proporcionalmente com o aumento da temperatura para os semicondutores extrínsecos, e a variação da condutividade em função da temperatura apresenta as características apresentadas na Figura 6, onde existem três regiões distintas. A primeira é denominada “região de congelamento”, onde os doadores não possuem energia térmica suficiente para promover os seus elétrons para a banda de condução, a “região extrínseca”, caracterizada por ser a faixa de temperatura na qual os semicondutores extrínsecos são comumente empregados, onde os elétrons na banda de condução são excitados a partir do estado doador da impureza presente no material, logo a concentração de portadores se torna virtualmente igual à concentração de impureza nesse caso, sendo caracterizada por um patamar constante, e por fim, a “região intrínseca”, onde o material passa a se comportar de modo similar a um semiconductor intrínseco, ou seja, a concentração de portadores aumenta com o aumento da temperatura.

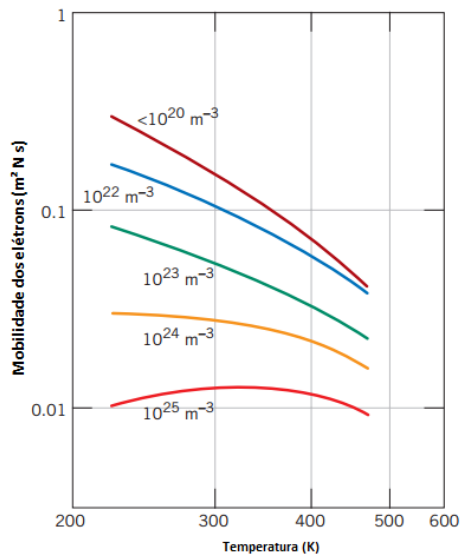


**Figura 6:** Concentração de elétrons em função da temperatura para um semiconductor intrínseco e um extrínseco do tipo-n de silício

### Mobilidade dos portadores de carga:

Como visto anteriormente, a condutividade de um semiconductor depende da concentração de seus respectivos portadores. Porém, é necessário que estes possam ser transportados através do cristal, o que pode ser influenciado por fatores como defeitos, vibrações térmicas, ou mesmo pela concentração de impurezas presentes no material. A figura 7 apresenta um comparativo da mobilidade dos elétrons e dos buracos para um silício dopado com diferentes concentrações de doadores e de receptores e submetidos a diferentes escalas de temperaturas.





**Figura 7:** Dependências em relação à temperatura das mobilidades dos elétrons e dos buracos

Através do gráfico é possível visualizar que tanto a concentração de dopantes quanto a temperatura na qual o semicondutor se encontra são fatores cruciais para a mobilidade de seus portadores, sendo imprescindível o controle de ambas as variáveis para atingir um nível de mobilidade adequado para um determinado fim.

#### Referências

- Callister, W. D. (2007). *Materials Science and Engineering An Introduction*. United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- Gildenblat, G. S. (2000). *The Electrical Engineering Handbook*. Boca Raton: CRC Press LLC.
- Harris, M. (2003). *RF and Microwave Semiconductor Device Handbook*. New York: CRC PRESS Taylor & Francis Group.
- Temkin, H. E. (2001). *Encyclopedia of Chemical Physics and Physical Chemistry, Vol III Applications*. IOP Publishing Ltd.
- Yu, P. Y. (2010). *Fundamentals of Semiconductors Physics and Materials Properties*. New York: Springer .