

*EN2719*  
*Dispositivos Eletrônicos*

**Movimentação de portadores no cristal**

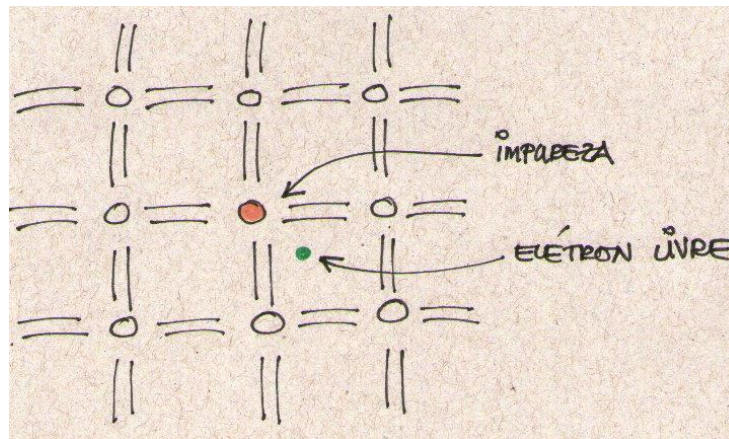
***Prof. Carlos Reis***  
***Sala:705-1-A***

# Semicondutores tipo-P e tipo-N

Graças ao baixo número de elétrons livres na banda de condução e de lacunas na banda de valência, os materiais semicondutores, na forma intrínseca, não conduzem muito bem a corrente elétrica e, devido a isto, tornam-se menos valiosos.

O Silício (ou Germânio) intrínseco deve ser processado para que tenha aumentado o seu número de elétrons livres e lacunas e com isto aumentar sua condutividade. Nestas condições, torna-se útil na construção de dispositivos eletrônicos.

Isto pode ser feito através da adição de impurezas ao material intrínseco, gerando com isto dois tipos de materiais semicondutores **extrínsecos** (impuros), um chamado Tipo-N e outro Tipo-P.



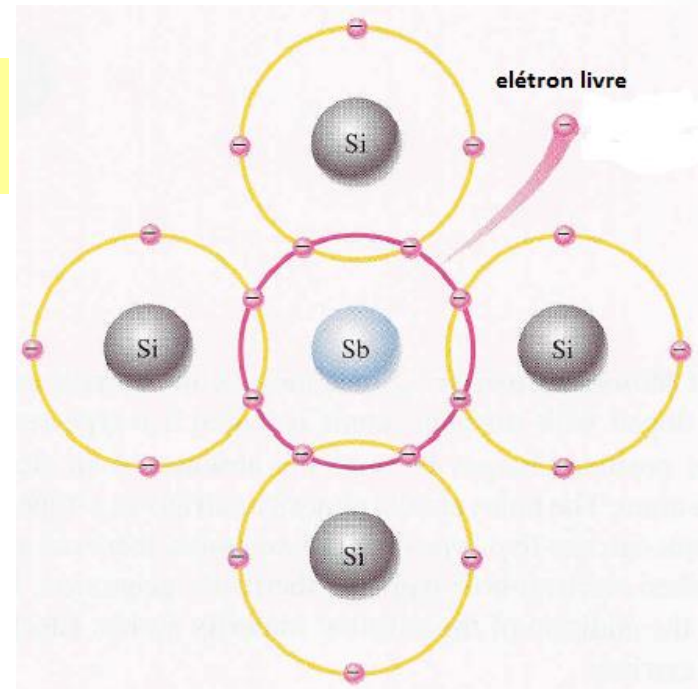
# Semicondutor do tipo-N

Para aumentar o número de elétrons na banda de condução de um cristal de Silício intrínseco são adicionados a este cristal átomos de elementos que tenham cinco elétrons em sua camada de valência (pentavalentes). Estes átomos diferentes que são introduzidos na rede cristalina são tratados como impurezas. São pentavalentes os átomos de elementos como Arsênio (As), Fósforo (P), Bismuto (Bi) e Antimônio (Sb).

O processo de adição de átomos de impurezas em um cristal chama-se **dopagem**.

Cada átomo de Antimônio introduzido no cristal substitui um átomo de Silício. Dos cinco elétrons de valência que tem, quatro formam ligações covalentes com os átomos de Silício vizinhos. Portanto, sobra um elétron. Este elétron excedente torna-se um elétron de condução, sem ligação com nenhum átomo.

Como o átomo pentavalente contribui com um elétron livre para a rede cristalina, é chamado de **átomo doador**. O semicondutor dopado com átomos doadores é do **tipo-N**.



O número de elétrons de condução acrescentado ao cristal semicondutor intrínseco pode ser cuidadosamente controlado pelo número de átomos de impureza (doadores) introduzido. É importante notar que um elétron de condução criado através de dopagem não deixa nenhuma lacuna na banda de valência.

## *Portadores majoritários e minoritários*

Em um material dopado com átomos doadores, há um excesso de elétrons e por isso mesmo o material passa a ser chamado do tipo-N. Neste caso, podemos considerar que a corrente elétrica seja devida principalmente à existência destes elétrons livres e é por esta razão que em um material do tipo-N os elétrons são chamados de **portadores majoritários**.

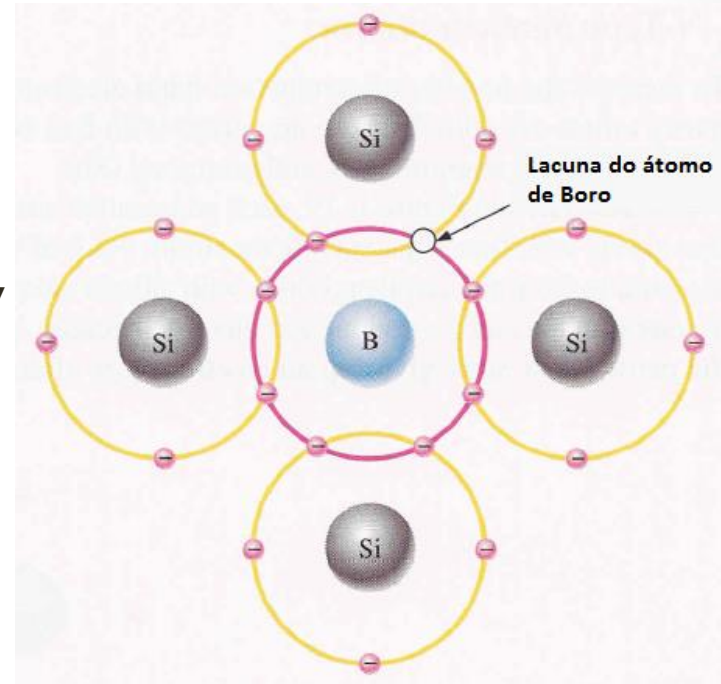
Mesmo em um material dopado do tipo-N, existem lacunas que surgem com a geração de pares elétron-lacuna devida à energia térmica. Estas lacunas, que não resultam da adição de elétrons pentavalentes, também participam da condução de corrente elétrica, mas em menor proporção. Por isso, são chamadas de **portadores minoritários**.

# Semicondutor do tipo-P

Para aumentar o número de lacunas no Silício intrínseco, são adicionados a este cristal átomos de elementos trivalentes, ou seja, que tenham três elétrons em sua camada de valência, tais como os átomos de Boro (B), Índio (In) e Gálio (Ga).

Conforme ilustra a figura ao lado, cada átomo trivalente (neste caso, Boro) que substitui um átomo de Silício, forma ligações covalentes com os quatro átomos de Silício vizinhos. Mas, como são necessários quatro elétrons e o átomo de impureza só tem três, o resultado é o surgimento de uma lacuna.

Como o átomo trivalente recebe um elétron para completar os oito elétrons da camada de valência, é chamado de **átomo aceitador**. O semicondutor dopado com átomos aceitadores é do **tipo-P**.



- 1-Defina DOPAGEM.
- 2-Qual é a diferença entre um átomo pentavalente e um átomo trivalente?
- 3-Que outros nomes são dados a estes átomos?
- 4-Como se forma um semicondutor do tipo-N? E do tipo-P?
- 5-Qual é o portador majoritário em um semicondutor do tipo-N?
- 6-Qual é o portador minoritário em um semicondutor do tipo-P?
- 7-Através de que processo se formam os portadores minoritários?
- 8-Através de que processo se formam os portadores majoritários?
- 9-Qual é a diferença entre um semicondutor extrínseco e um intrínseco?

# Propriedades do Silício

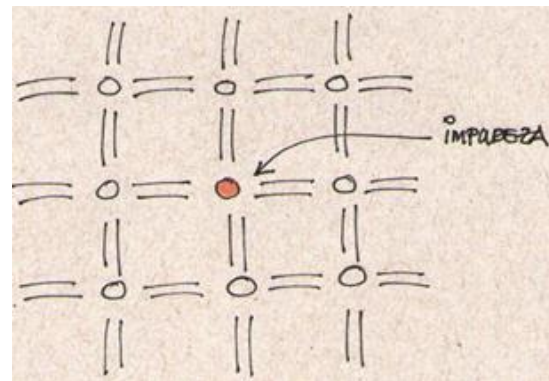
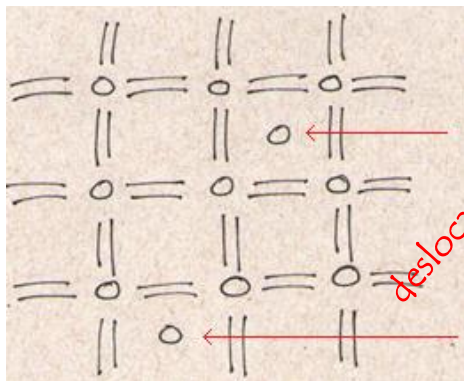
A concentração de átomos em um cristal de silício é de aproximadamente  **$5 \times 10^{22}$**  átomos por centímetro cúbico.

Como cada átomo é eletricamente neutro, o cristal como um todo é eletricamente neutro.

O monocristal de Silício com uma estrutura de rede regular, tal como considerado até aqui, é um cristal ideal. Um cristal de Silício “natural” tem imperfeições e estas imperfeições podem alterar as propriedades elétricas do cristal.

As duas principais imperfeições que podem alterar as características elétricas do Silício são os Deslocamentos e Impurezas. Um **deslocamento** se caracteriza pela ausência de um ou mais átomos nas posições que ocupam na rede cristalina ou pela presença de átomos em posições intersticiais.

Uma **impureza** é um átomo de um material diferente presente no cristal.





# Propriedades do Silício

O processo através do qual a **agitação térmica** cria um elétron livre e uma lacuna, chama-se ionização, conforme já visto. A taxa com que ocorre esta geração é fortemente dependente da temperatura  $T$  e pode ser simbolicamente expressa como:

$$\text{Taxa de Ionização} = I = I(T)$$

Considerando que os elétrons e as lacunas são geradas em pares por meio deste processo, suas concentrações estão assim relacionadas:

$$n = p = n_i$$

Onde  $n$  é o número de elétrons livres por unidade de volume,  $p$  é o número de lacunas por unidade de volume e  $n_i$  representa o número de lacunas ou de elétrons por unidade de volume em um cristal intrínseco:

Os elétrons livres e as lacunas geradas pela agitação térmica se movem aleatoriamente pelo cristal em decorrência da própria energia térmica e de colisões com outras partículas.

Se neste movimento aleatório, um elétron e uma lacuna se aproximarem, pode ocorrer que este elétron livre ocupe a ligação covalente (vazia) representada pela lacuna. Com esta recombinação, desaparecem os dois portadores de carga.



# Propriedades do Silício

No processo de recombinação, tanto a energia como o momento (quantidade de movimento) são conservados. Um estudo mais detalhado mostra que, devido a isto, a probabilidade de ocorrência de uma recombinação é baixa em regiões onde a estrutura cristalina é perfeita! A probabilidade de ocorrência de uma recombinação é mais alta nas regiões onde existem imperfeições (deslocamentos e impurezas). Estas imperfeições são por isto chamadas de centros de recombinação.

Átomos de Ouro são impurezas particularmente eficientes em promover recombinações em cristais de Silício.

A superfície de um cristal é uma região de imperfeições, pois não existem átomos fora do cristal para formar ligações covalentes com os átomos que fazem parte da superfície! Consequentemente, a taxa de recombinação na superfície do cristal é alta.

# Propriedades do Silício

Quando a concentração de elétrons livres e lacunas não é muito alta, a taxa de recombinação é proporcional ao número de portadores disponíveis para recombinar, e pode ser expressa como:

$$\text{Taxa de Recombinação: } R \propto pn \Rightarrow R = \alpha n_i^2$$

Onde  $\alpha$  é uma constante que leva em conta o material (tipo do cristal):

A agitação térmica faz com que a concentração de elétrons livres e lacunas aumente até que se iguale à taxa de recombinação (equilíbrio térmico). Portanto, em equilíbrio:

$$I(T) = R = \alpha n_i^2$$

A condição de equilíbrio depende fortemente da temperatura e pode ser representada pela relação:

$$n_i^2 = KT^3 \exp\left(\frac{-qV_g}{kT}\right)$$

T=temperatura absoluta (Kelvin)

q=carga do elétron

V<sub>g</sub>=tensão equivalente à energia da banda proibida

k=constante de Boltzmann

$$K \approx 1,03 \times 10^{31}$$

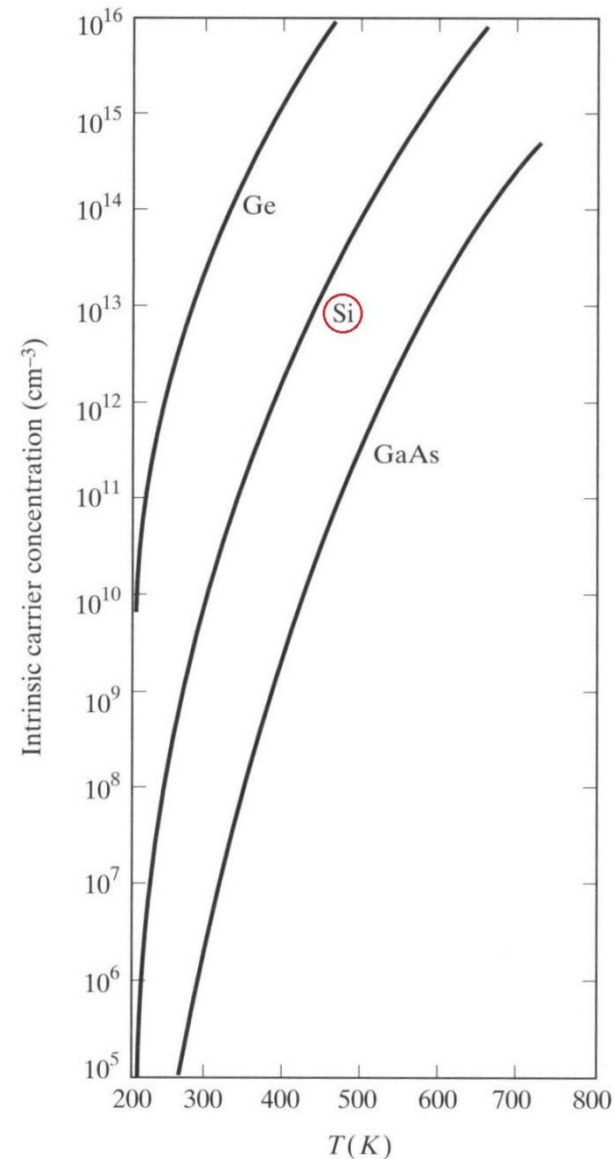
Considerando que a energia da banda proibida do Silício é  $E_g=1.1\text{eV}$ , podemos calcular o número de portadores no cristal intrínseco à temperatura de  $27^\circ\text{C}$ .

$$n_i^2 = KT^3 \exp\left(\frac{-qV_g}{kT}\right)$$

$$ni \approx 3.2 \times 10^{15} T^{\frac{3}{2}} \exp\left(\frac{-6346}{T}\right) \approx 1.0 \times 10^{10} / \text{cm}^3$$

Como a concentração de átomos no cristal de Silício é de aproximadamente  $5 \times 10^{22}/\text{cm}^3$ , o resultado acima mostra que apenas um em  $10^{13}$  átomos está ionizado na temperatura ambiente.

O gráfico ao lado mostra a concentração de portadores intrínsecos do Silício em função da temperatura.



# Movimentação dos portadores no cristal

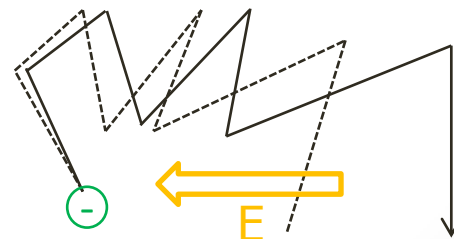
Os portadores livres em um cristal estão sujeitos às forças que as partículas (outras cargas) próximas exercem tornando a dinâmica do movimento destes portadores um fenômeno bastante complexo.

Este problema é agravado pelo fato de que, em escala atômica, os movimentos dos portadores estão sujeitos a leis e restrições que não são evidentes nas medições em escalas usuais de laboratórios e que não estão incluídas na mecânica clássica (newtoniana). Estes fenômenos em escala atômica são explicados através da mecânica quântica. Mesmo assim, podemos, de forma bem simplificada, considerar que a movimentação se dá da seguinte maneira:

Há dois mecanismos por meio dos quais elétrons e lacunas se movem no cristal. Um destes mecanismos, chamado **difusão**, está associado à movimentação aleatória devida à energia térmica. O outro chamado, **deriva**, é uma movimentação que resulta da aplicação de um campo elétrico.



*difusão*



*deriva*

Sem a aplicação de um campo elétrico, portanto, considerando somente o movimento de difusão, a distância média entre colisões, chamada de **caminho livre médio** entre partículas, na temperatura ambiente, é de aproximadamente 0,1um.

$$mfp \approx 0.1um \approx 1000 \text{ distâncias interatômicas}$$

O valor eficaz (RMS) da velocidade de um portador na temperatura ambiente é dado por:

$$v_T \approx 10^7 \text{ cm} / \text{s}$$

Considerando os valores de caminho livre médio e de velocidade, o tempo médio entre colisões será:

$$mft \approx 10^{-12} \text{ s}$$

Portanto, em média, as partículas se movem com uma velocidade muito alta e colidem entre si numa taxa muito alta.

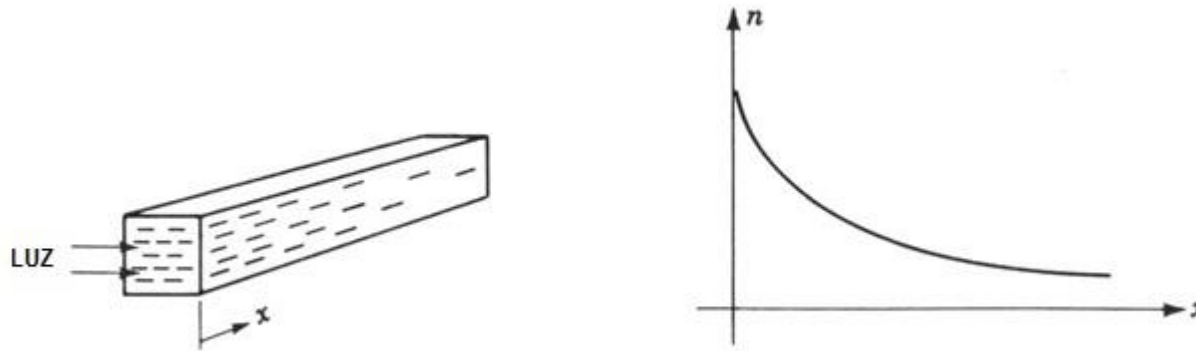
Quando a concentração de portadores livres (elétrons ou lacunas) é uniforme em todo o cristal, o fluxo resultante de elétrons é nulo. A probabilidade de haver um elétron se movendo da esquerda para a direita é a mesma de haver um elétron se movendo na direção contrária!

No entanto, quando a concentração de portadores livres (elétrons ou lacunas) não é uniforme, a agitação térmica aleatória faz com que haja um fluxo resultante das regiões de maior concentração para as de menor concentrações. Este tipo de fluxo (mecanismo de movimentação), chamado de difusão, pode ser observado quando pingamos uma gota de tinta em um copo d'água.



*Ilustração do mecanismo de difusão*

Outro exemplo deste mecanismo de movimentação (difusão) é mostrado na figura abaixo: uma barra de material semiconductor intrínseco está exposta a uma fonte de luz em uma das suas extremidades.



A luz ioniza os átomos do semiconductor na extremidade em que incide, aumentando a concentração de elétrons livres nesta região. Assume-se, neste caso, que o comprimento da barra é suficientemente grande para considerar que a concentração de elétrons na extremidade oposta é igual à do equilíbrio térmico. Assim, a concentração de elétrons varia com o comprimento da barra, conforme mostra o gráfico acima à direita.

Consideremos, agora, uma secção no meio da barra perpendicular ao eixo- $x$ . Há mais elétrons à esquerda deste plano do que à direita. Portanto, o movimento aleatório faz com que mais elétrons atravesse este plano indo da esquerda para a direita do que no sentido contrário. Ou seja, há um fluxo resultante de elétrons no sentido da região de maior concentração para a de menor concentração.



Quando a luz é desligada, este fluxo de elétrons por difusão continua até que a concentração de elétrons se torne uniforme em toda a barra. Como os portadores se deslocam com velocidade aproximada de  $10^7$  cm/s, o retorno ao equilíbrio ao equilíbrio é extremamente rápido.

Em condições de desequilíbrio, o fluxo resultante de portadores em qualquer ponto está relacionado com o gradiente (ou inclinação) da curva de distribuição de portadores mostrada anteriormente.

Quando a concentração de elétrons varia somente na direção  $x$ , sendo constante nas direções  $y$  e  $z$ , então a corrente devida à difusão de elétrons através de qualquer plano perpendicular ao eixo- $x$  é dada por:

$$I_n = qAD_n \frac{dn}{dx}$$

Onde:

$I_n$  = corrente de elétrons na direção- $x$

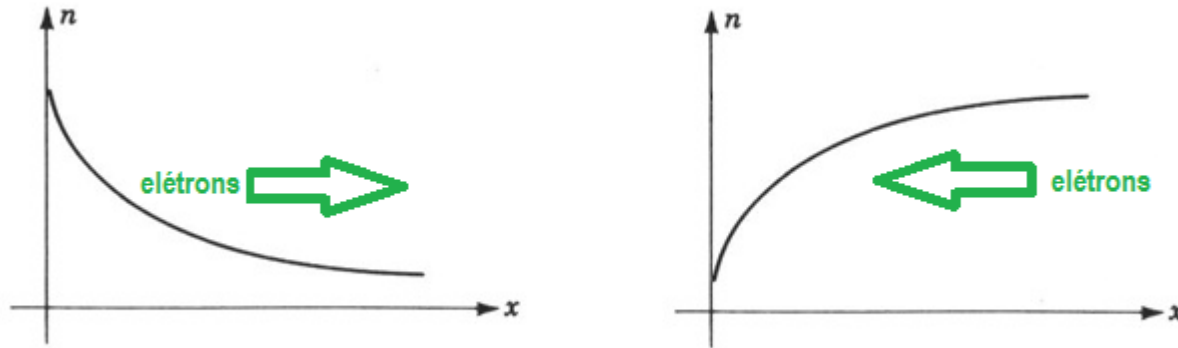
$q$  = carga do elétron

$A$  = área da secção (plano perpendicular ao fluxo)

$D_n$  = Constante de difusão para elétrons

$n=n(x)$  = função concentração de elétrons

Observe que se a derivada  $dn/dx$  é positiva, os elétrons se movem por difusão na direção contrária do eixo-x.



O mesmo conceito e equacionamento se aplicam para as lacunas. No entanto, considerando que elétrons e lacunas têm cargas opostas, na equação da corrente de difusão das lacunas deve ser acrescentado o sinal de menos.

$$I_p = -qAD_p \frac{dp}{dx}$$

Onde:

$I_p$  = corrente de lacunas na direção-x

As constantes de difusão do elétron e da lacuna são diferentes e têm os seguintes valores:

$$D_n = 36 \text{ cm}^2 / \text{s}$$

$$D_p = 13 \text{ cm}^2 / \text{s}$$

Quando o cristal é submetido a um campo elétrico, as lacunas e os elétrons livres continuam se movimentando de forma aleatória, mantendo o mesmo caminho livre médio e mesmo tempo médio entre colisões, da mesma forma como ocorre quando não há campo elétrico. No entanto, entre colisões, as partículas ganham uma pequena velocidade de deriva e uma certa energia cinética do campo.

Em cada colisão, os portadores perdem um pouco da energia cinética e, com o choque, se espalham em direções aleatórias. A velocidade de deriva aumenta, em média, até o ponto em que a energia ganha do campo elétrico seja perdida nas colisões. Assim, alcançam, uma velocidade final em que ocorre o equilíbrio, mesmo com um campo elétrico aplicado.

A velocidade de deriva de equilíbrio é diretamente proporcional à força do campo elétrico aplicado. Além disto, a velocidade de deriva é normalmente muito menor que a velocidade da agitação térmica, de tal modo que a movimentação aleatória não se altera com a existência do campo.

A velocidade de deriva das lacunas na direção (positiva) do eixo-x é:

$$v_{dp} = -\mu_p \frac{dV}{dx}$$

Onde  $\mu_p$  é uma constante de proporcionalidade chamada **mobilidade da lacuna**, e  $V=V(x)$  é o potencial elétrico no ponto (distância) x:

Portanto, a **corrente de deriva de lacunas** através de uma secção de área  $A$  é dada por:

$$I_{dp} = qpAv_{dp} = -qpA\mu_p \frac{dV}{dx}$$

Lembrando que:

$q$  = carga do elétron

$p$  = concentração de lacunas

$A$  = área da secção

$\mu_p$  = mobilidade da lacuna

Igualmente, temos que a **corrente de deriva de elétrons** é dada por:.

$$I_{dn} = qnAv_{dn} = qnA\mu_n \frac{dV}{dx}$$

Onde  $\mu_n$  é a mobilidade do elétron.

Na temperatura ambiente, as mobilidades de elétrons e lacunas são:

$$\mu_n = 1400 \frac{cm^2}{V \cdot s}$$

$$\mu_p = 500 \frac{cm^2}{V \cdot s}$$

A soma das componentes da corrente de deriva devidas a elétrons e lacunas, considerando o sentido do movimento das lacunas como sendo o sentido da corrente elétrica, resulta na corrente total de deriva, que é dada por:

$$I_d = I_{dp} + I_{dn} = -qA(p\mu_p + n\mu_n)\frac{dV}{dx}$$

Esta equação é uma das formas da lei de Ohm, e pode ser reescrita como:

$$\frac{I_d}{-A\frac{dV}{dx}} = q(p\mu_p + n\mu_n)$$

O primeiro termo da equação corresponde à razão entre a densidade de corrente e a variação do potencial. Ou seja, a **condutividade do material**. Logo:

$$\sigma = q(p\mu_p + n\mu_n)$$

Tendo em vista que a condutividade ( $\sigma$ ) é o inverso da resistividade ( $\rho$ ), a equação pode ser escrita como:

$$\rho = \frac{1}{q(p\mu_p + n\mu_n)}$$

Sabemos que um material do tipo-P consiste em átomos de Silício e átomos de impurezas, tais como Boro, que acrescentam lacunas ao cristal quando substituem átomos de Silício.

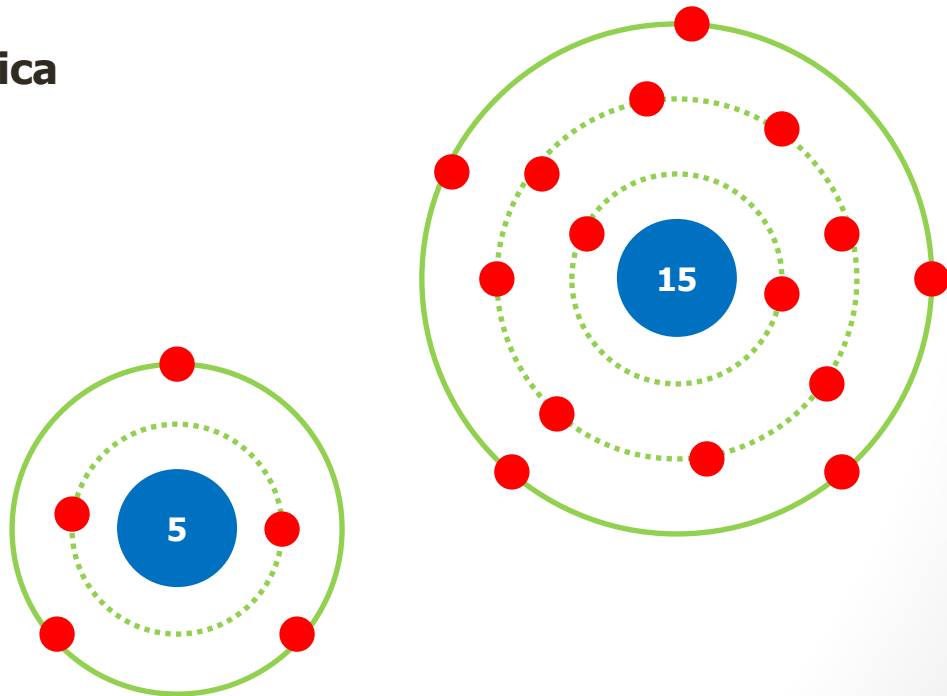
Já um material do tipo-N consiste em átomos de Silício e átomos pentavalentes, tais como Fósforo, que acrescentam elétrons ao cristal quando substituem átomos de Silício.

## Semicondutores na Tabela periódica

	IIIA	IVA	VA	VIA
	5 <b>B</b> Boron 10.811	6 <b>C</b> Carbon 12.0107	7 <b>N</b> Nitrogen 14.00674	8 <b>O</b> Oxygen 15.9994
12 IIB	13 <b>Al</b> Aluminum 26.981538	14 <b>Si</b> Silicon 28.0855	15 <b>P</b> Phosphorus 30.973761	16 <b>S</b> Sulfur 32.065
	30 <b>Zn</b> Zinc 65.409	31 <b>Ga</b> Gallium 69.723	32 <b>Ge</b> Germanium 72.64	33 <b>As</b> Arsenic 74.92160
	48 <b>Cd</b> Cadmium 112.411	49 <b>In</b> Indium 114.818	50 <b>Sn</b> Tin 118.710	51 <b>Sb</b> Antimony 121.760
	80 <b>Hg</b> Mercury 200.59	81 <b>Tl</b> Thallium 204.3833	82 <b>Pb</b> Lead 207.2	83 <b>Bi</b> Bismuth 208.98038
				84 <b>Po</b> Polonium (209)

### Fósforo

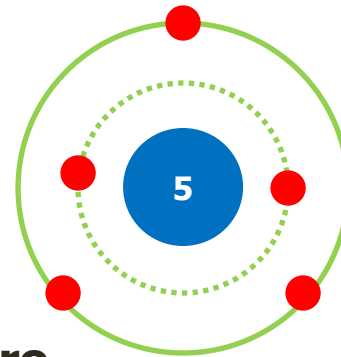
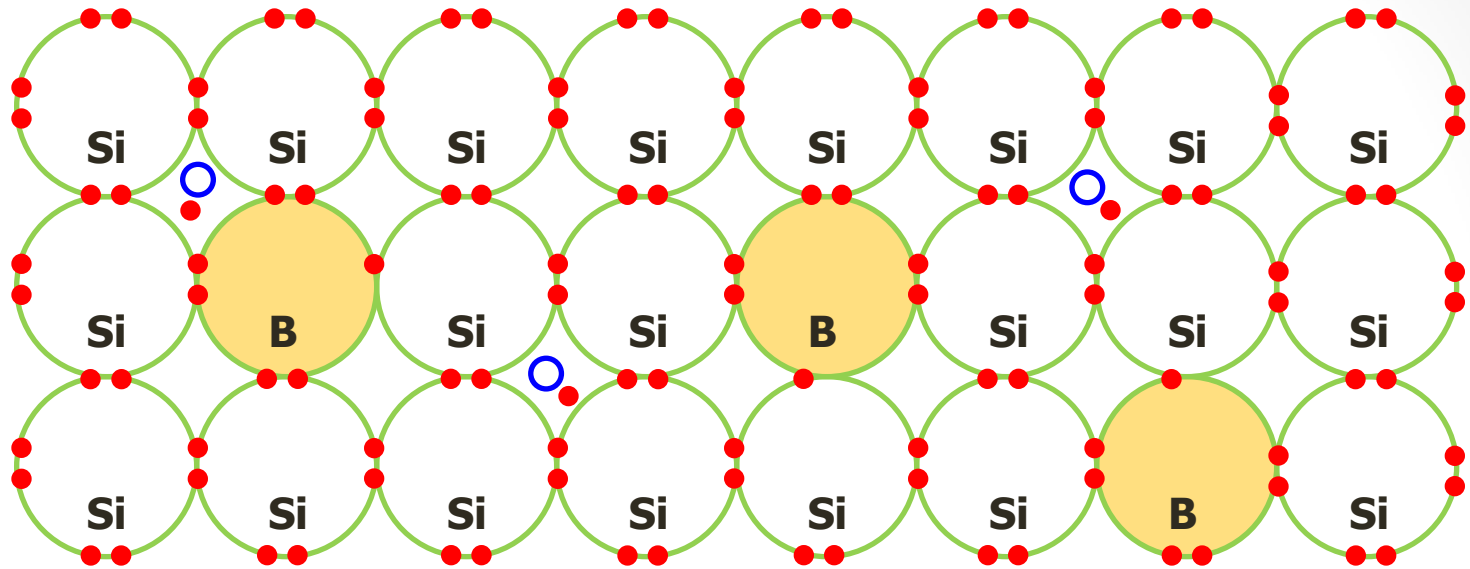
5 elétrons na camada de valência



### Boro

3 elétrons na camada de valência

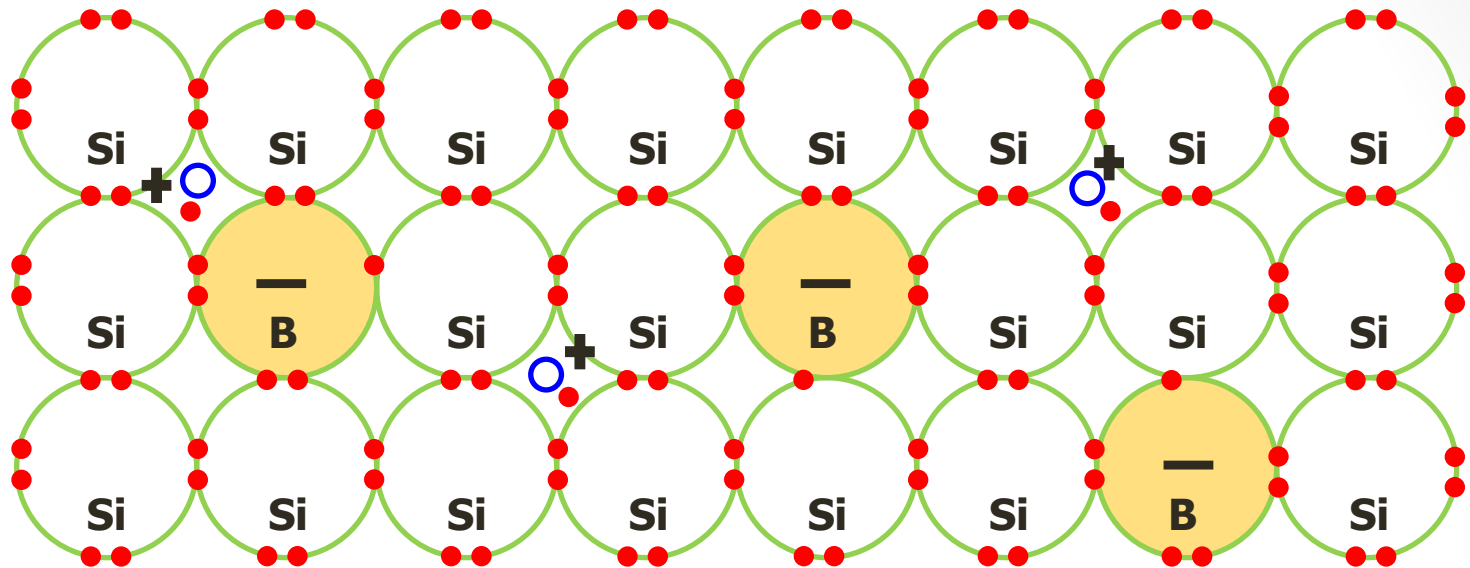
# Dopagem-P



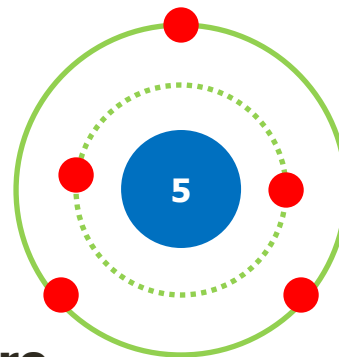
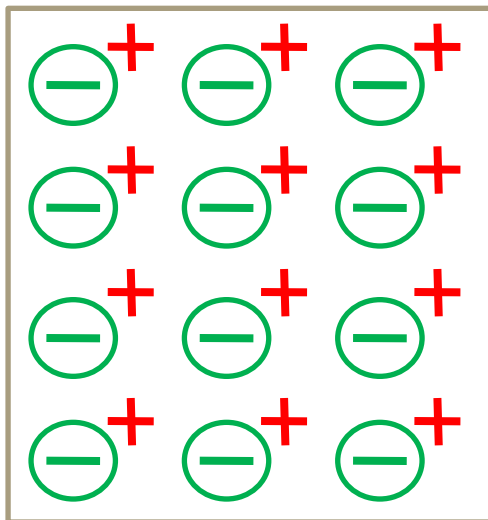
**Boro**  
3 elétrons na camada de valência



# Dopagem-P



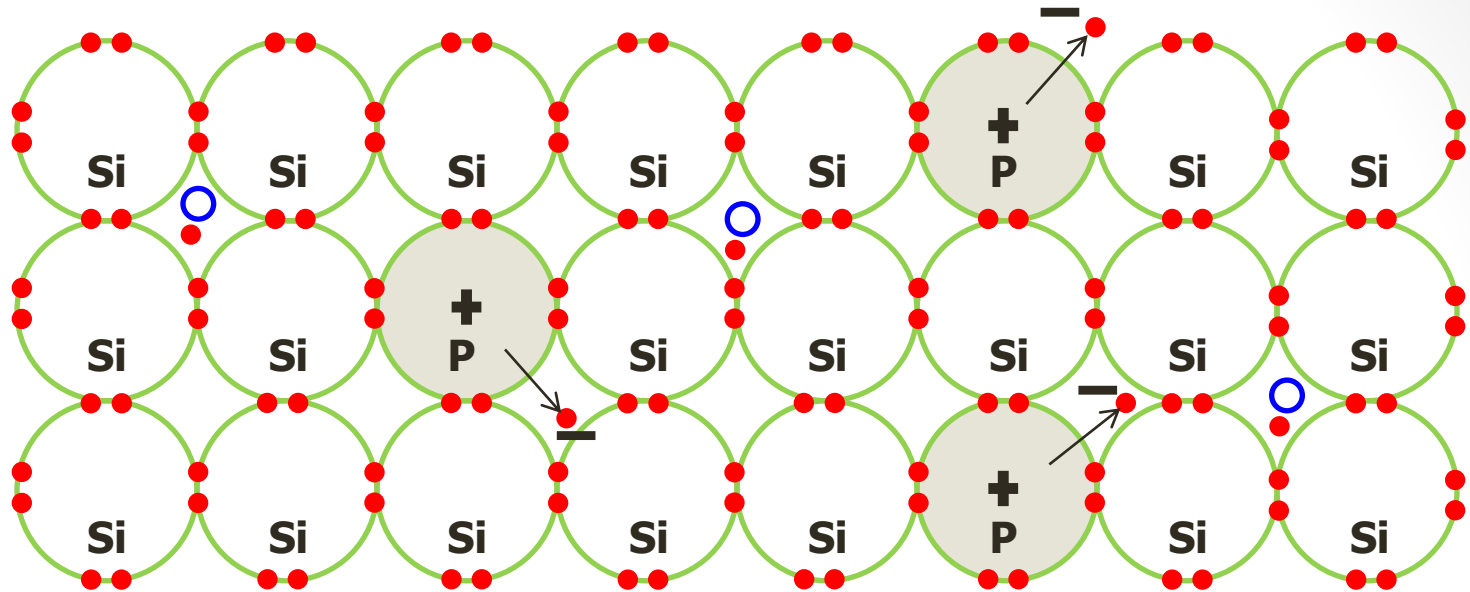
Tipo **P**



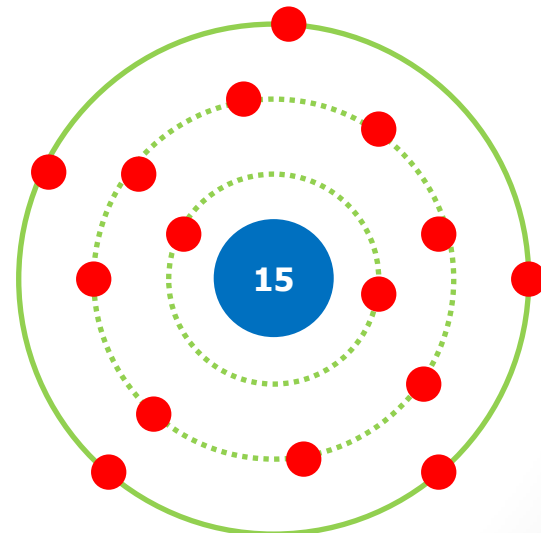
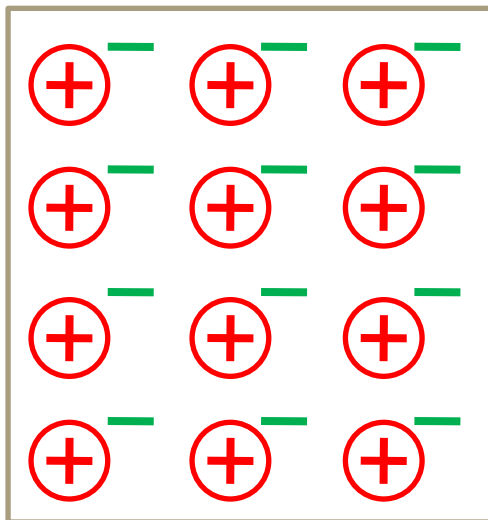
**Boro**

3 elétrons na camada de valência

# Dopagem-N



Tipo **N**



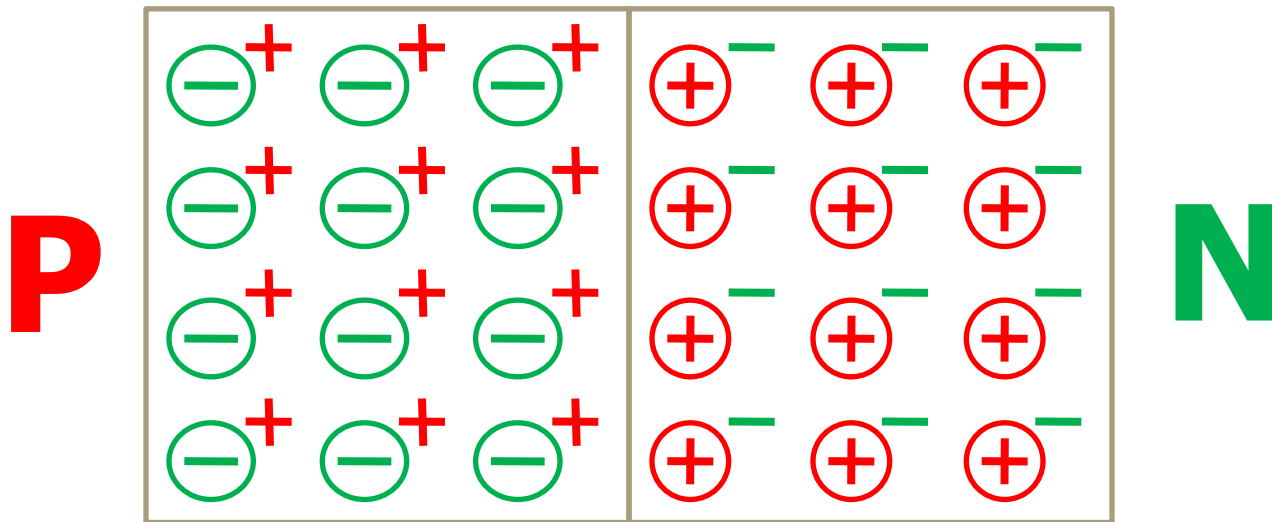
**Fósforo**

5 elétrons na camada de valência

# Junção P-N

Se um pedaço de Silício intrínseco é dopado de tal forma que em um lado se forma uma região do tipo-N e outra do tipo-P, na fronteira entre estas regiões temos uma junção P-N.

A região P tem lacunas livres em abundância, sendo portanto os portadores majoritários, enquanto na região N os portadores majoritários são os elétrons.



Os elétrons livres da região-N se movem de forma aleatória em todas as direções. No instante em que a junção P-N é formada, os elétrons livres próximos da junção se difundem (devido ao gradiente de concentração) em direção à região-P onde se recombina com as lacunas que se encontram próximas da junção.

Para cada elétron que migra da região-N para a região-P, uma carga positiva (átomo doador ionizado) é criada nesta região. De forma semelhante, quando uma lacuna livre na região-P se recombina com um elétron, uma carga negativa (átomo aceitador ionizado) é criada na região-P.

A carga positiva fixa em um lado e a carga negativa fixa do lado oposto da junção estabelecem um campo elétrico que aponta do maior potencial (carga positiva) para o menor potencial (carga negativa). Este campo elétrico exerce uma força sobre os elétrons livres, no sentido contrário à migração deles da região-N para a região-P. Ou seja, cada vez que um par de cargas fixas opostas é criado, torna-se mais difícil a migração de um elétron para criar um outro par.

A migração de elétrons atinge uma condição de equilíbrio quando a quantidade de cargas fixas (átomos ionizados) de um lado e do outro é tal que o campo elétrico formado impede a migração de elétrons.

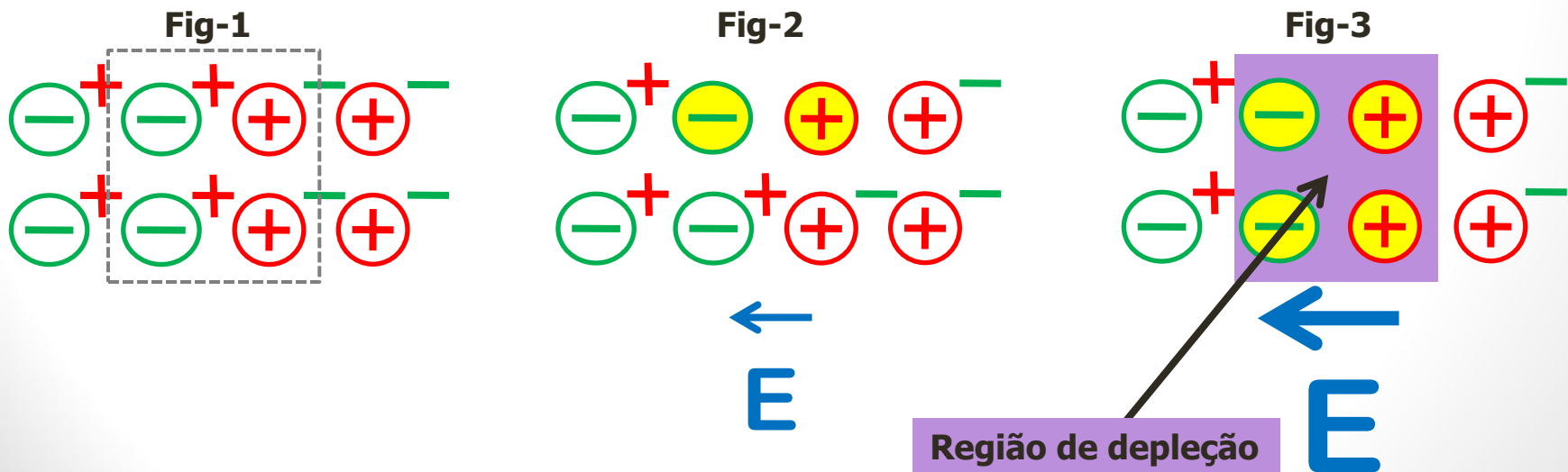
Na fronteira das duas regiões praticamente não existem cargas livres, sendo chamada, por isto, **de região de depleção**.

# Resumo do que ocorre quando se forma a junção PN

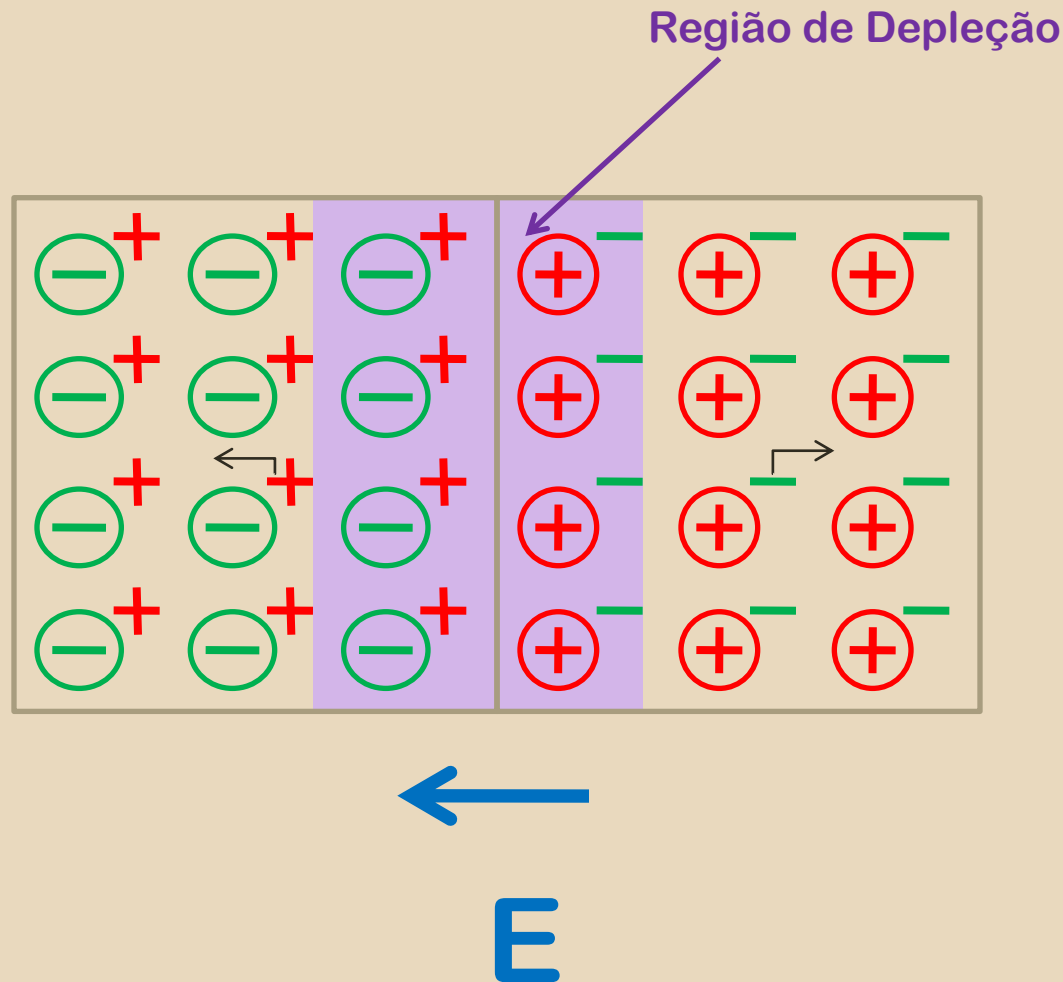
Para entender o que ocorre no instante em que os materiais P e N se juntam, considere os quatro átomos centrais da fig-1, dois da impureza doadora (contribui com um elétron livre) e dois da impureza aceitadora (contribui com uma lacuna livre).

Ao se aproximarem, imaginemos que um dos elétrons se recombine com uma das lacunas (Fig-2). Com consequência disto, surge de um lado uma carga fixa positiva e do outro uma carga negativa. Estas duas cargas opostas formam um campo elétrico que atuará nas cargas livres (elétrons e lacunas) dificultando suas recombinações.

Apesar da dificuldade de aproximação, devida ao campo elétrico, o outro elétron se recombina com a outra lacuna (Fig-3). Assim, formam-se na junção camadas de cargas fixas com polaridades opostas, gerando um campo elétrico que impede a continuidade do processo de recombinação a partir de um ponto.



# Animação: formação da região de depleção



# Barreira de potencial

Quando duas cargas opostas se encontram próximas uma da outra, existe uma força atuando sobre elas, tal como prevê a lei de Coulomb.

Na região de depleção há um grande número de cargas positivas e negativas respectivamente concentradas em lados opostos da junção. As forças entre estas cargas opostas formam um "campo de força" (campo elétrico) que constitui uma barreira para a passagem dos elétrons da região-N para a região-P. Para que um elétron livre ultrapasse esta barreira é necessária a aplicação de energia externa na região de depleção.

A diferença de potencial do campo elétrico formado na região de depleção corresponde à tensão que deve ser aplicada externamente para mover elétrons através desta região. Esta diferença de potencial é chamada de **Barreira de Potencial** e é expressa em Volts.

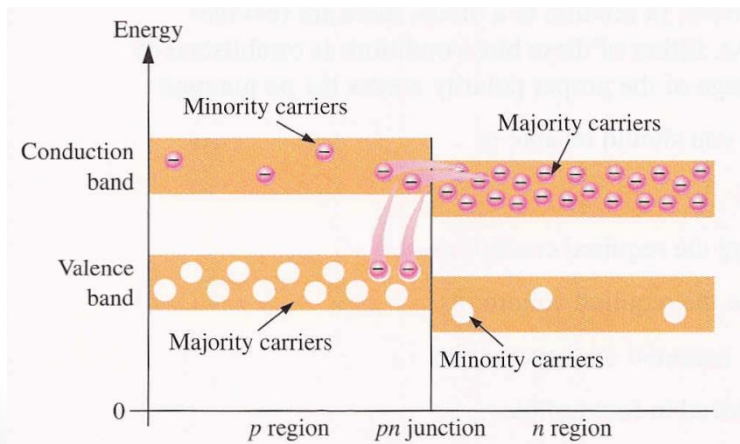
A barreira de potencial de uma junção PN depende de diversos fatores, dentre os quais o tipo do material semicondutor, a concentração de impurezas e a temperatura. A barreira de potencial típica para o Silício é de aproximadamente 700mV e para o Germânio é de 300mV na temperatura ambiente (27°C).



# Diagrama de energia da junção PN

Os níveis médios de energia das bandas de valência e de condução de um material do tipo-N são um pouco mais baixos que os correspondentes níveis de um material do tipo-P. Isto se deve ao deslocamento dos elétrons dos átomos doadores para a banda de condução que assim resulta no seu deslocamento para baixo. Na região P, o aumento de lacunas na banda de valência motiva a perda de elétrons dos sub-níveis inferiores da banda de condução, causando o seu deslocamento no sentido oposto.

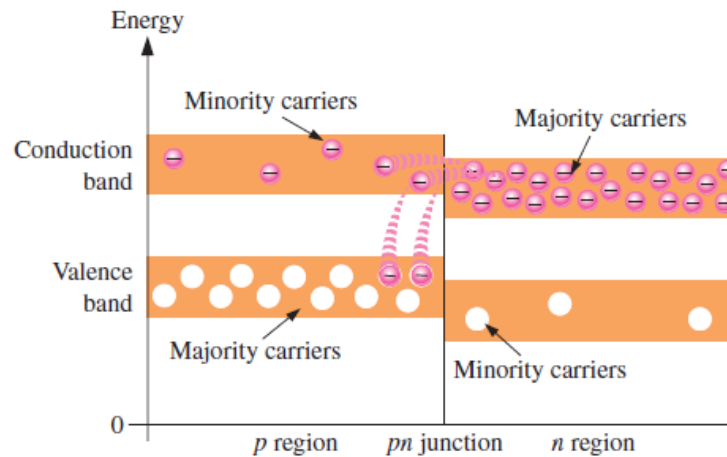
O diagrama de energia de uma junção PN no instante da formação da junção é mostrado na figura abaixo. Como pode ser visto, as bandas de valência e de condução na região-N estão um pouco abaixo das correspondentes bandas na região-P, mas ainda com uma faixa significativa de níveis coincidentes.



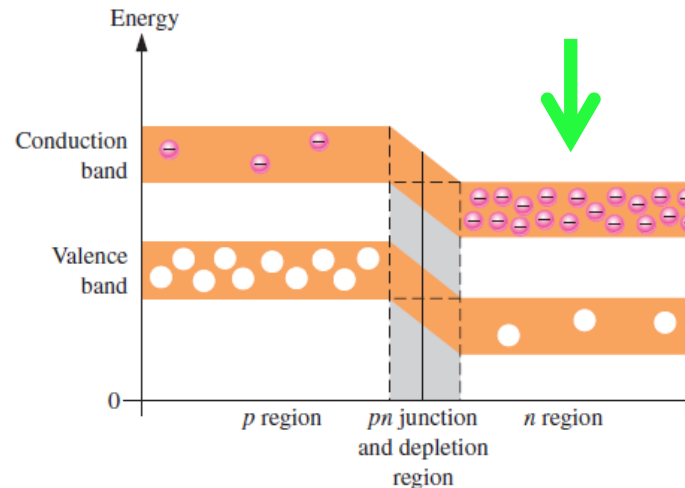
No momento da formação da junção

Os elétrons livres na região-N que ocupam a parte superior da banda de condução podem facilmente difundir através da junção (eles não precisam ganhar mais energia para isto) e temporariamente se tornam elétrons livres na parte mais baixa da banda de condução da região-P.

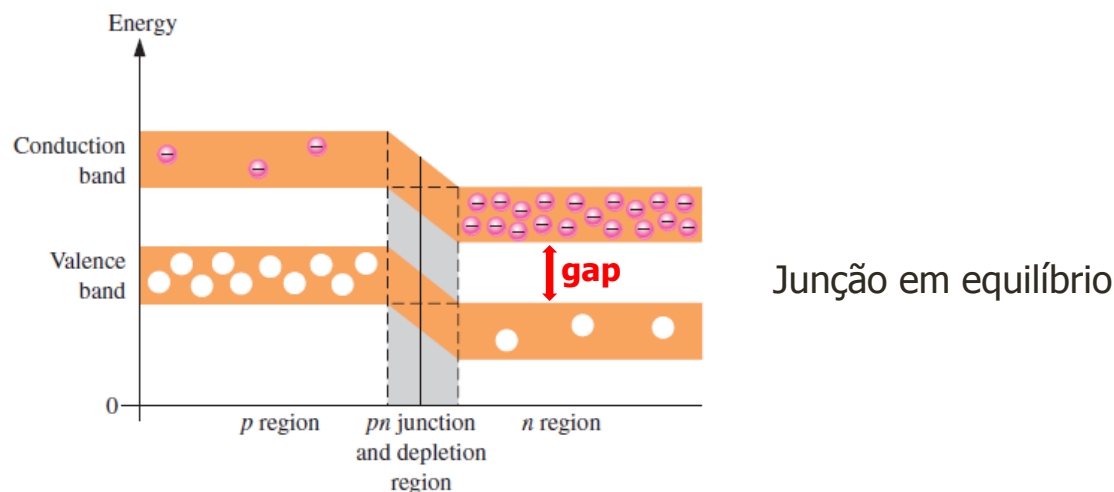
Depois que cruzam a junção, os elétrons rapidamente perdem energia e se recombinam com lacunas da banda de valência da região-P.



Com a continuação da difusão de elétrons, a região de depleção começa a se formar e o nível médio de energia da banda de condução da região-N diminui. Esta diminuição do nível médio de energia da banda de condução na região-N é devida à perda dos elétrons com mais energia que migraram para a região-P.



Com o passar do tempo, não sobram elétrons na banda de condução da região-N com energia suficiente para atravessar a junção, conforme indica a figura abaixo: o nível mais alto de energia na banda de condução da região-N está praticamente abaixo do nível mais baixo de energia da banda de condução da região-P. Quando isto ocorre, a junção entra em equilíbrio.



Existe um gradiente de energia através da região de depleção que atua como uma barreira de energia que um elétron livre da região deve vencer para chegar à região-P.

Observe que a medida que o nível de energia da banda de condução desce, o nível de energia da banda de valência também desce. Ou seja, permanece inalterado o gap de energia entre a banda de valência e a banda de condução.

1-O que é uma junção PN?.

2-Explique o que é difusão.

3-Descreva uma região de depleção.

4-Explique o que é a barreira de potencial e como ela é criada.

5-Qual é a amplitude da barreira de potencial de uma junção PN de Silício?

6-Qual é a amplitude da barreira de potencial de uma junção PN de Germânio?

7-Com base no diagrama de energia, explique como ocorre o equilíbrio da junção.

### Exercício:

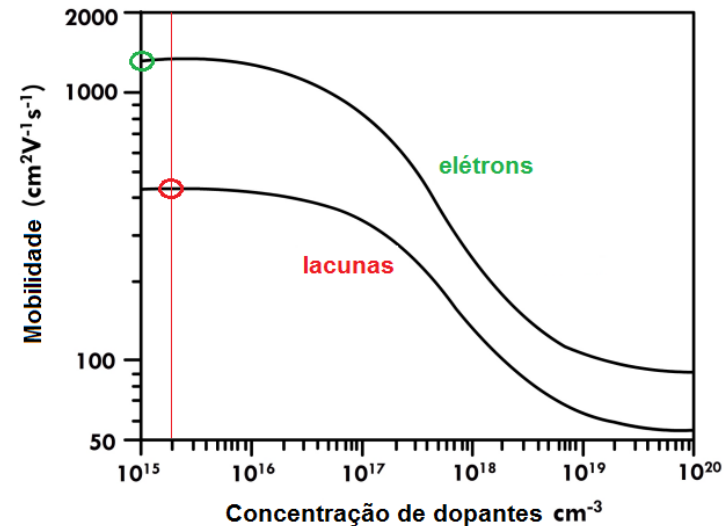
Um pedaço de Silício está dopado com  $N_a = 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  e  $N_d = 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ .

- Qual é o portador majoritário?
- Trata-se de silício do tipo N ou P?
- Determine a concentração de impurezas e as mobilidades de elétrons e lacunas em  $T = 300\text{K}$ .
- Qual deve ser a dopagem adicional para que a concentração de elétrons seja  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ?

a) Como  $N_a > N_d$ , o portador majoritário é LACUNA.

b) Silício do tipo-P.

c) A concentração de impurezas é  $N_a + N_d = 3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ . As mobilidades de elétrons e lacunas são, respectivamente,  $\mu_n = 1300 \text{ cm}^2 (\text{Vs})^{-1}$  e  $\mu_p = 475 \text{ cm}^2 (\text{Vs})^{-1}$ , conforme o gráfico ao lado.



d) A dopagem desejada é  $N'_d - N_a = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} = N_d(\text{atual}) + N_d(\text{adicional}) - N_a$   
Logo,  $N_d(\text{adicional}) = 1 \times 10^{17} - 1 \times 10^{15} + 2 \times 10^{15} = 1,01 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

### Exercício:

Quais são as concentrações de elétrons e lacunas em um semiconductor com dopagens  $N_a$  e  $N_d$ ?

Existem quatro tipos de cargas em um semiconductor: Elétrons, lacunas, átomos doadores e átomos aceitadores. As concentrações destas cargas são representadas por  $n$ ,  $p$ ,  $N_d$  e  $N_a$ . Em geral, todas as amostras dos semicondutores são livres de cargas líquidas (eletricamente neutros). Isto significa que a densidade de partículas negativas é igual à de partículas positivas:

$$n + N_a = p + N_d$$

Sabemos, também, que  $n \times p = ni^2$

Com base nestas duas expressões, chegamos às relações:

$$n = \frac{N_d - N_a}{2} + \left[ \left( \frac{N_d - N_a}{2} \right)^2 + ni^2 \right]^{1/2}$$

$$p = \frac{N_a - N_d}{2} + \left[ \left( \frac{N_a - N_d}{2} \right)^2 + ni^2 \right]^{1/2}$$

### Exercício:

Um pedaço de Silício está dopado com  $N_d = 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ . Determine a concentração de lacunas nas temperaturas a)  $T = 300\text{K}$ , b)  $T = 1150\text{K}$  e c)  $T = 600\text{K}$ .

a) Em  $T = 300\text{K}$ , a concentração intrínseca é:  $n_i = 1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

Como  $N_d \gg n_i \Rightarrow n \approx N_d$

$$\text{Sabendo que: } n \times p = n_i^2 \Rightarrow p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{1 \times 10^{20}}{1 \times 10^{15}} = 1 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$$

b) Em  $T = 1150\text{K}$ , sabendo que,  $n_i^2 = KT^3 \exp\left(\frac{-qV_g}{kT}\right)$  temos que,  $n_i = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

Nesta condição,  $N_d \ll n_i \Rightarrow n \approx n_i$

$$\text{Portanto: } p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{1 \times 10^{34}}{1 \times 10^{17}} = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

c) Em  $T = 600\text{K}$ :

$$n = \frac{N_d - N_a}{2} + \left[ \left( \frac{N_d - N_a}{2} \right)^2 + n_i^2 \right]^{1/2} \Rightarrow n = \frac{N_d}{2} + \frac{N_d}{2} \sqrt{1 + \frac{4n_i^2}{N_d^2}} = 1,62 \times 10^{15}$$

$$\therefore p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{1 \times 10^{20}}{1 \times 10^{15}} = 6,18 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$