

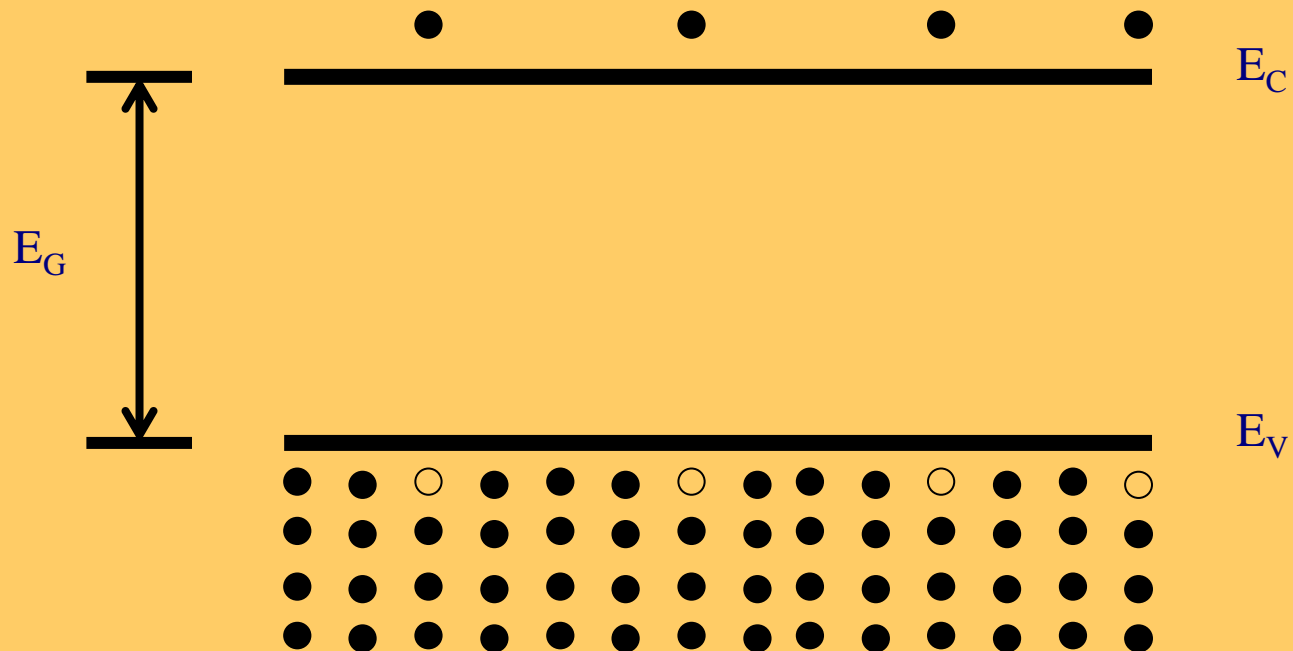
AULA 7

Fundamentos de Semicondutores

Como já discutido nas aulas anteriores, as duas bandas que desempenham um papel importante na condução eletrônica são as bandas de valência e de condução. Separando as duas bandas de energia permitidas existe um intervalo de energias proibidas, chamadas de *banda proibida* (“**energy gap**”).

Condução eletrônica somente é possível quando tanto elétrons como lacunas (estados vazios) estão disponíveis na mesma banda. Na temperatura do zero absoluto há elétrons mas nenhuma lacuna na banda de valência, e há lacunas mas nenhum elétron na banda de condução.

A temperaturas finitas, elétrons são excitados termicamente a partir da banda de valência para a banda de condução, fazendo elétrons disponíveis na banda de condução e criando estados de lacuna na banda de valência.



Cálculos do fluxo de corrente elétrica em semicondutores devem considerar o movimento de dois tipos de portadores: elétrons e lacunas.

Portadores carregados em semicondutores

Quando a temperatura de um semicondutor é elevada além de 0 Kelvin, alguns elétrons na banda de valência podem receber energia térmica suficiente para atingir a banda de condução.

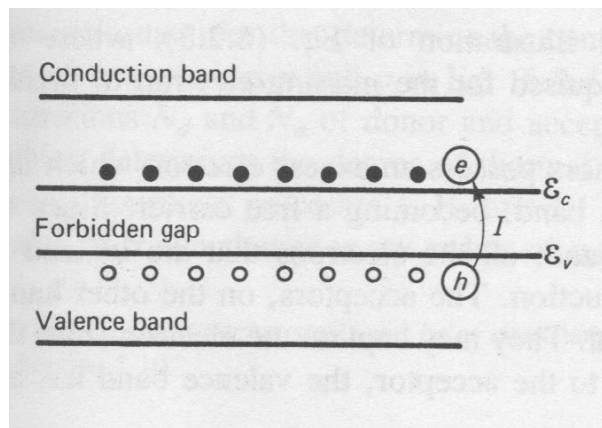
Como resultado, alguns elétrons irão ocupar a banda de condução previamente vazia, e, em contrapartida, alguns estados vazios aparecem na banda de valência previamente preenchida.

Este estado vazio é denominado **lacuna**, e pode ser considerado como um portador de carga positiva, $+q$.

Uma vez que elétrons e lacunas possuem cargas opostas, suas energias crescem em direções opostas, ou seja, lacunas de menor energia se localizam no topo da banda de valência.

Vale ressaltar porém, que o semicondutor permanece neutro.

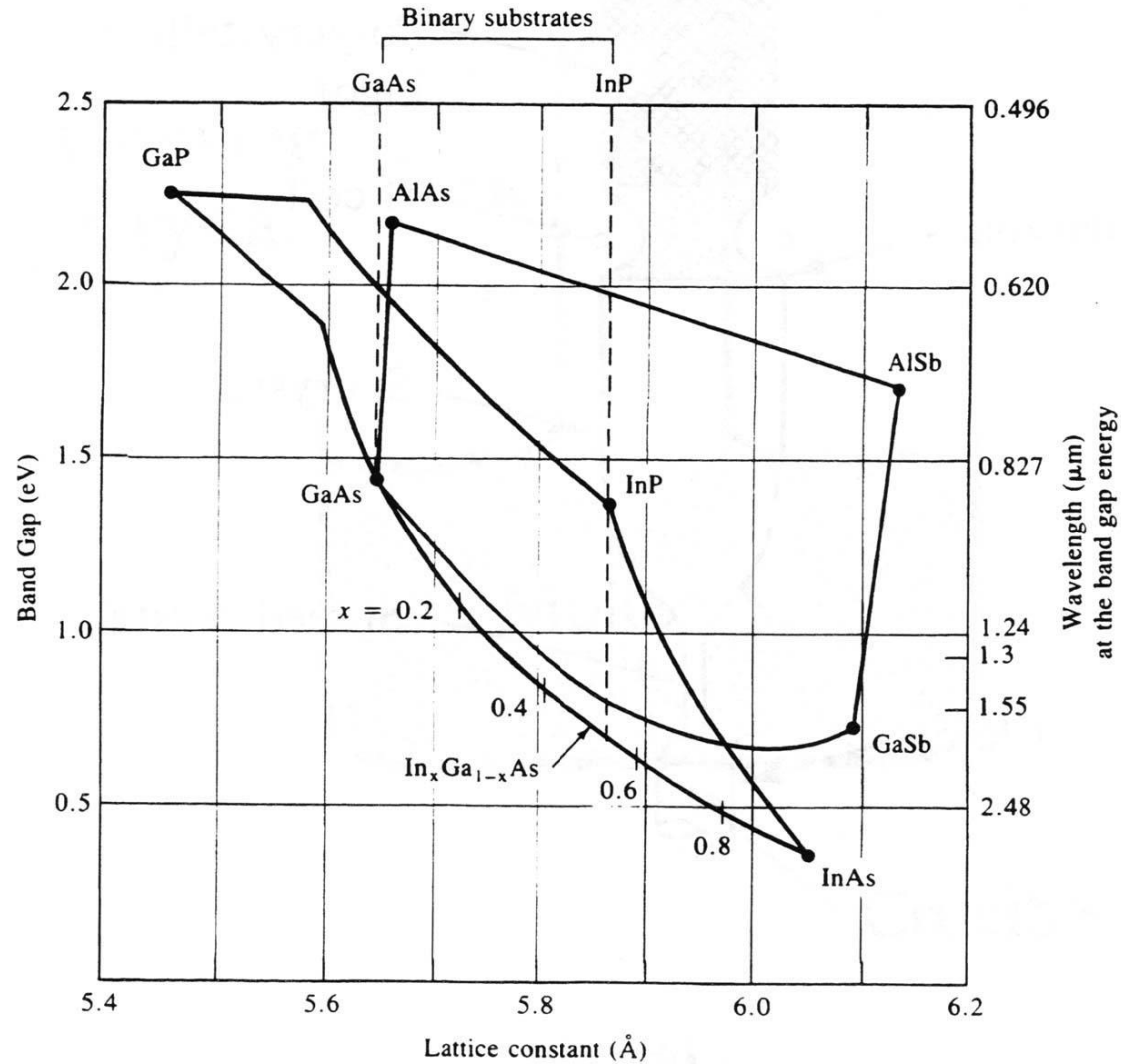
Este processo é identificado como processo 1 na figura abaixo.



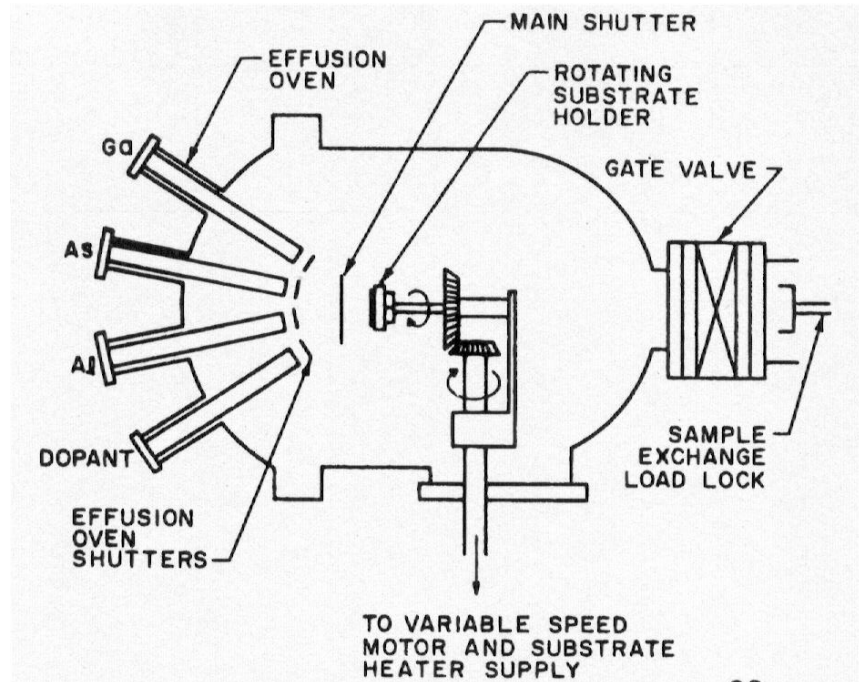
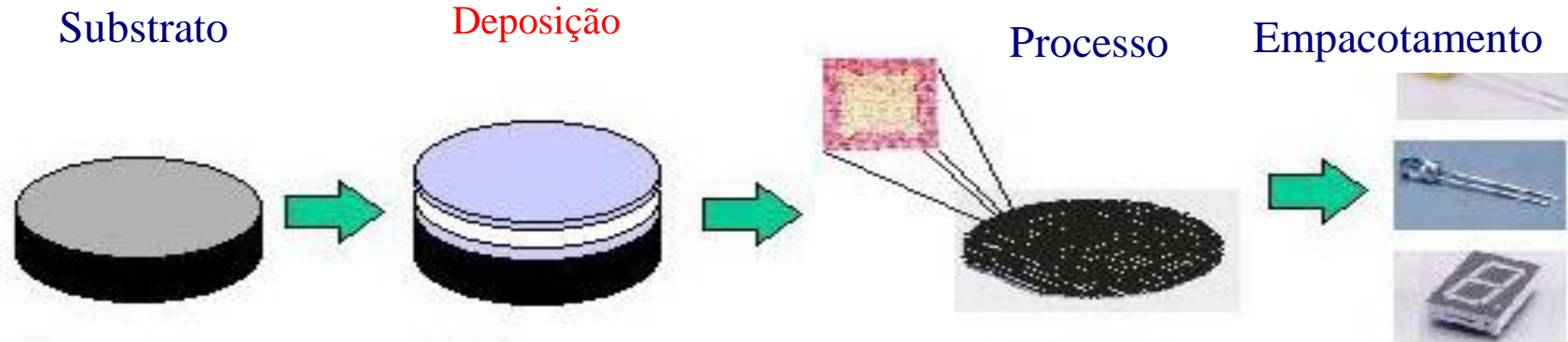
Condução eletrônica torna-se possível porque há elétrons em uma banda de condução quase vazia e há lacunas em uma banda de valência quase cheia. Uma vez que elétrons e lacunas existem devido à criação térmica de pares elétron-lacuna, temos que a concentração de lacunas (p) = a concentração de elétrons (n).

Semicondutores nos quais os portadores livres ocorrem através de excitação térmica são chamados **semicondutores intrínsecos**.

BANDA PROIBIDA COMO FUNÇÃO DA COMPOSIÇÃO



Passos na fabricação de dispositivos optoeletrônicos

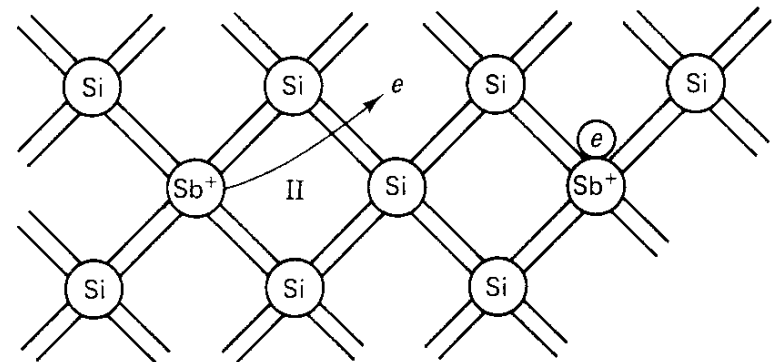


Um semicondutor pode tornar-se mais condutivo se átomos de impureza forem adicionados.

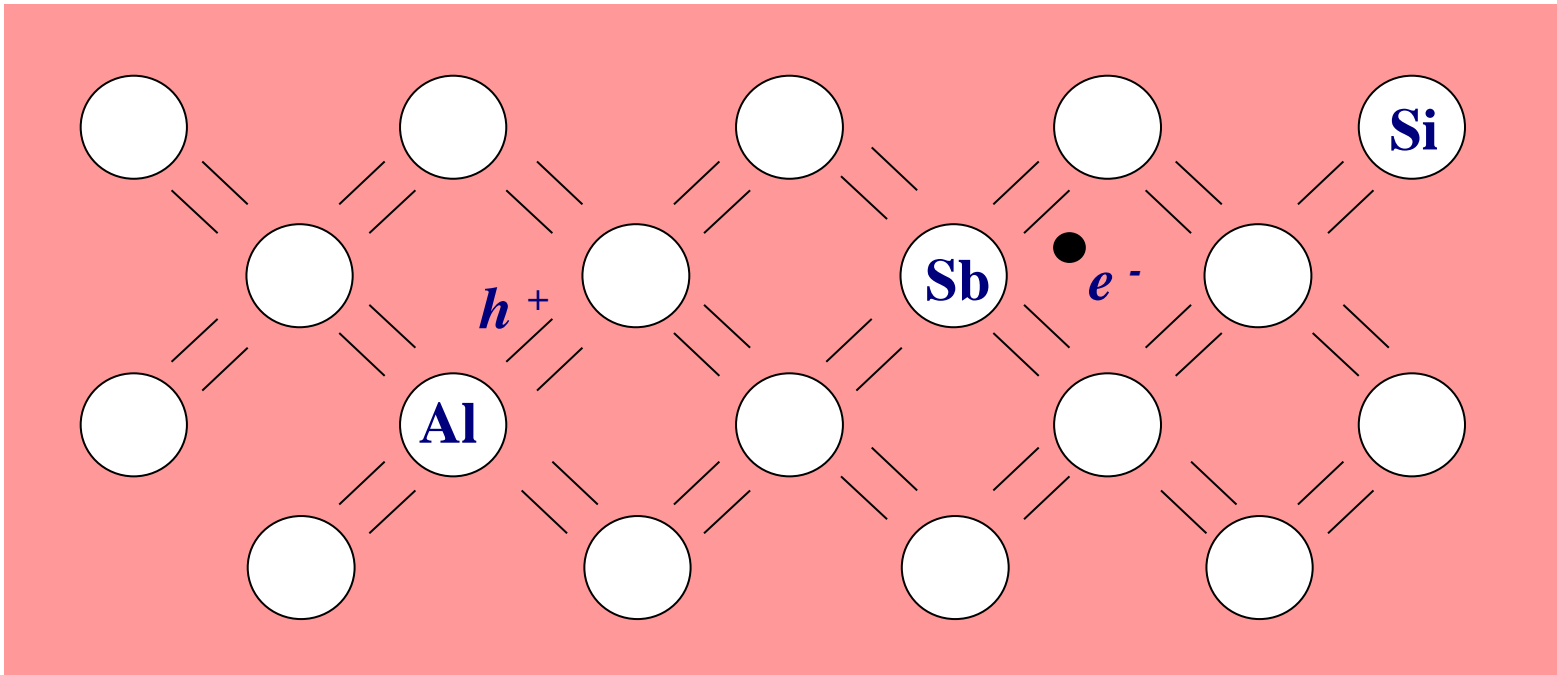
Suponhamos algum tipo de semicondutor familiar, tipo silício ou germânio.

Elementos à direita de silício ou germânio na tabela periódica como o P, As, Sb têm 5 elétrons na última camada. Se átomos desses elementos forem usados para substituir um átomo de silício ou germânio apenas 4 dos 5 elétrons são necessários para formar a ligação covalente com os átomos vizinhos de Si ou Ge, deixando um elétron extra relativamente livre para se mover sobre o cristal.

Estrutura covalente de Si com impureza substitucional de Sb.



Dentro do modelo covalente, um átomo de Sb possui os quatro elétrons necessários para completar as ligações covalentes com os átomos de silício, mais um elétron extra. Uma pequena quantidade de energia térmica é suficiente para liberar este elétron.

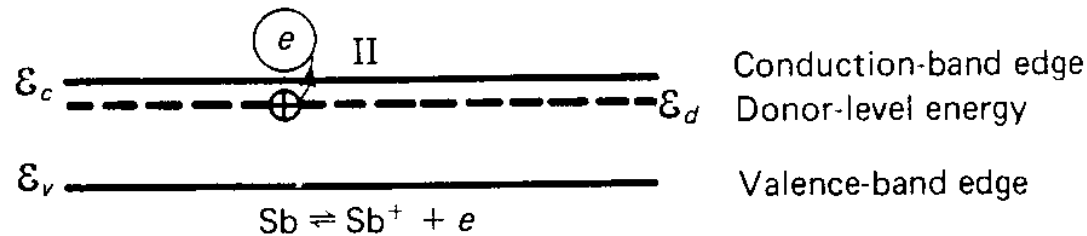


Átomos doadores e aceitadores nas ligações covalentes de um cristal de silício.

Grupo III: B, Ga, In

Grupo V: P, As

Chama-se **impureza doadora** aquela impureza que é capaz de doar um elétron em excesso para a banda de condução.



$E_C \rightarrow$ energia do fundo banda de condução.

$E_V \rightarrow$ energia do topo banda de valência


$E_D \rightarrow$ energia do nível doador

$E_C - E_D \rightarrow$ é a quantidade de energia necessária para o elétron em excesso escapar do átomo de Sb.

Quando a energia térmica $k_B T$ torna-se suficientemente grande comparada a energia de ionização do doador, praticamente todos os doadores tornam-se ionizados. Em ionização os doadores liberam seus elétrons para a banda de condução. O processo é esquematizado como processo II.

Chama-se **impureza aceitadora** a impureza que tem 3 elétrons na última camada que aceita um elétron a fim de completar a ligação covalente com os átomos vizinhos de Si. A perda de um elétron na ligação covalente constitui uma vacância. Os elementos à esquerda do silício e do germânio na tabela periódica, tais como B, Al, Ga, e In são impurezas aceitadoras.

Em resumo, os doadores possuem elétrons em excesso, os quais, com uma pequena excitação térmica é capaz de provocar um salto de um elétron para a banda de condução, tornando-se assim um elétron livre. Como há muitos estados disponíveis na banda de condução, todos os elétrons que forem ionizados a partir de estados doadores contribuirão para a condução elétrica.

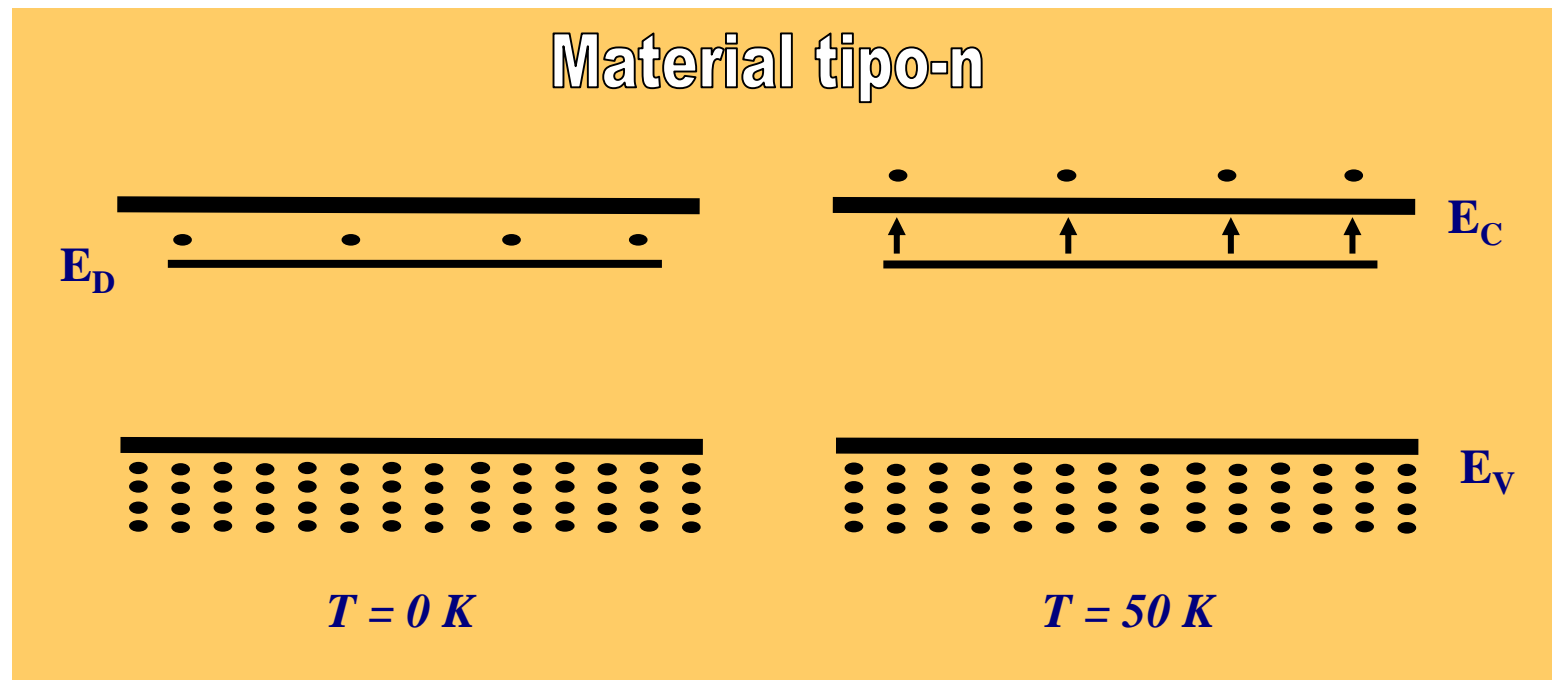


Os aceitadores por outro lado, precisam de um elétron para completar a ligação covalente. Eles capturam esse elétron a partir da banda de valência. Uma vez que foi dado um elétron para o aceitador, a banda de valência passa a ter um estado de vacância o qual agora fica disponível para outros elétrons na banda de valência. Como há um grande número de elétrons na banda de valência, todos os estados de vacância produzidos para doar um elétron da banda de valência para o átomo doador participará do processo de condução. Os estados de vacância na banda de valência são chamados **lacunas**.

Portanto, a condução elétrica na banda de condução é executada por elétrons, enquanto que, na banda de valência é executada por estados de vacância ou lacunas.

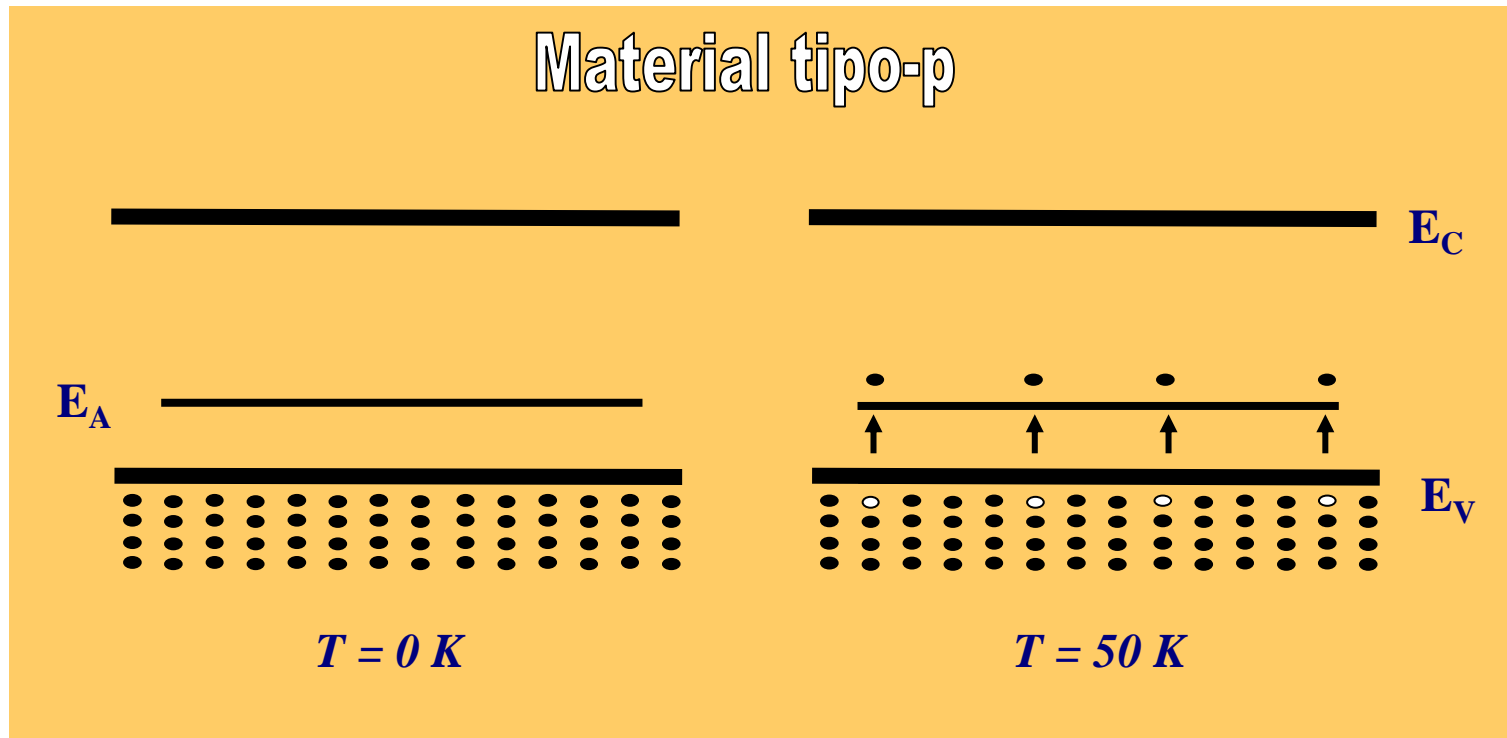
Materiais Extrínsecos

EM RESUMO: Em adição aos portadores intrínsecos, gerados termicamente, isto é, banda à banda, é possível também, criar portadores de carga através da introdução de impurezas no cristal. Este processo é chamado de **PROCESSO DE DOPAGEM**. Nestes cristais a concentração de equilíbrio n_0 ou p_0 é muito maior do que a concentração intrínseca n_i .



Doação de elétrons de um nível doador para a banda de condução

Material tipo-p




Aceitação de elétrons da banda de valência para um nível aceitador e a criação resultante de lacunas.

Elétrons são portadores majoritários $\rightarrow n_0 \gg p_0$.

Neutralidade de carga: $n_0 = N_D^+ + p_0$

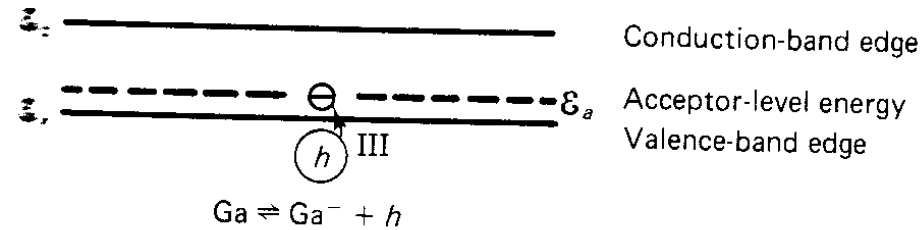
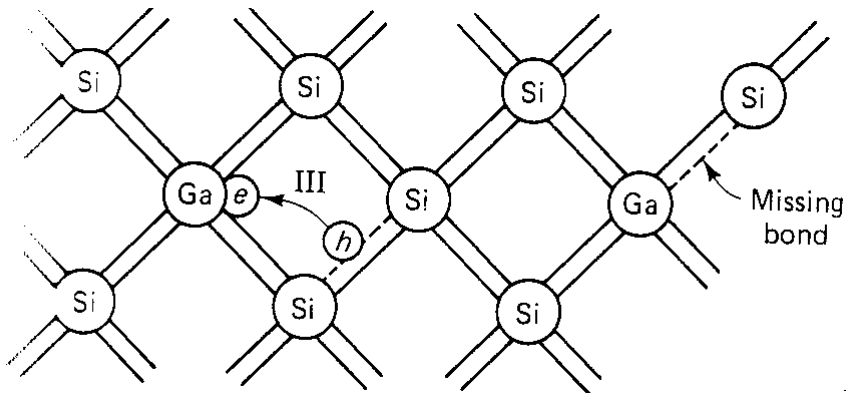
Lacunas são portadores majoritários $\rightarrow p_0 = N_A^- + n_0$



Os termos tipo-n e tipo-p referem-se ao tipo de carga dos portadores majoritários, com tipo negativo significando elétrons e tipo positivo significando lacunas. Como a dominância de um tipo de portador sobre outro é um resultado da introdução de átomos estranhos à composição original, tal semicondutor é chamado de semicondutor extrínseco. Sem impurezas, quando $p = n$, um semicondutor é dito intrínseco.

As principais quantidades que determinam a condutividade de um semicondutor são as concentrações de portadores livres n e p .

Essas quantidades não dependem somente das concentrações N_d e N_a de impurezas doadoras e aceitadoras, mas também da temperatura T , a qual determina o grau de excitação térmico dos portadores a partir das ligações covalentes e das impurezas.



À esquerda: Representação esquemática bidimensional das ligações covalentes no silício com um átomo substitucional de gálio.

À direita: diagrama de banda de energia do silício com os níveis de energia do gálio. Excitação térmica de um elétron da banda de valência para o átomo de gálio → Processo III.

O valor de σ pode mudar de muitas ordens de magnitude variando-se N_d e N_a ou T .

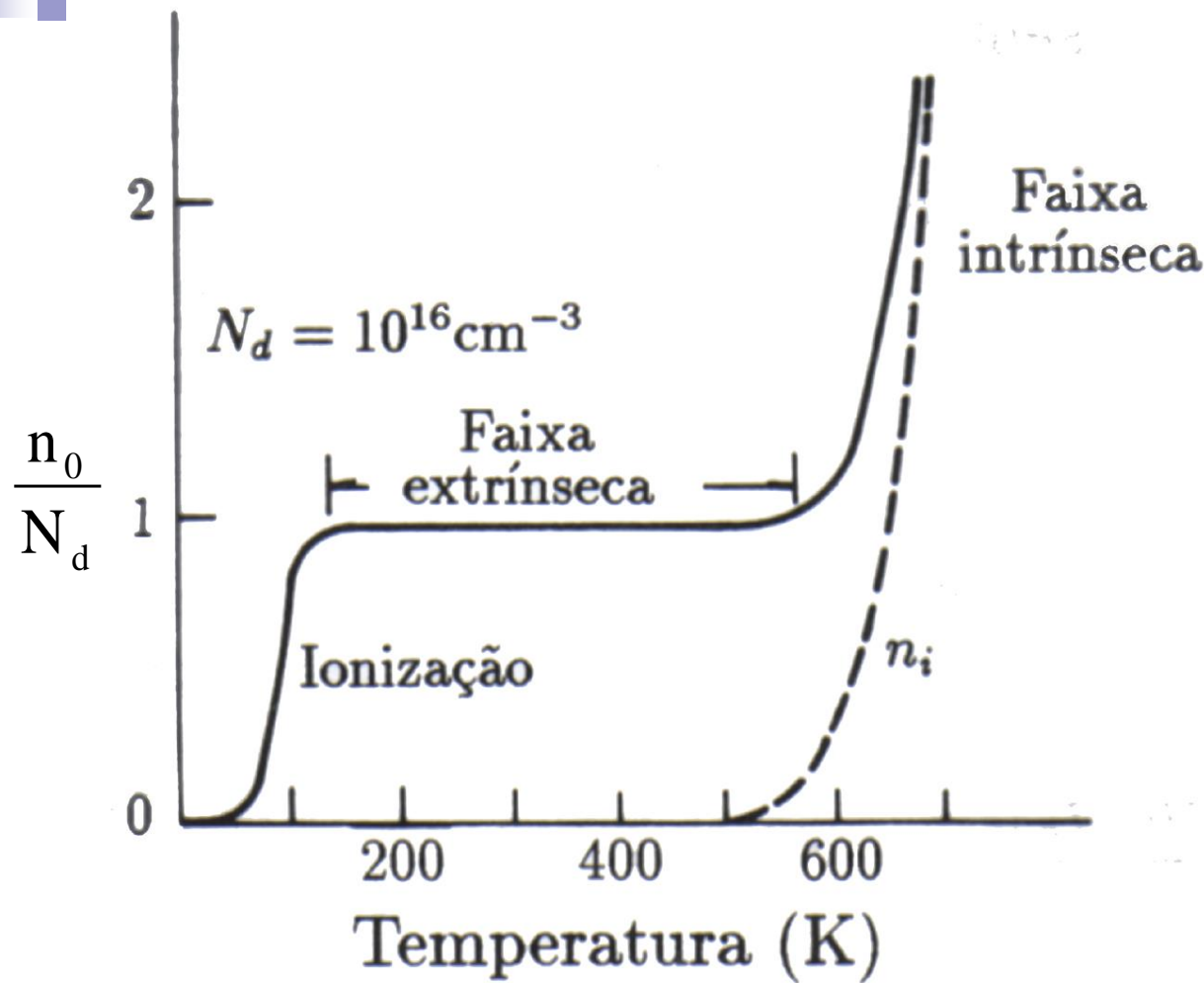


FIGURA Concentração de elétrons em função da temperatura em silício tipo n com $N_d = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.