

EECO6A – Eletrônica A

Prof. Thales E. P. de Almeida

Física dos semicondutores

- Para compreender o funcionamento dos dispositivos eletrônicos semicondutores e suas características, é necessário abordar brevemente os princípios físicos que regem o funcionamento destes componentes
- Diodos, Transistores bipolares e transistores de efeito de campo, entre outros componentes, utilizam material semicondutor, geralmente o silício, para apresentar seu comportamento.

Física dos semicondutores

- Primeiramente vamos analisar o comportamento de uma estrutura cristalina de material semicondutor puro, ou **semicondutor intrínseco**
- Posteriormente analisaremos o processo de dopagem deste material e como isto afeta suas características de condução elétrica
- Finalmente analisaremos o comportamento de junções semicondutoras, dadas pela interface entre materiais com dopagens diferentes e como isto implica no comportamento atípico na condução de corrente elétrica

Semicondutores

- O conceito de 'semicondutor' existe para definir materiais que não são bons condutores, como o cobre, ouro ou alumínio, mas que também não são materiais isolantes como o vidro, por exemplo.
- Mas o que muda entre estes materiais?
- A quantidade de energia necessária para mover um elétron entre os átomos na estrutura que forma o material
 - Teoria de bandas de energia

Semicondutores

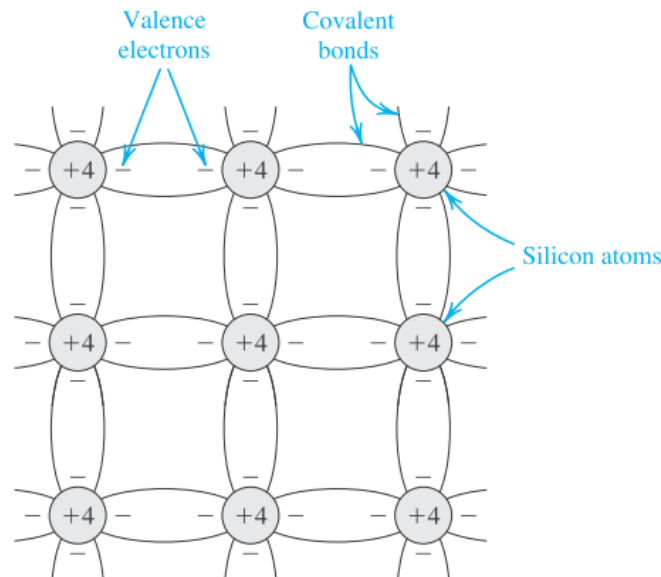
- Semicondutores são elementos que apresentam um potencial de barreira (...)
- **Pesquisar e entregar junto ao relatório** estas características dos elementos semicondutores, relacionados à teoria de bandas

Semicondutores

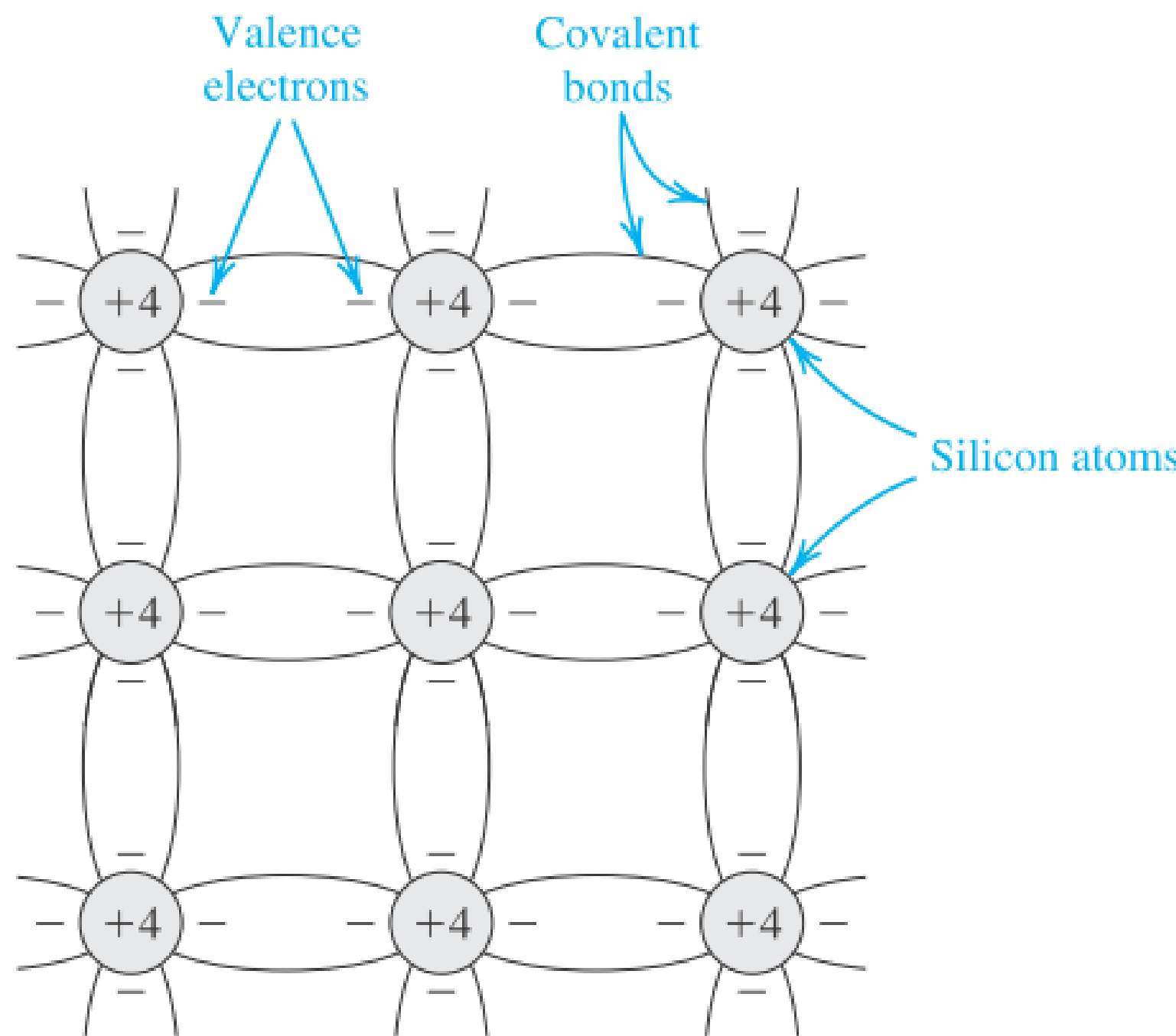
- Geralmente formados por um único elemento, como o Silício ou germânio, pertencente à família IV da tabela periódica, possuem 4 elétrons na camada de valência
- Também podem ser compostos por pares de elementos, como Arsenieto de Gálio, combinando elementos das famílias 3 e 5, ou das famílias 2 e 6, geralmente utilizados em aplicações especiais como LEDs ou para altas frequências.

Semicondutores

- Sabemos da física e da química que um átomo se comporta como eletronicamente estável quando possui 8 elétrons na camada de valência.
- O Silício forma um material cristalino compartilhando 4 elétrons em sua camada de valência por meio de ligações covalentes com os átomos vizinhos

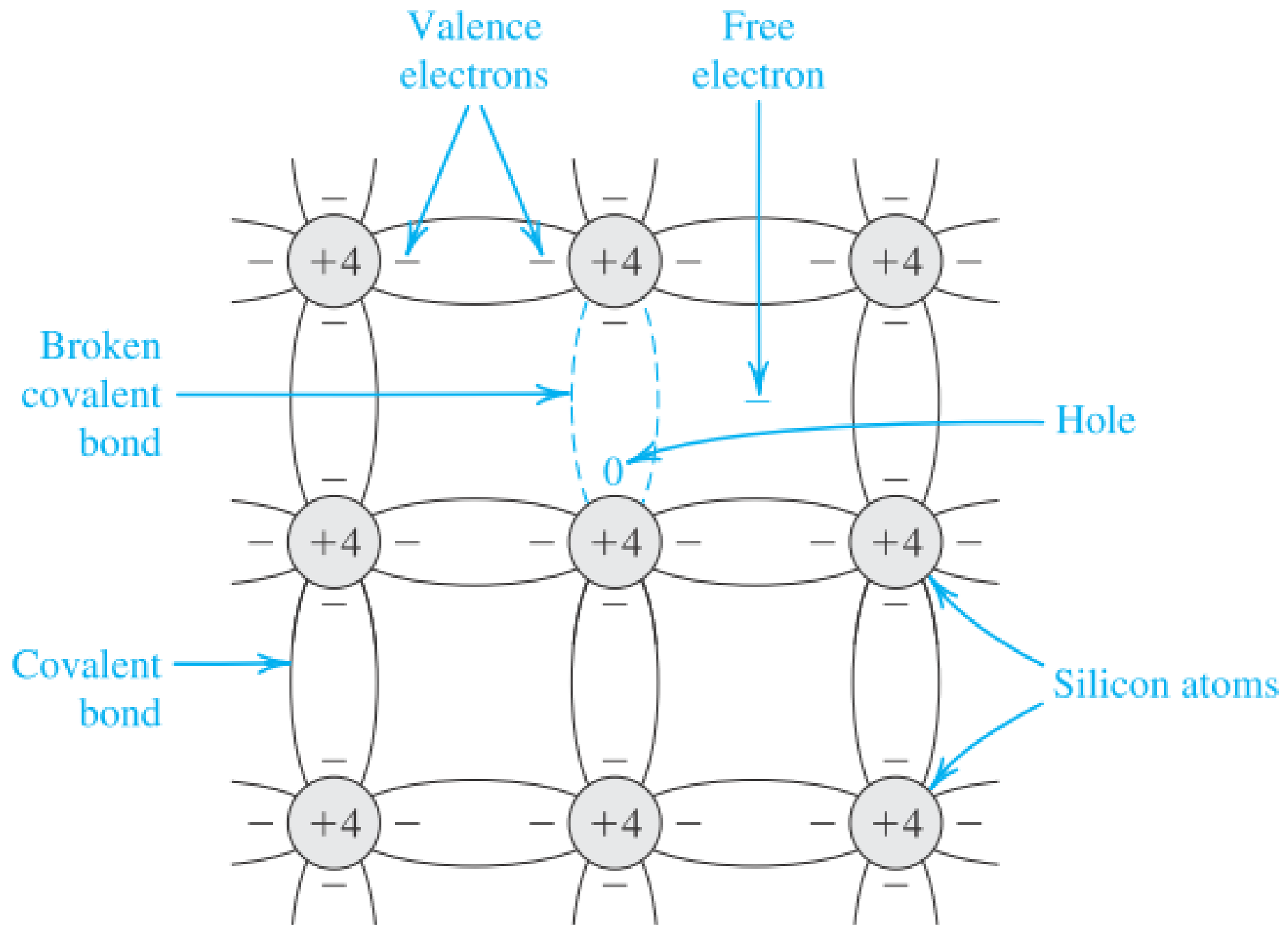


Semicondutores



Semicondutores

- Em temperaturas extremamente baixas, as ligações covalentes ficam intactas e não há elétrons livres para circular pelo material, desta forma o cristal de silício se comporta como um isolante.
- Com temperaturas maiores, como a temperatura ambiente, há energia térmica suficiente sendo entregue ao material de forma a romper algumas das ligações covalentes, 'liberando' elétrons
- Este elétron livre pode circular pelo material, portanto permitindo uma pequena corrente elétrica se estimulado por um campo elétrico



Semicondutores

- Quando um elétron livre se desloca, seu átomo original passa a apresentar uma carga positiva, pois seu núcleo não foi alterado.
- Um elétron de um átomo vizinho pode migrar para este átomo, cobrindo esta 'lacuna', de forma que agora o segundo átomo passa a apresentar uma 'lacuna'
- Podemos observar este movimento de lacunas como uma forma de corrente elétrica dada pelas cargas positivas em movimento

Semicondutores

- Quanto maior a temperatura, mais ligações covalentes serão rompidas, portanto aumentando a capacidade de condução de corrente elétrica deste material.
- O aparecimento de pares de elétrons-livres e lacunas, obviamente em cargas iguais, se dá por um processo chamado de **geração térmica**.
- O contrário pode acontecer, de um elétron-livre voltar a ocupar uma lacuna que estava no material, num processo chamado de **recombinação**.

Semicondutores

- A concentração de elétrons-livres (n) é semelhante à concentração de lacunas (p), de forma que $n = p = n_i$
- Assim, n_i define o numero de elétrons-livres por cm^3 de semicondutor intrínseco, e depende fortemente da temperatura:

$$n_i = BT^{3/2} e^{-E_g/2kT}$$

- B é uma constante do material ($7,3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}\text{K}^{-3/2}$ para o silício)
- T a temperatura em Kelvin
- E_g a energia de bandgap, energia necessária para romper uma ligação covalente, liberando um par elétron-lacuna (1,12 eV para o silício)
- k a constante de Boltzmann ($8,62 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$)

Semicondutores Extrínsecos

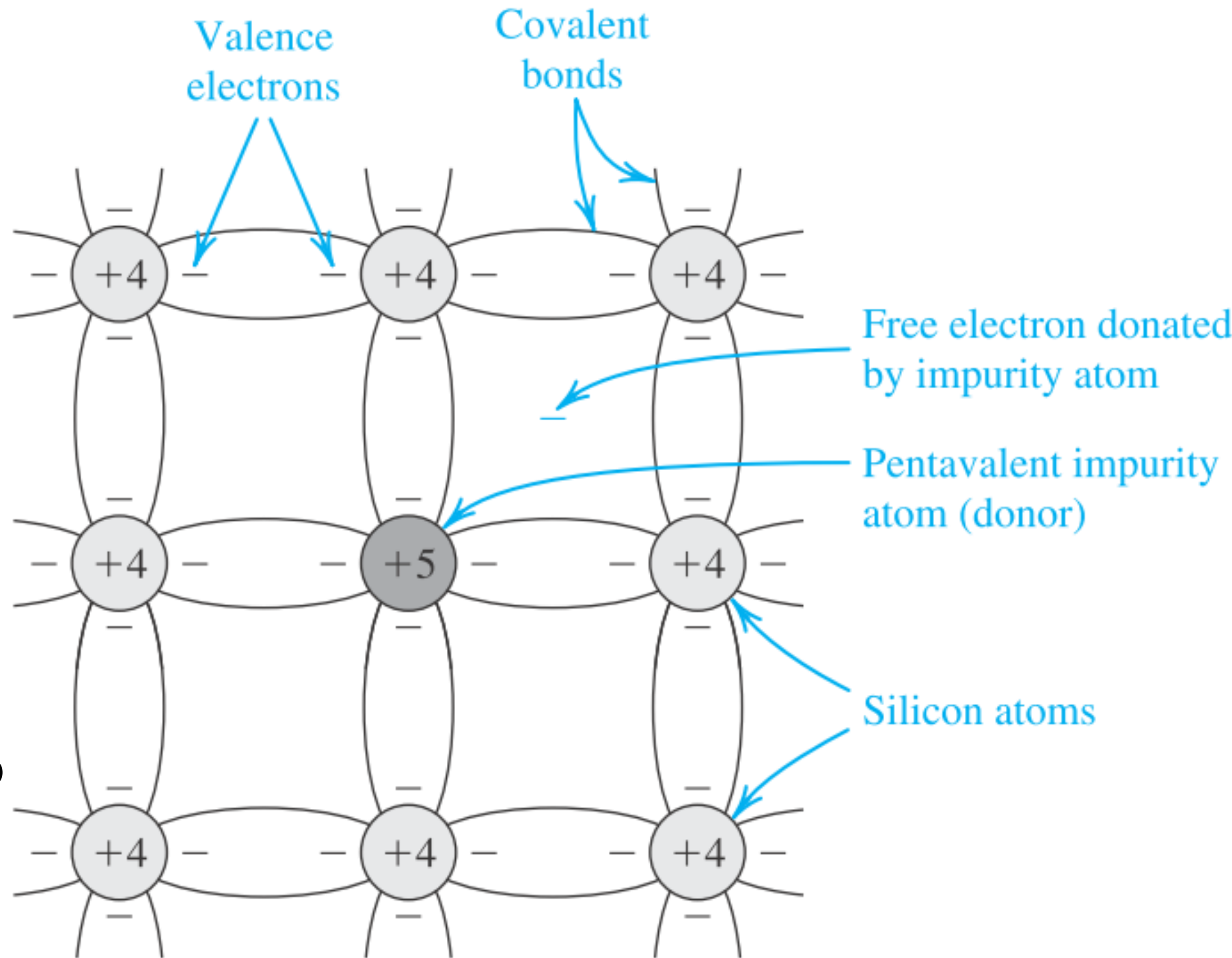
- Até então vimos uma estrutura cristalina de silício, que mesmo em temperatura ambiente possui uma quantidade muito pequena de pares de elétrons-livres e lacunas para conduzir uma quantidade relevante de corrente elétrica, além de ser fortemente dependente da temperatura, que é altamente indesejável
- Desejamos alterar, de forma substancial e precisamente controlada, a concentração de portadores no cristal de silício para aumentar a capacidade de condução de corrente.
- Isto é possível pelo processo de **dopagem**

Semicondutores Extrínsecos

- O processo de dopagem consiste da inserção de 'impurezas' no silício cristalino, introduzindo átomos de forma a aumentar a quantidade de elétrons-livres ou de lacunas no material, mas sem alterar a estrutura cristalina do silício.
- Introduzindo um átomo pentavalente, que possui 5 elétrons na camada de valência como o Fósforo, aumentamos a quantidade de elétrons-livres (n) no cristal, formando um material do **tipo n**
- Introduzindo um átomo trivalente, que possui 3 elétrons na camada de valência como o Boro, aumentamos a quantidade de lacunas (p) no cristal, formando um material do **tipo p**

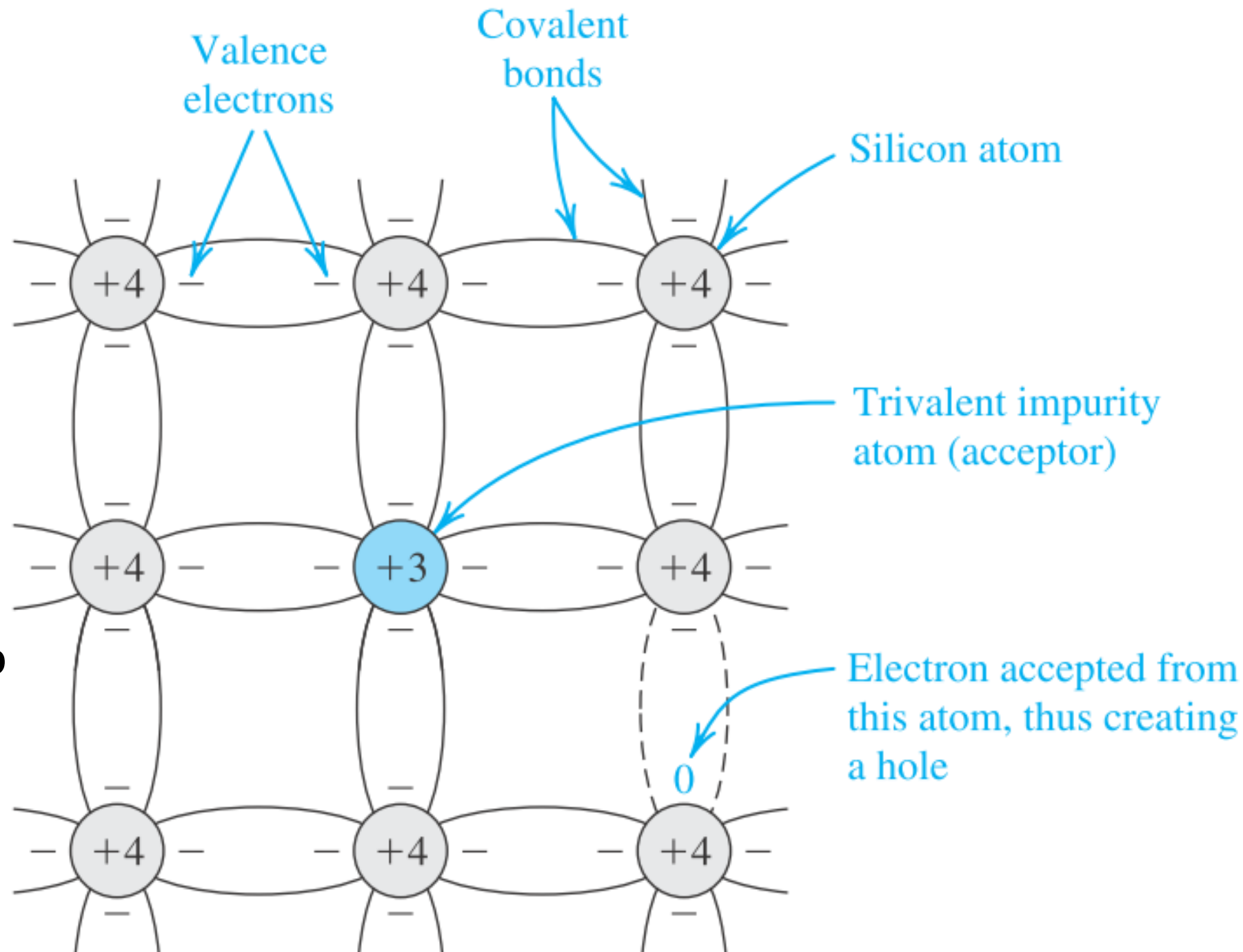
tipo n

- Prevalência de elétrons-livres no material
- A condução é dada majoritariamente pelo movimento de elétrons-livres
- O **portador majoritário** é o elétron-livre



tipo p

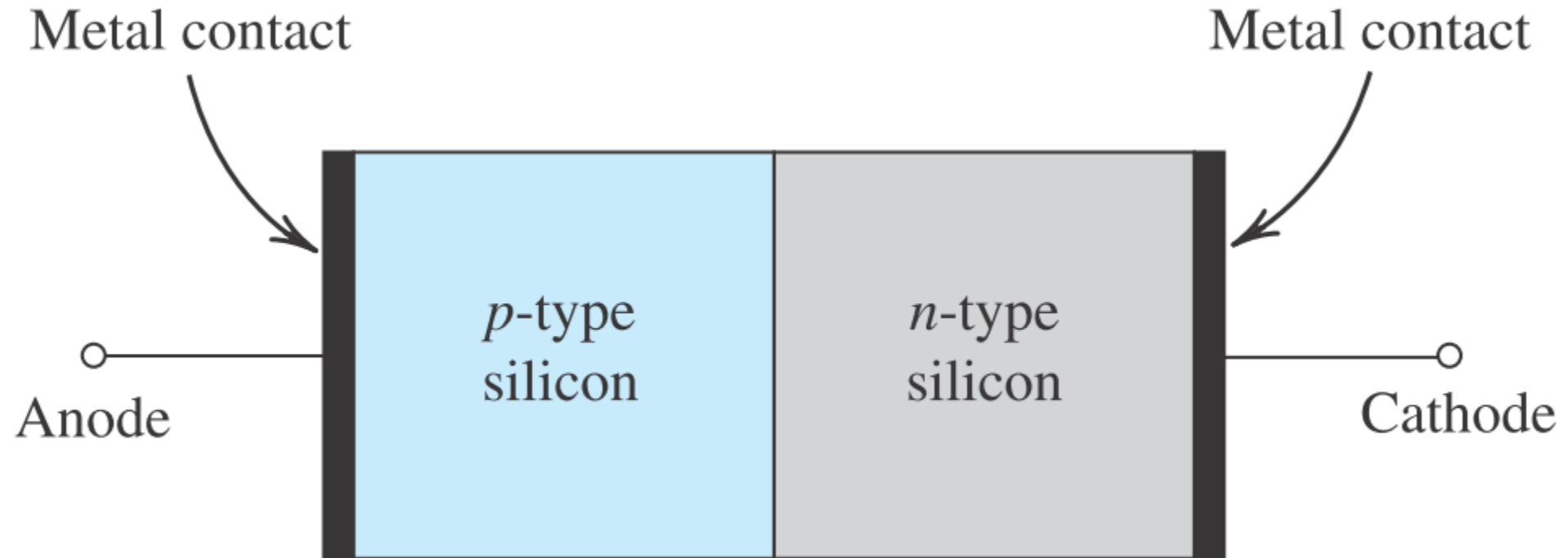
- Prevalência de lacunas no material
- A condução é dada majoritariamente pelo movimento de lacunas
- O **portador majoritário** é a lacuna



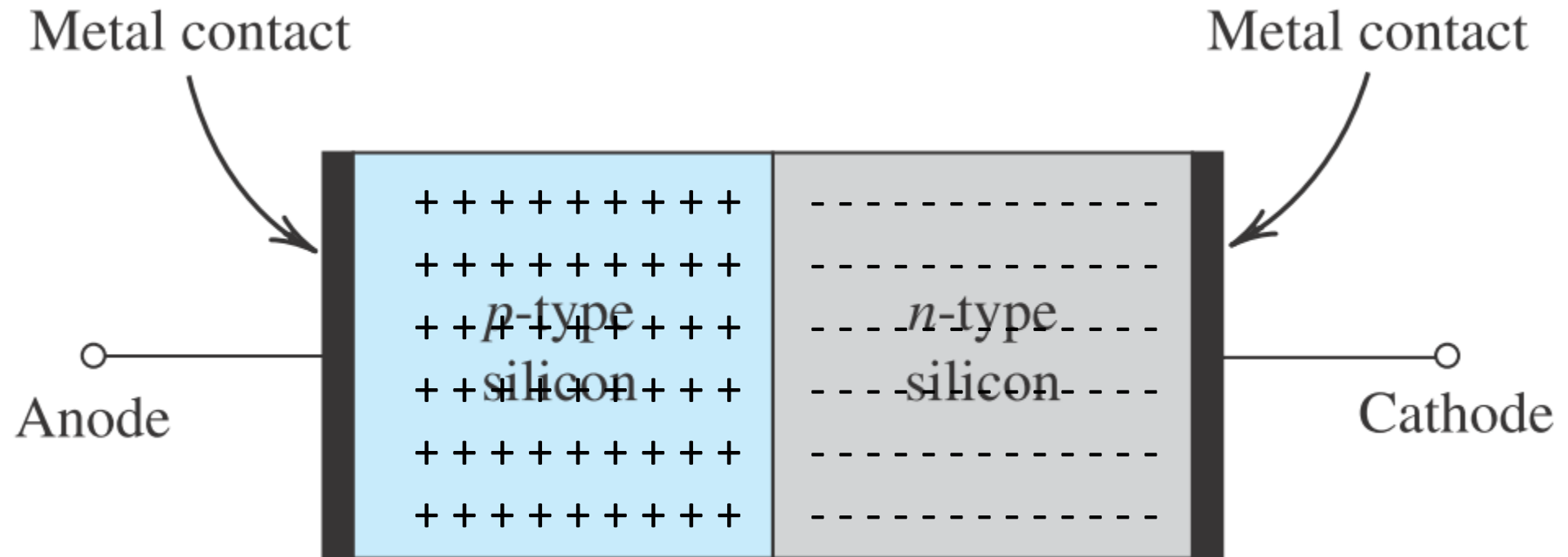
Junção PN

- Cada material, dos tipos p ou n, isoladamente, apesar de apresentarem características melhores de condução que o silício intrínseco, continuam matérias com pouca ou nenhuma utilidade prática
- A vantagem destes materiais provém da combinação deles, formando um dispositivo que apresenta uma junção semicondutora dos dois materiais.

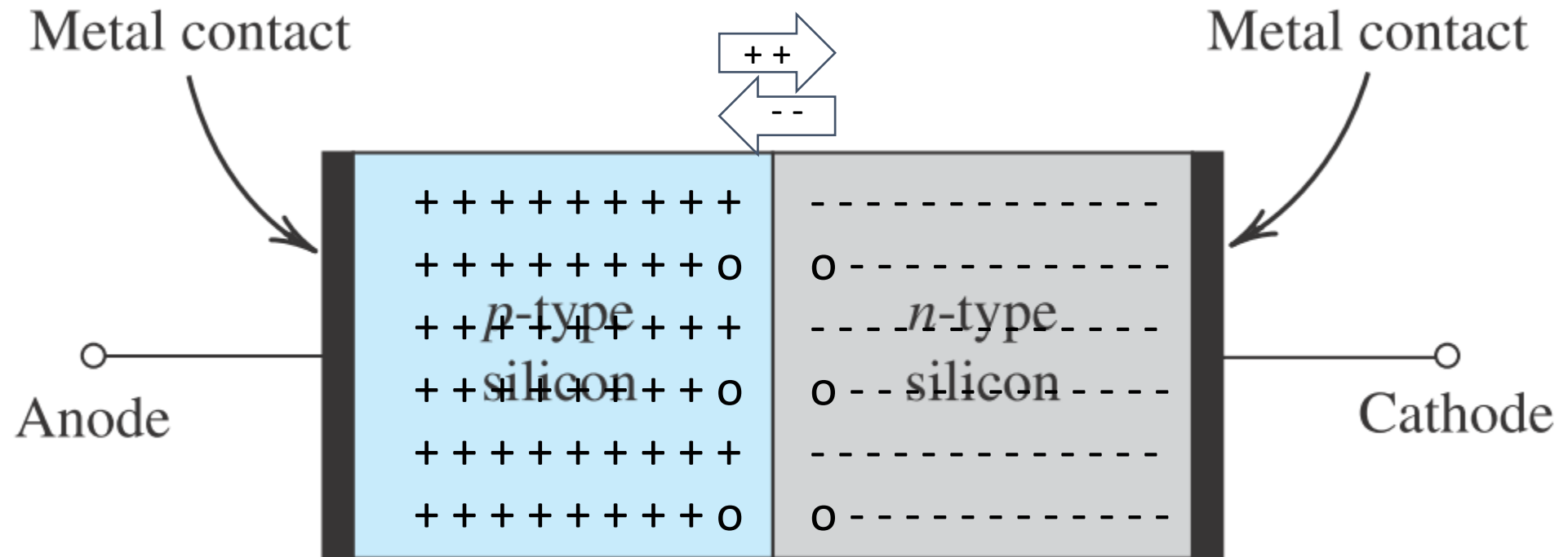
Junção PN

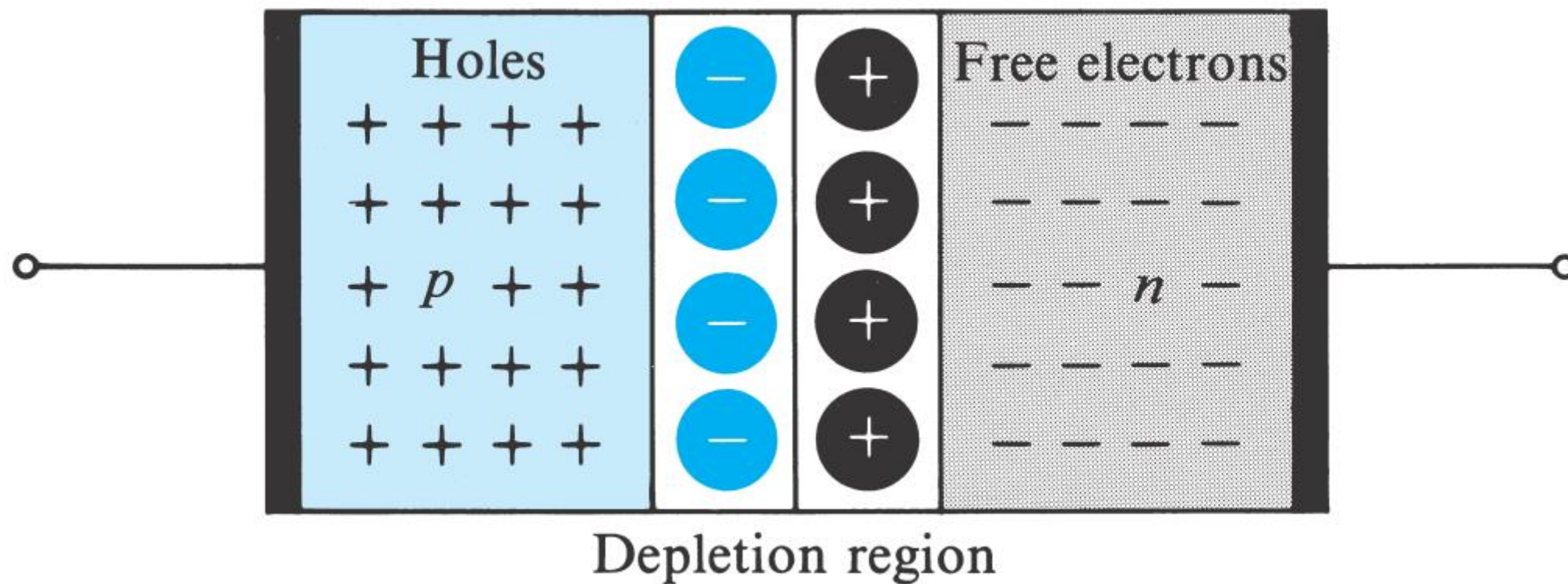
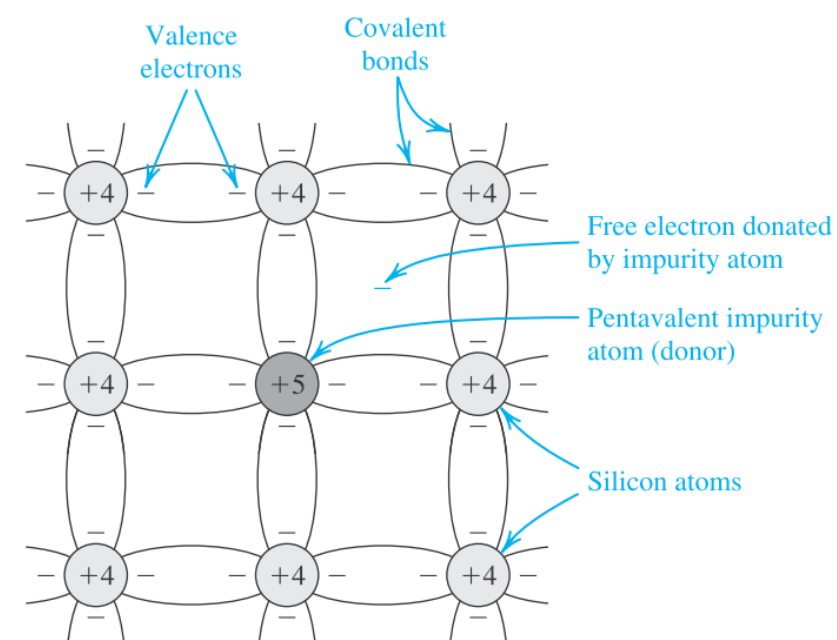
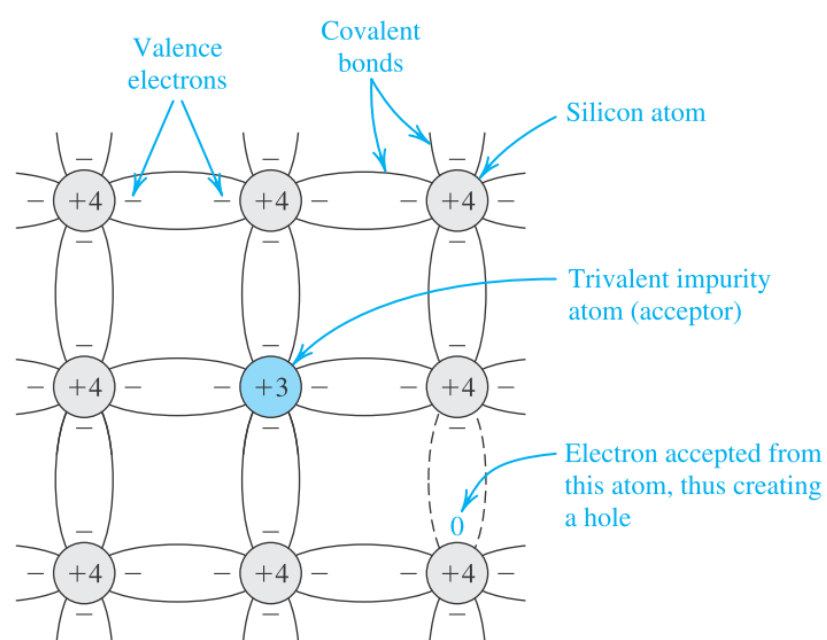


Junção PN

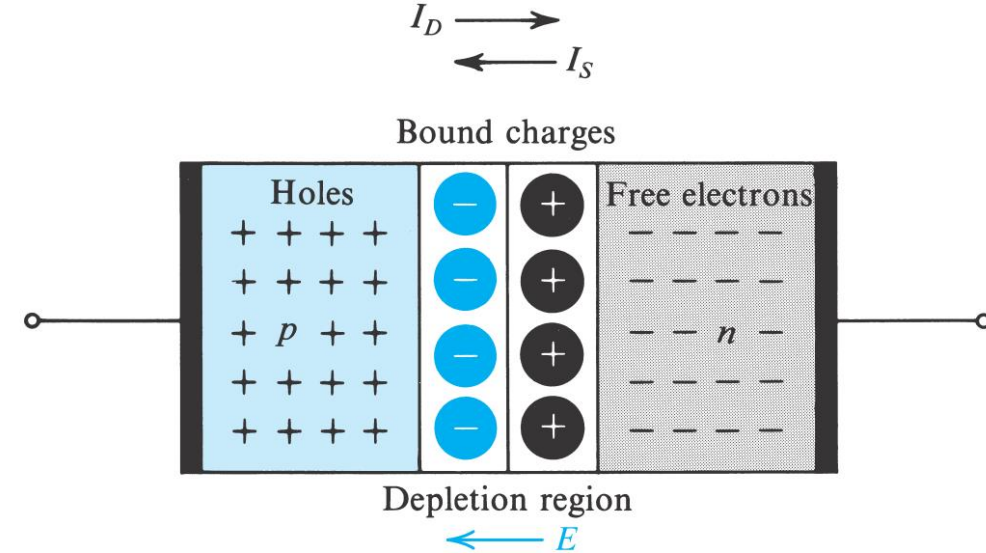


Junção PN



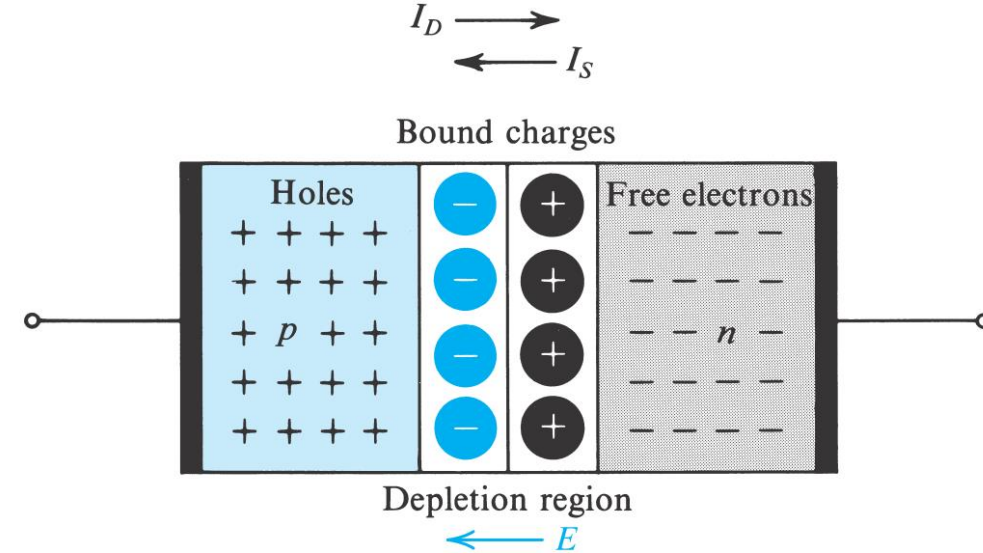


Junção PN



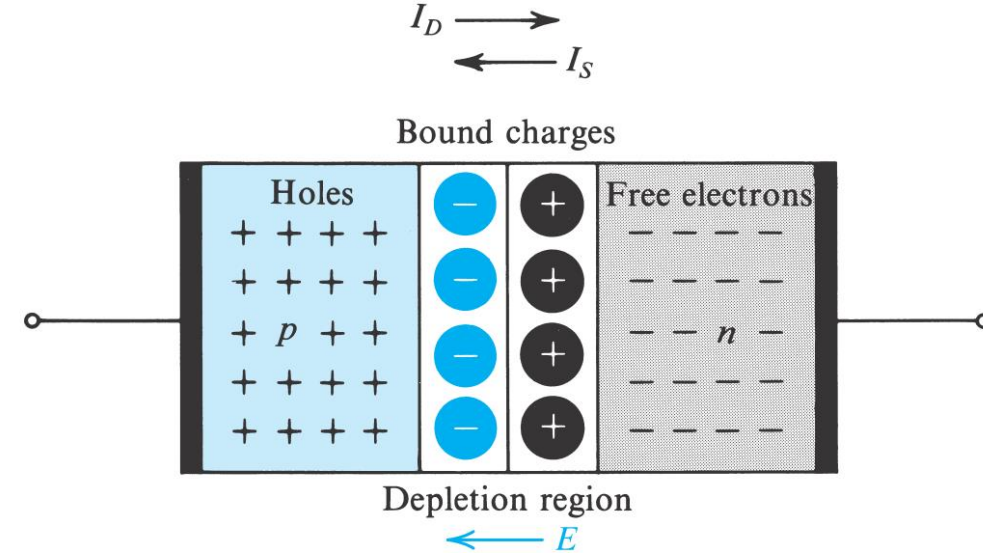
- Na região de interface, os elétrons livres do material tipo n são atraídos para o material do tipo p, da mesma forma, as lacunas do material tipo p são atraídas para o material do tipo n.
- Este processo é chamado de corrente de difusão, I_D .
- Estes portadores que se difundiram pelos materiais se recombinam, formando uma região depletada de portadores

Junção PN



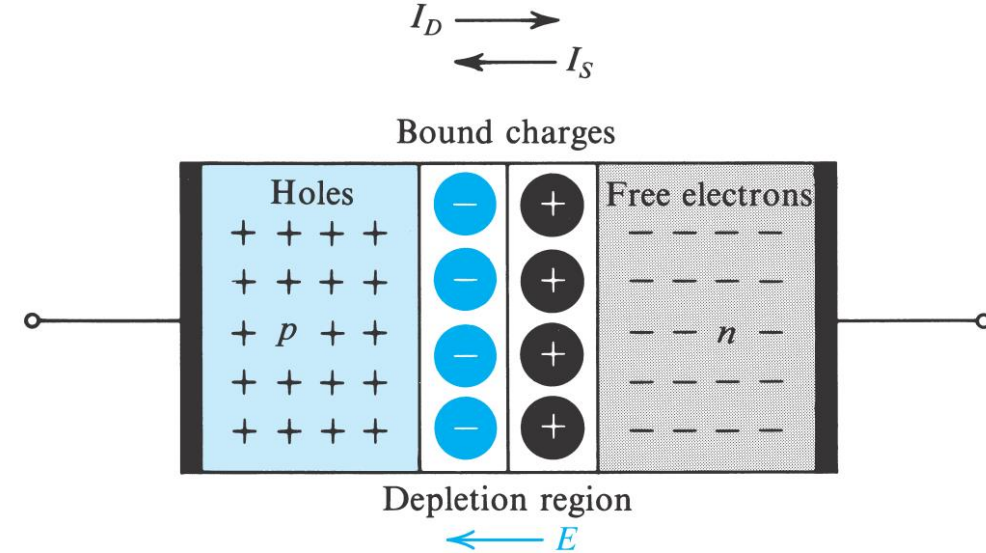
- Estes portadores que se difundiram pelos materiais se recombinaem, formando uma região depletada de portadores.
- Estas cargas que se recombinaem passam a não mais equilibrar a carga dos átomos de origem, que então passam a apresentar um carga 'descoberta'
- No material tipo n surge uma região com carga positiva
- No material tipo p surge uma região com carga negativa
- Esta região é chamada **região de depleção**

Junção PN



- Um campo elétrico E é induzido por essas cargas, com sinal positivo no material tipo n e sinal negativo no material tipo p
- Este campo elétrico passa a repelir os portadores livres nos materiais, impedindo a corrente de difusão e assim dificultando o 'transito' de portadores entre os materiais.
- Ainda assim, portadores minoritários, gerados termicamente, permitem uma pequena corrente de fuga I_S , a **corrente de deriva**

Junção PN



- Com os terminais abertos, não há estímulos externos no material
- A tensão de barreira V_0 gerada pela região de depleção é dada por

$$V_0 = V_T \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$$

com:

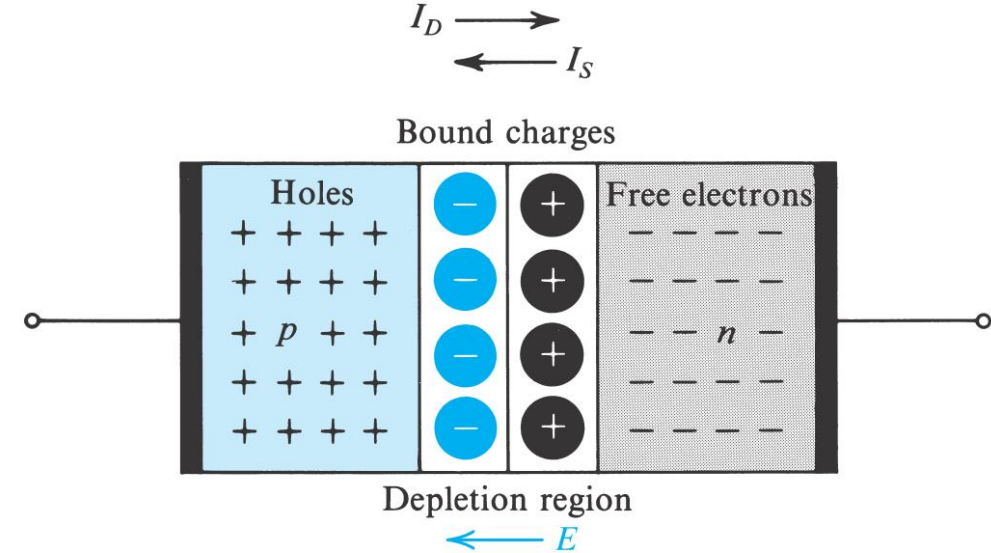
N_A a concentração de dopagem no material tipo p

N_D a concentração de dopagem no material tipo n

V_T a tensão térmica, 25mV em temperatura ambiente

No silício, V_0 fica entre 0,6 e 0,9V

Junção PN

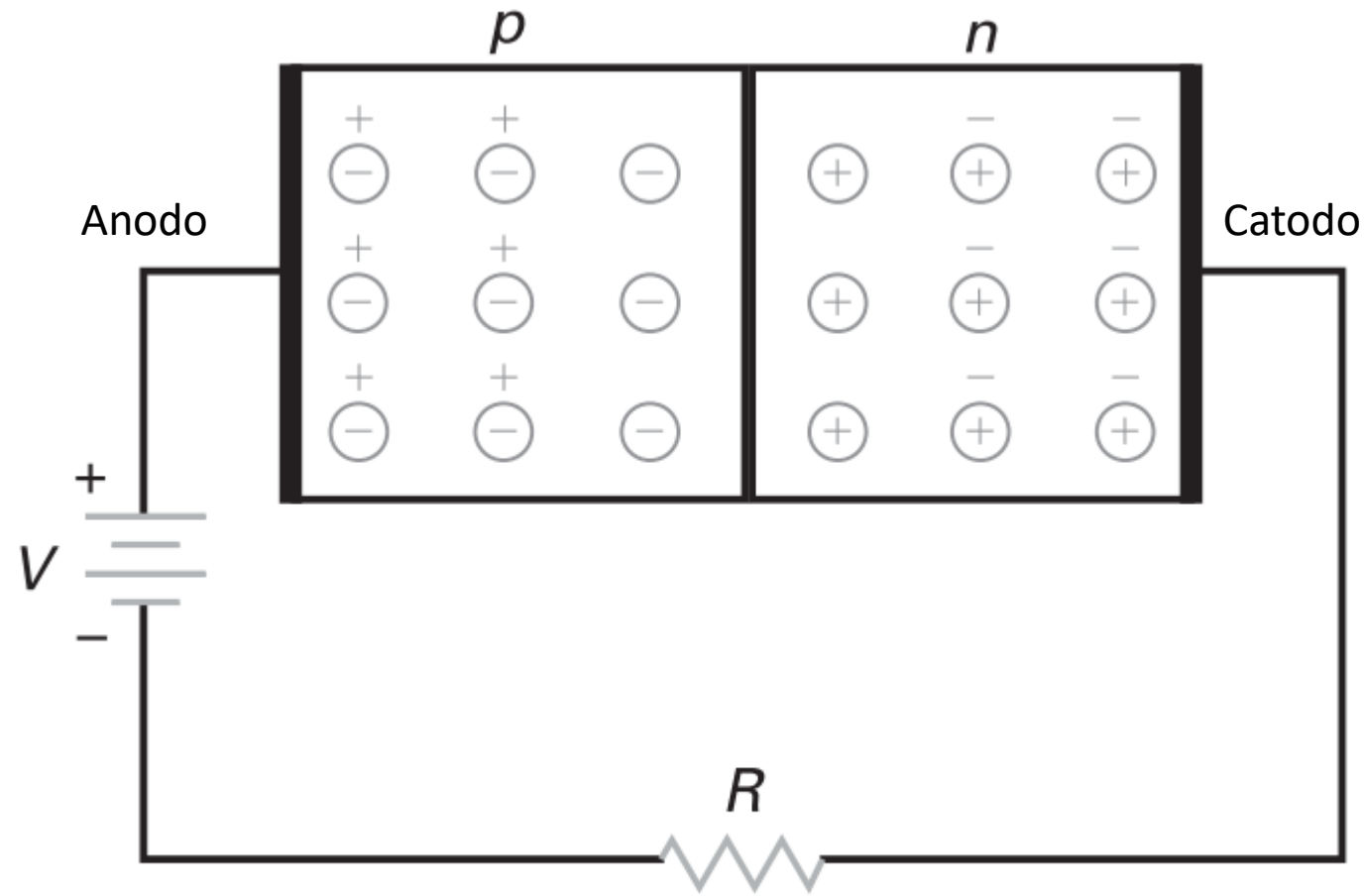


- É possível calcular a carga armazenada no material, mas não é relevante neste momento.

$$Q_J = A \sqrt{2\epsilon_s q \left(\frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \right) V_0}$$

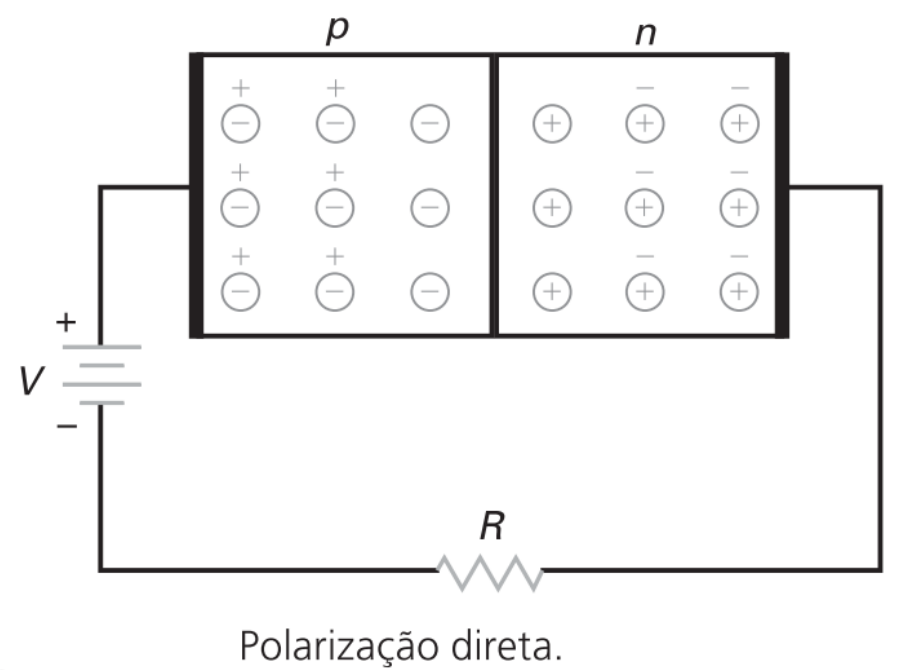
- ϵ_s a permissividade elétrica do material
- A a área da seção transversal da junção

Aplicando tensão entre os terminais



Polarização direta.

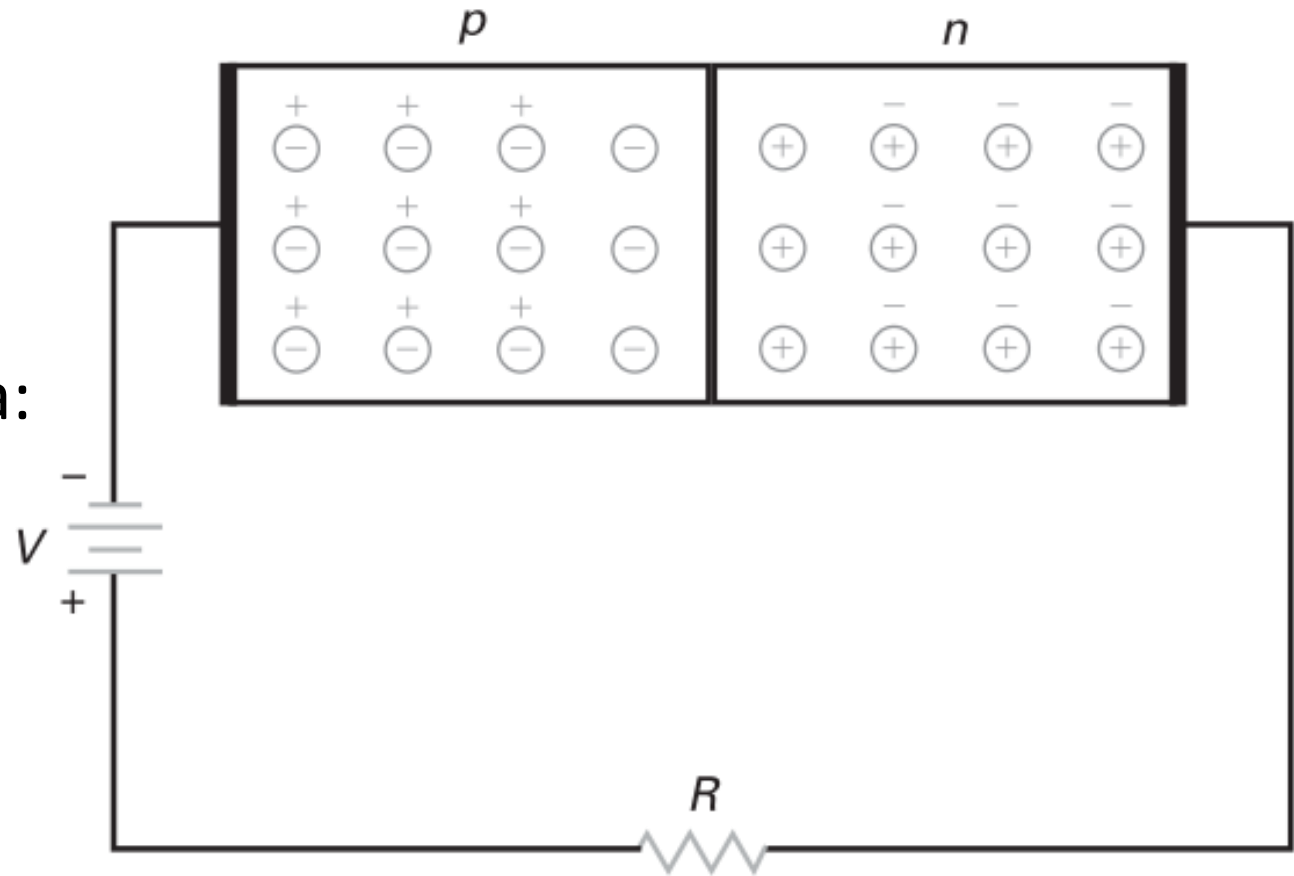
Polarização direta



- Com polarização direta, a fonte 'empurra' os elétrons livres contra a região de depleção.
- Com tensão na fonte menor que a tensão de barreira, os elétrons não conseguem ultrapassar a barreira e não há corrente
- Com tensão na fonte maior que a tensão de barreira, eles conseguem sobrepor a barreira e então o material permite a passagem de corrente elétrica

Polarização Reversa

- Com tensão aplicada de forma reversa:



- A tensão da fonte acaba por intensificar a tensão de barreira, impedindo a passagem de elétrons.
- Nesta condição ainda haverá uma pequena corrente de fuga devido à geração térmica de portadores minoritários

Ruptura reversa

- Quando uma tensão muito alta é aplicada de forma reversa, pode ocorrer o rompimento do cristal semicondutor, inutilizando-o permanentemente, ou então outros efeitos que podem ser aproveitados para aplicações específicas.
- De maneira geral, para os dispositivos comuns, ultrapassando o limite de tensão reversa o material é permanentemente danificado

Revisão - Semicondutores

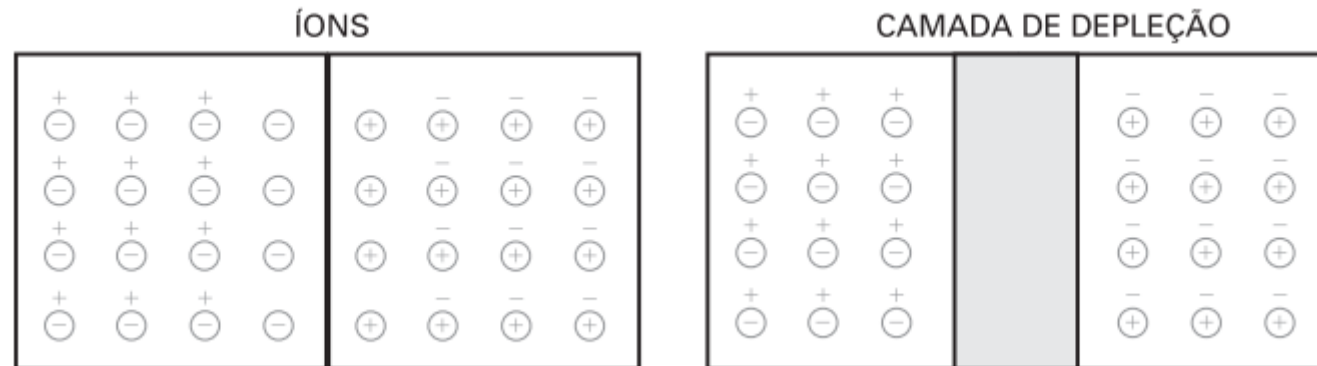
- Cristal intrínseco de silício:
 - formado por uma estrutura com apenas átomos de silício, onde cada átomo compartilha elétrons por meio de ligações covalentes, ficando química e eletricamente estável, formando um material 'isolante'.
- Com a **energia térmica** proveniente da temperatura ambiente, um elétron pode se desprender da camada de valência de se átomo original, tornando-se um **elétron-livre**, e deixando no átomo uma **lacuna** na camada de valência.
- Um elétron-livre pode ocupar essa lacuna, o processo é chamado de **recombinação**.
- Esse movimento de elétrons-livres e lacunas são um caminho de corrente, portanto o silício puro é um isolante ruim.

Revisão - Semicondutores

- Dopagem
 - Processo para aumentar a condutividade do cristal semicondutor
- Um semicondutor dopado é chamado de semicondutor extrínseco
- Acréscimo de impureza **pentavalente** (*átomo doador*) resulta em um **elétron-livre** em excesso (arsênico, antimônio e fósforo)
 - Material **tipo n**
 - Neste material, os elétrons livres são os **portadores majoritários** e as lacunas **portadores minoritários**.
- Acréscimo de impureza **trivalente** (*átomo aceitador*) resulta em uma **lacuna** em excesso (alumínio, boro e gálio)
 - Material **tipo p**
 - Neste material, as lacunas são os **portadores majoritários** e os elétrons livres **portadores minoritários**.

Revisão - Semicondutores

- Junção pn
- Em um cristal com metade do material do tipo n e metade do tipo p, a interface entre os materiais forma a junção pn, nesta região se forma a **camada de depleção** devido ao processo de recombinação dos portadores.

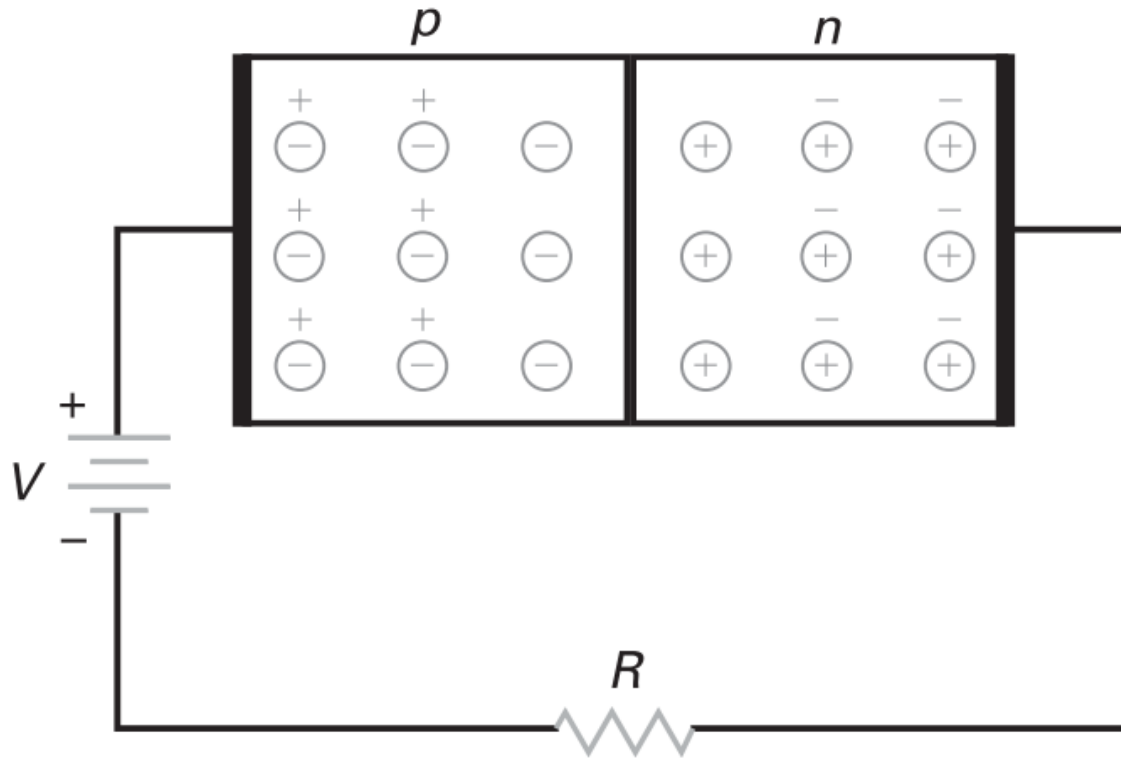


o campo elétrico entre os íons é equivalente a uma diferença de potencial chamada de **barreira de potencial**

Semicondutores – Diodo

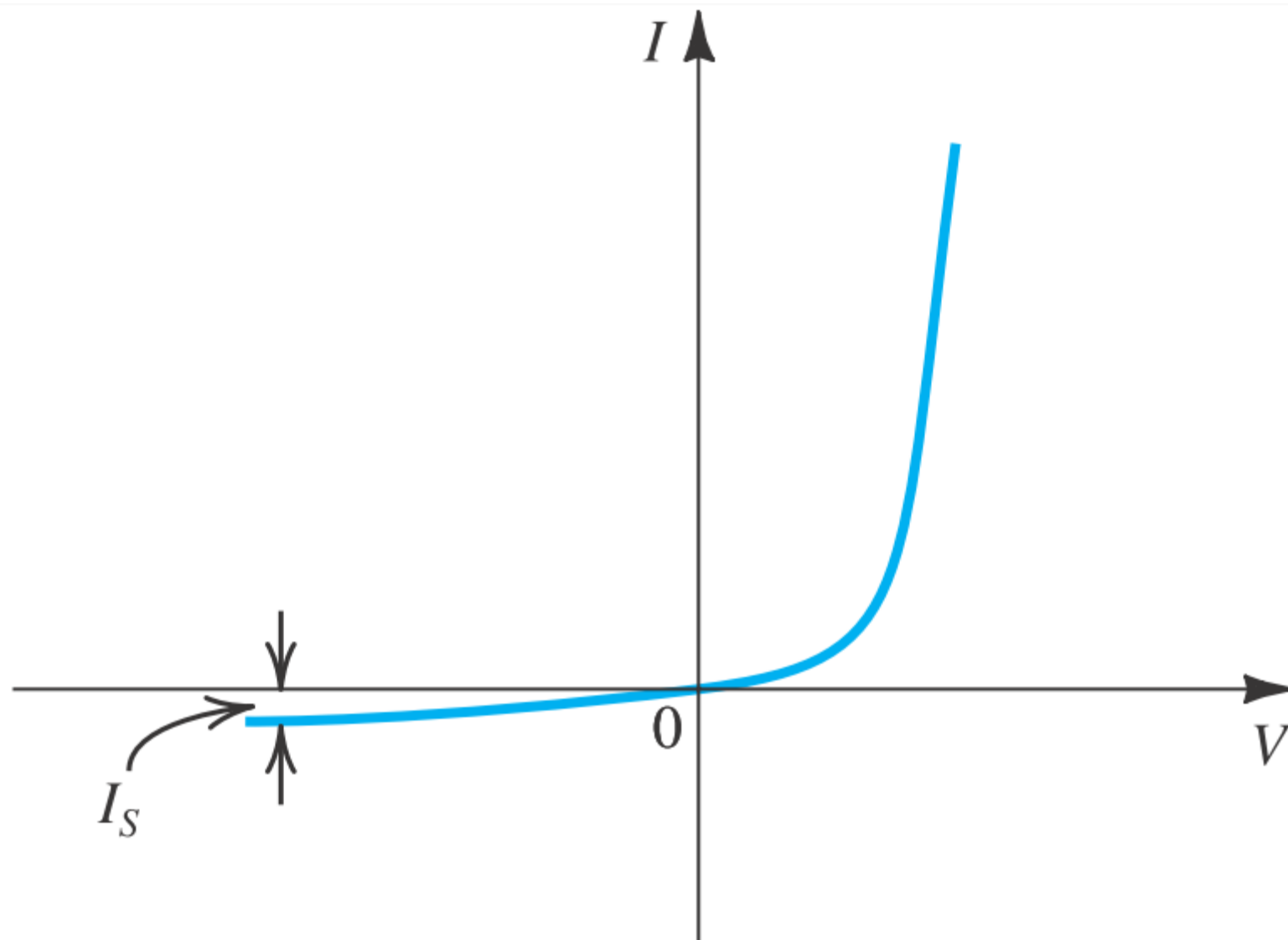
junção de dois eletrodos

- A barreira de potencial na camada de depleção na região de junção dos materiais tipo n e tipo p interage com o fluxo de portadores quando o material é polarizado entre dois terminais



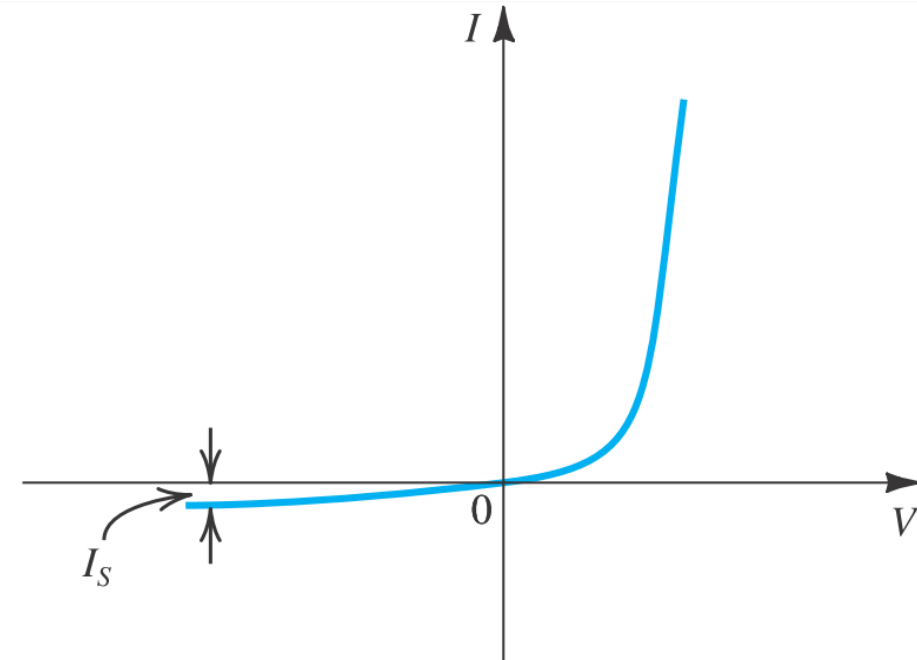
REVER CAPÍTULO 2
Malvino Eletrônica 1
Seções 2-9 a 2-14

Aplicando tensão numa junção pn



Aplicando tensão numa junção pn

- Este comportamento não linear de relação tensão – corrente dá origem ao mais simples componente semicondutor, o **DIODO**
- O diodo tem por característica permitir passagem de corrente em apenas um sentido

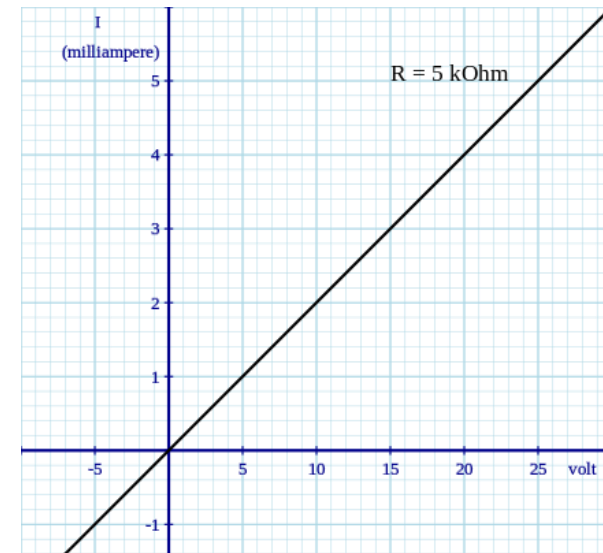


Diodos

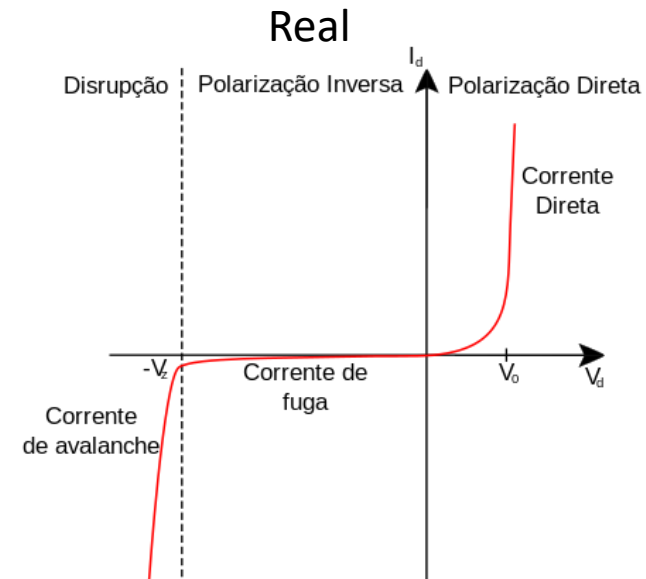
- Resistor – Dispositivo linear



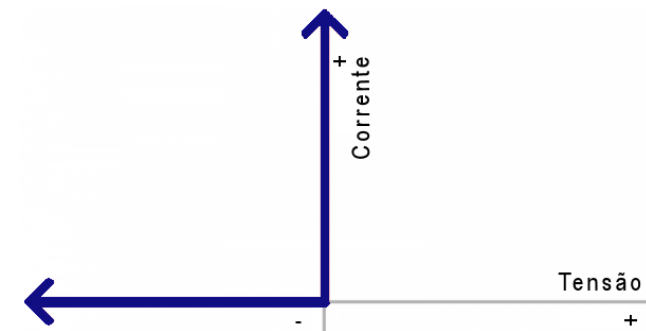
Real/Ideal



- Diodo – Dispositivo não-linear

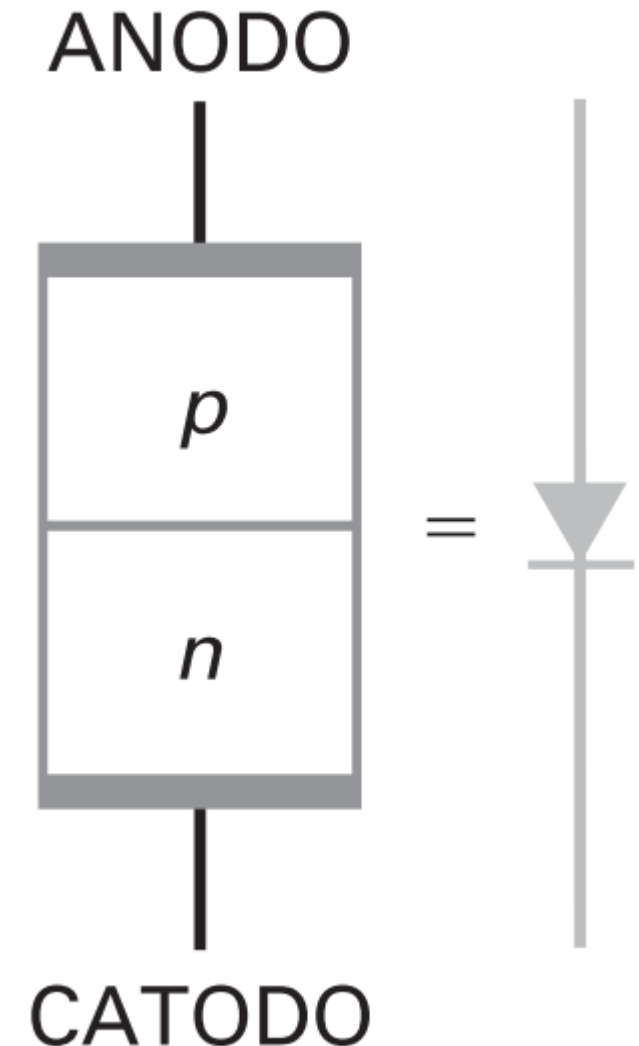


Ideal



Diodo de junção – Conceitos básicos

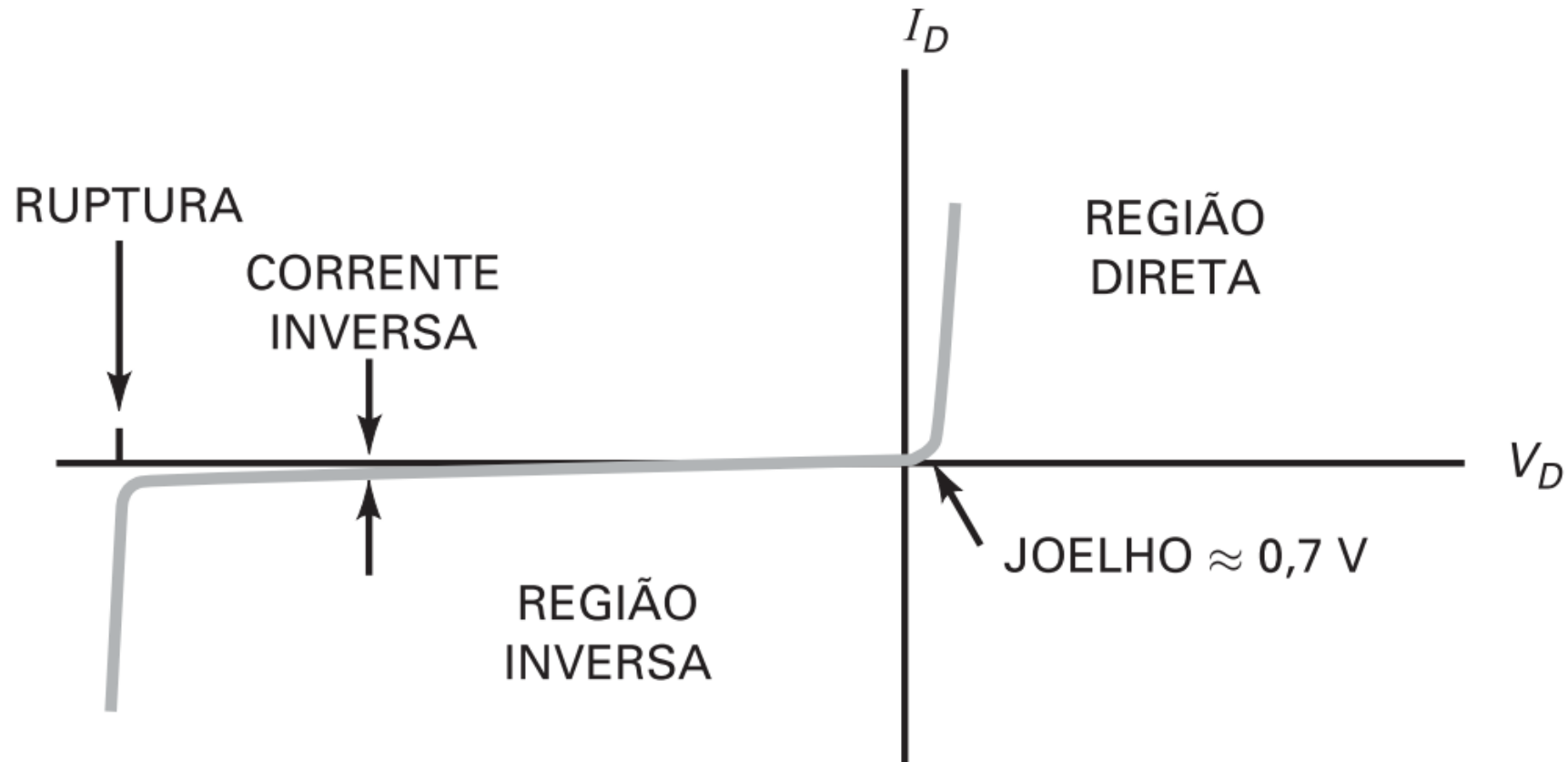
- O diodo é um elemento de circuito que permite a passagem de corrente elétrica em apenas um sentido
- Quando polarizado diretamente → Permite
 - Ideal: curto-circuito
- Quando polarizado reversamente → Bloqueia
 - Ideal: circuito aberto



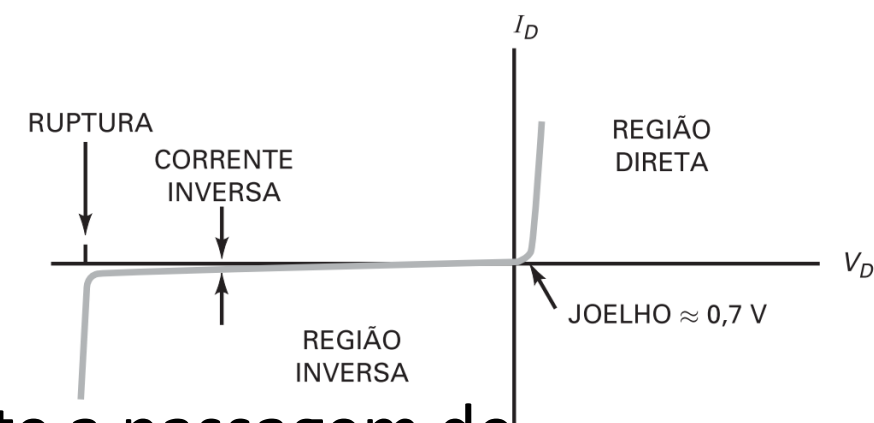
Diodo – curva de operação

- O comportamento real do diodo apresenta três regiões distintas:

Região Direta – Região Reversa - Ruptura



Região Direta



- Quando polarizado diretamente o diodo permite a passagem de corrente, a partir da tensão suficiente para vencer a barreira na junção.
- Este potencial é chamado de **tensão de joelho**, em referencia à forma que a curva se dobra neste ponto
- Em diodos de silício esta tensão é aproximadamente 0,7V
- A corrente aumenta com uma razão exponencial, sendo limitada pelo comportamento da junção semicondutora
- Por simplicidade este comportamento pode ser aproximado ao de uma resistência

Região Reversa/Inversa e Ruptura

- Quando polarizado reversamente o diodo bloqueia a passagem de corrente
- Quando a tensão reversa excede o limite de projeto o diodo entra em ruptura e pode ser destruído

MAXIMUM RATINGS (T _A = 25 °C unless otherwise noted)									
PARAMETER	SYMBOL	1N4001	1N4002	1N4003	1N4004	1N4005	1N4006	1N4007	UNIT
Maximum repetitive peak reverse voltage	V _{RRM}	50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum RMS voltage	V _{RMS}	35	70	140	280	420	560	700	V
Maximum DC blocking voltage	V _{DC}	50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum average forward rectified current 0.375" (9.5 mm) lead length at T _A = 75 °C	I _{F(AV)}	1.0							A

Potência em um diodo

- A potencia dissipada por um diodo é o produto tensão x corrente sobre ele
- O calor gerado pode destruir o cristal semicondutor
- Os *datasheets* dos componentes trazem o valor de corrente máxima ou potência máxima suportada

MAXIMUM RATINGS (T _A = 25 °C unless otherwise noted)									
PARAMETER	SYMBOL	1N4001	1N4002	1N4003	1N4004	1N4005	1N4006	1N4007	UNIT
Maximum repetitive peak reverse voltage	V _{RRM}	50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum RMS voltage	V _{RMS}	35	70	140	280	420	560	700	V
Maximum DC blocking voltage	V _{DC}	50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum average forward rectified current 0.375" (9.5 mm) lead length at T _A = 75 °C	I _{F(AV)}	1.0							A