

E204

FÍSICA DOS SEMICONDUTORES

1.1. Modelo Atômico de Bohr

- No ano de 1913, Bohr aplicou ao estudo do átomo a teoria dos quanta, proposta por Max Planck em 1905.
- Conforme essa teoria, a energia eletromagnética é múltipla de um valor fundamental denominado *quantum*.
- A lei de Planck estabelece que um quantum de energia de qualquer irradiação eletromagnética é proporcional a frequência dessa irradiação, ou seja

$$E_g = h.f$$

onde f corresponde à frequência de irradiação em hertz e $h = 6,626 \times 10^{-34} J.s$ é a constante de Planck.

Max Karl Ernst Ludwig Planck

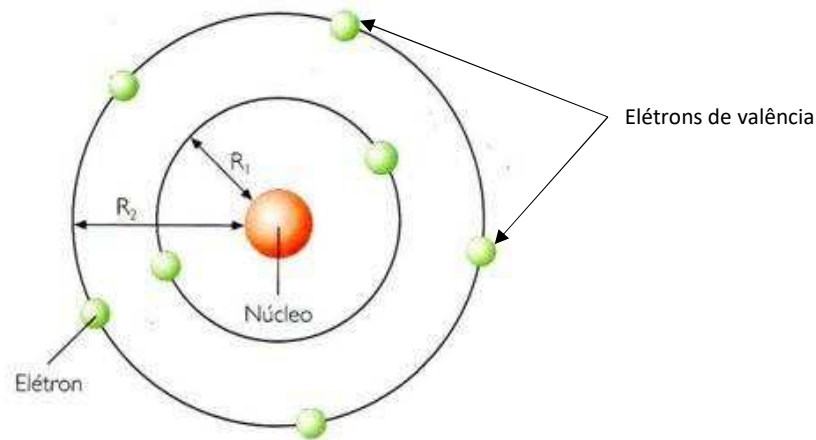


Niels Henrik David Bohr



Bohr relaciona a distribuição dos elétrons na eletrosfera com a sua quantidade de energia que é liberada na forma de “pacotes”, não na forma contínua. Esses “pacotes” de energia ficaram conhecidos como **quantum de energia**.

1.1. Modelo Atômico de Bohr



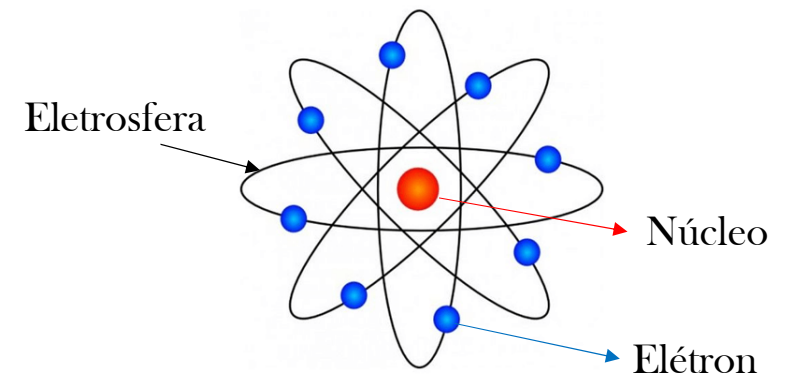
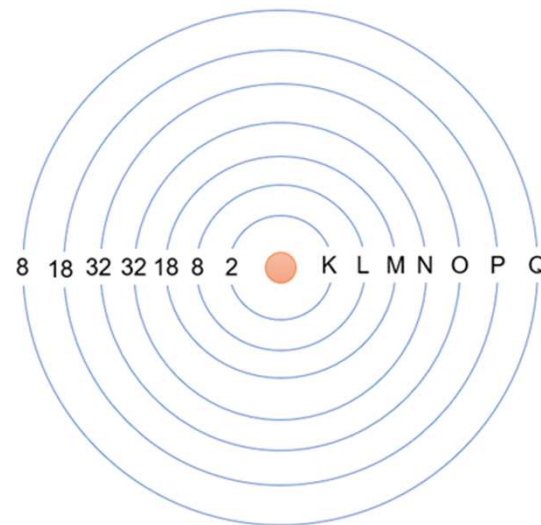
Postulados de Bohr (Quatro Postulados que permitem identificar o comportamento dos elétrons no átomo)

1. Os elétrons se movimentam em órbitas circulares estáveis ao redor do núcleo, denominadas órbitas estacionárias, e, em quanto em órbita, não emitem nenhuma energia.
2. Ao absorver energia o elétron afasta-se do núcleo e ocupa uma órbita estacionária correspondente ao seu novo valor de energia. Se um elétron emite (perde) uma certa quantidade de energia correspondente a diferença entre dois níveis, ou seja, um quantum de energia, ele ocupará uma camada mais interna do átomo.
3. O quantum de energia necessário para deslocar um elétron é inversamente proporcional à distância entre a posição do elétron e o centro do núcleo do átomo.
4. A facilidade de ativação de um elétron, com sua mudança de energia, varia dentre os átomos dos diferentes elementos da natureza.

1.1. Modelo Atômico de Bohr

- Cada órbita estacionária é denominada de estado estacionário e pode ser designada por letras:
K, L, M, N, O, P, Q
- Cada camada pode apresentar um número máximo de elétrons

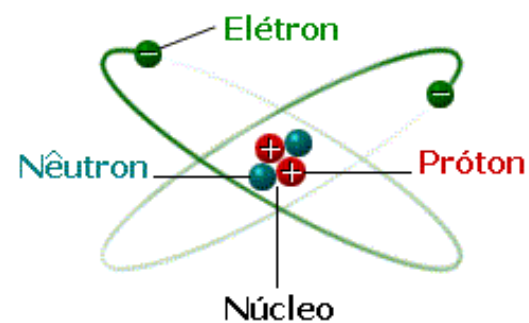
Nível (n)	Camada	Número máximo de Elétrons
1	K	2
2	L	8
3	M	18
4	N	32
5	O	32
6	P	18
7	Q	8



- Cada nível de energia (camadas eletrônicas) é caracterizado por um número quântico (n), que pode assumir valores inteiros: 1,2,3,4,5,6,7.
- Alta energia nas órbitas maiores. Energia que podem levar elétrons para órbitas maiores são: Calor, luz e tensão.

1.1. Modelo Atômico de Bohr

Partículas	Massa Relativa	Carga
Nêutron	1	0
Próton	1	$+ e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$
Elétron	$1/1836$	$- e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$



1.1. Modelo Atômico de Bohr

- Em uma estrutura atômica isolada existem níveis discretos de energia, associados à órbita do elétron.
- Os Gaps de energia correspondem aos intervalos existentes entre os níveis discretos de energia.
- A energia associada a cada elétron é medida em elétron volts, o que corresponde a energia absorvida por um elétron submetido a uma diferença de potencial de 1 [V].

$$W = Q \times V = 1,6 \times 10^{-19} [\text{C}] \times 1 [\text{V}] = 1,6 \times 10^{-19} [\text{J}] = 1 [\text{eV}]$$

- A energia necessária para mover um elétron de um nível de energia para outro é dada por

$$E_g = \frac{h \cdot c}{\lambda} = h \cdot f [\text{J}].$$

Onde:

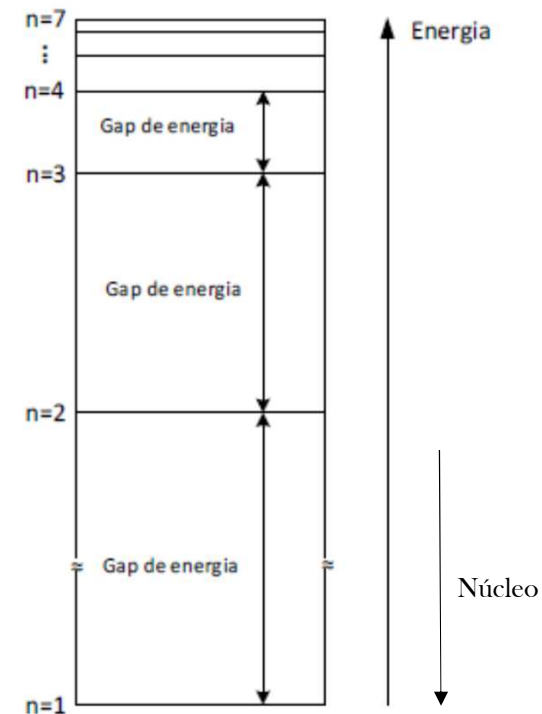
h = Constante de Planck = $6,626 \times 10^{-34} [\text{J} \cdot \text{s}]$

c = Velocidade da Luz = $3 \times 10^8 [\text{m} / \text{s}]$

λ = Comprimento de onda da irradiação [m]

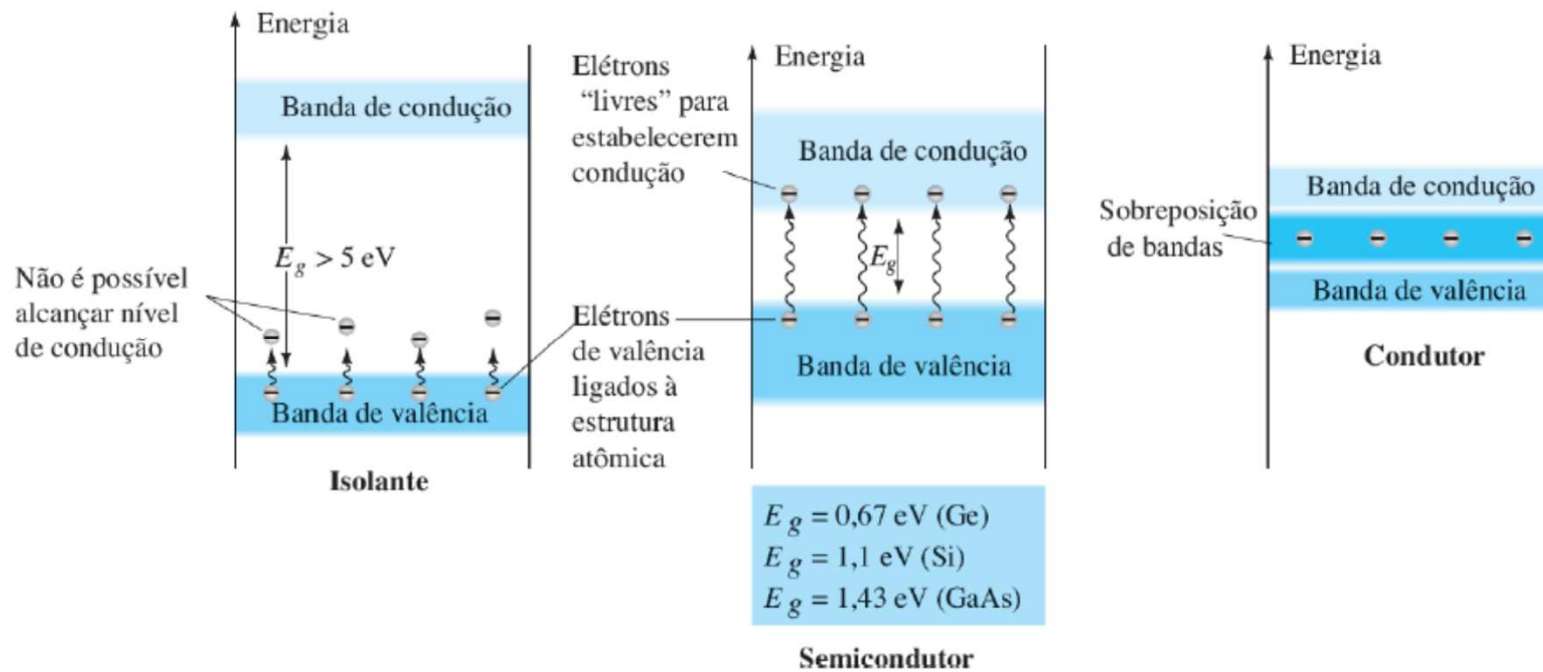
f = Frequência em [Hz]

https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=atom_vodik&l=pt



1.1. Modelo Atômico de Bohr

- Os materiais podem ser classificados quanto a sua condutibilidade elétrica em Isolantes, Condutores ou Semicondutores.

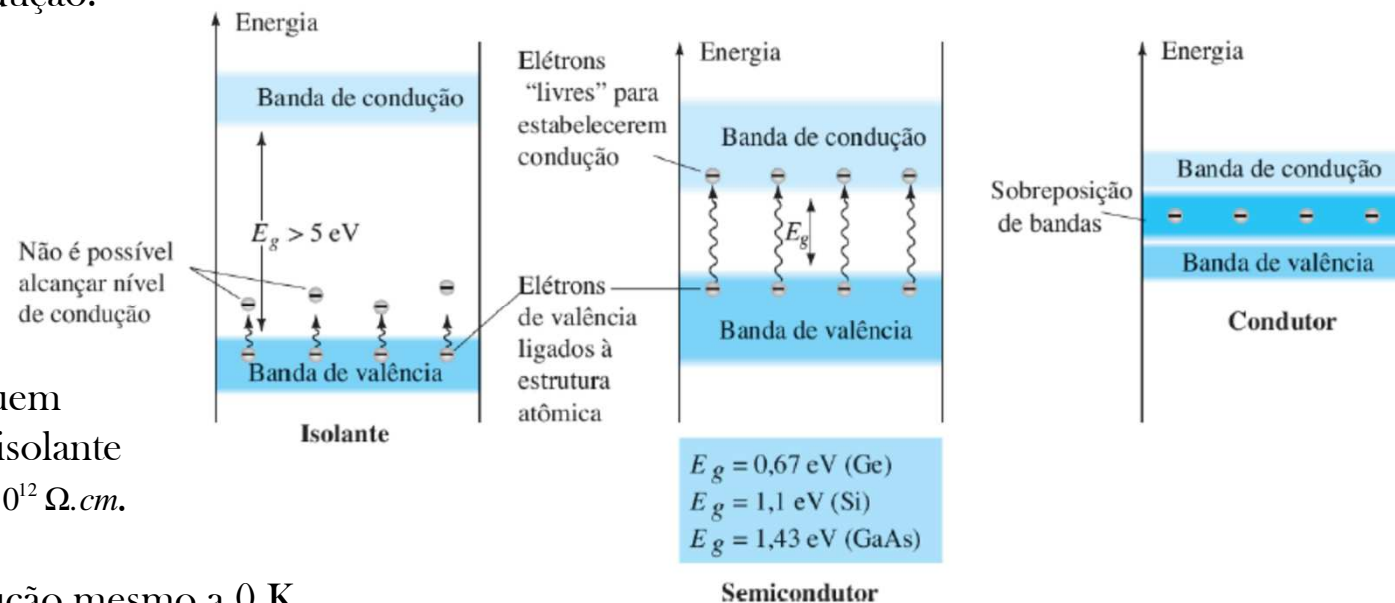


- A 0 K ou - 273,15° C, todos os elétrons da banda de valência dos semicondutores estão presos à camada mais externa do átomo, denominada **Banda de Valência**.
- À temperatura ambiente (300 K ou 25° C), um grande número de elétrons de valência adquirem energia suficiente para sair da banda de valência e atravessar o Gap de energia (Banda Proibida), definido por E_g , e entrar na **Banda de Condução**.

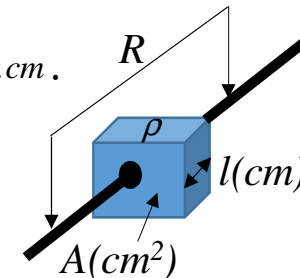
1.1. Modelo Atômico de Bohr

Energia necessária para chegar a banda de condução:

- Silício (Si): $E_g = 1,1$ [eV]
- Germânio (Ge): $E_g = 0,67$ [eV]
- Arseneto de Gálio (GaAs): $E_g = 1,43$ [eV]
- **Isolante:** $E_g = 5$ [eV] praticamente não possuem elétrons livres na banda de condução. A Mica, isolante térmico possui uma resistividade na ordem de $10^{12} \Omega.cm$.
- **Condutor:** Tem elétrons na banda de condução mesmo a 0 K. Isso ocorre devido a sobreposição das bandas de valência e condução. O cobre que é um condutor elétrico, possui uma resistividade na ordem de $10^{-6} \Omega.cm$.

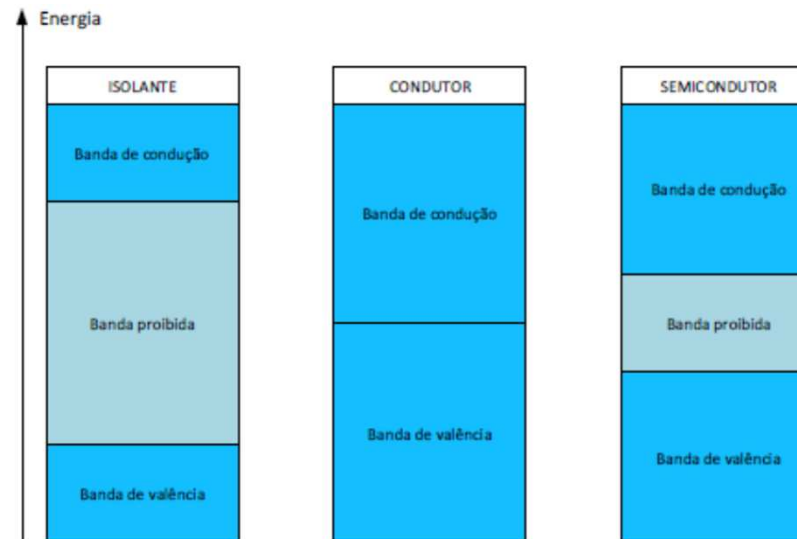


$$\rho = \frac{R \times A}{l} = \frac{[\Omega] \times [cm^2]}{[cm]} = [\Omega.cm]$$



1.1. Modelo Atômico de Bohr

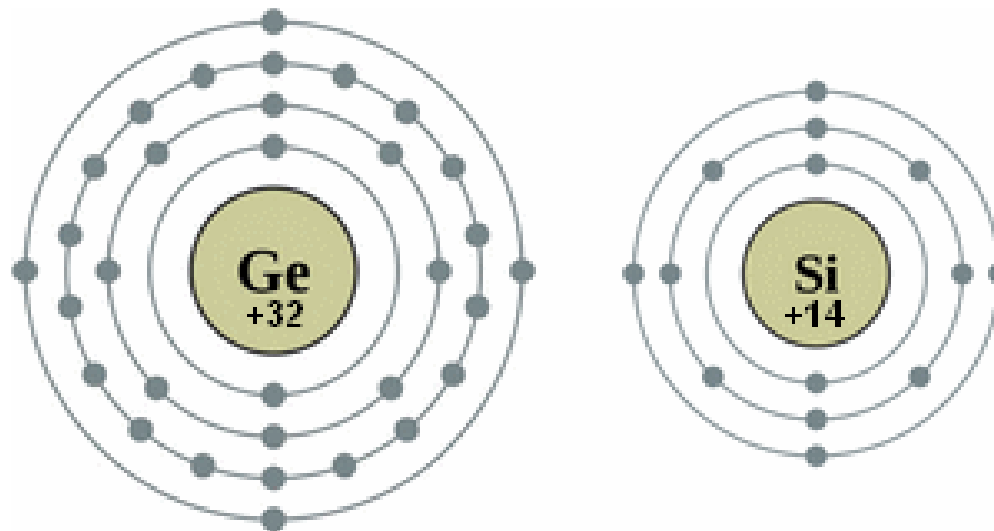
- **Semicondutor:** Possuem bandas proibidas inferiores a 2 [eV], o que resulta em resistividade menor que a dos isolantes e maior do que a dos condutores. O silício, semicondutor muito empregado na confecção de dispositivos eletrônicos, possui uma resistividade de aproximadamente $50\text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$.
- Nos materiais semicondutores, a banda proibida revelará a sensibilidade de cada material às variações de temperatura.
- No caso do Ge, o número de elétrons que absorvem energia térmica e entram na banda de condução é maior do que no Si, devido ao menor valor do Gap de energia necessária para vencer a Banda proibida.



1.2. Rede Cristalina de Material Semicondutor

- Os materiais semicondutores in natura se caracterizam por serem tetravalentes, ou seja, possuem 4 elétrons na Banda de valência.
- O silício (Si), número atômico 14, e o Germânio (Ge), número atômico 32, são os materiais semicondutores mais usados na construção de dispositivos eletrônicos.

Estrutura Atômica do Ge e do Si



Camada de valência
(4 elétrons de valência)

1.2. Rede Cristalina de Material Semicondutor

Tabela Periódica

	1A	2A	3B	4B	5B	6B	7B	8B	1B	2B	3A	4A	5A	6A	7A	8A	<< grupos	Famílias	IUPAC		
	1															18					
1	H 1	2	Símbolo 28,0855(3) CAS-ID 7440-21-3 Si 14										13	14	15	16	17	He 2			
2	Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10			
3	Na 11	Mg 12	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18			
4	K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36			
5	Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54			
6	Cs 55	Ba 56	*	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86			
7	Fr 87	Ra 88	~	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Ds 110	Rg 111	Cn 112	Uut 113	Uuq 114	Uup 115	Uuh 116	Uus 117	Uuo 118			
6	*	La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71					
7	~	Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103					

Legenda

Metais Alcalinos

Metais Alcalino - Terrosos

Metais de Transição

Outros Metais

Não - Metais (Ametais)

Ametais Calcogênios

Ametais Halogênios

Gases Nobres

Série dos Lantanídeos

Série dos Actinídeos

Hidrogênio

Sem dados

Estado às CNTP

Azul para Líquidos

Preto para sólidos

Vermelho para gasosos

Trivalentes: Boro, Alumínio, Gálio, Índio, Tálio, Ununtrio

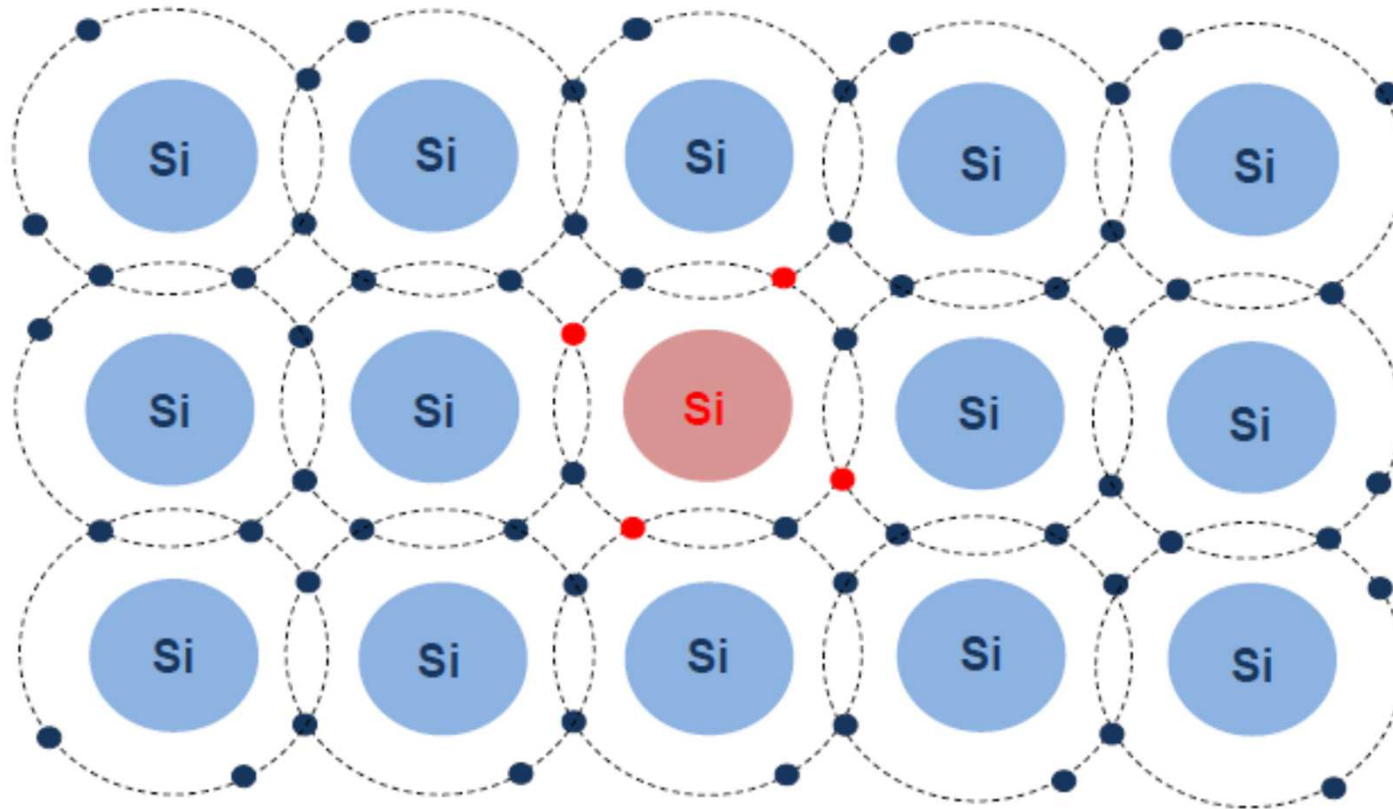
Tetravalentes: Carbono, Silício, Germânio, Estanho, Chumbo e Ununquádium

Pentavalentes: Nitrogênio, Fósforo, Arsênio, Antimônio, Bismuto, Ununpentio

1.2. Rede Cristalina de Material Semicondutor

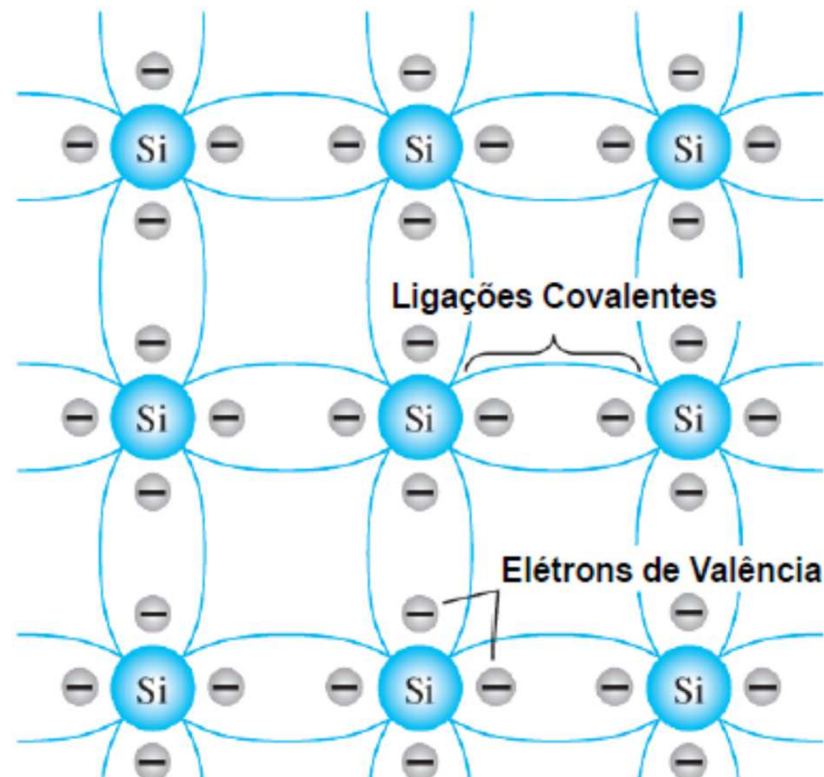
Rede Cristalina do Si Intrínseco (Modelo completo)

Semicondutor intrínseco é aquele encontrado na natureza na sua forma mais pura, ou seja quando não têm dopagem, têm apenas átomos do semicondutor-base.



1.2. Rede Cristalina de Material Semicondutor

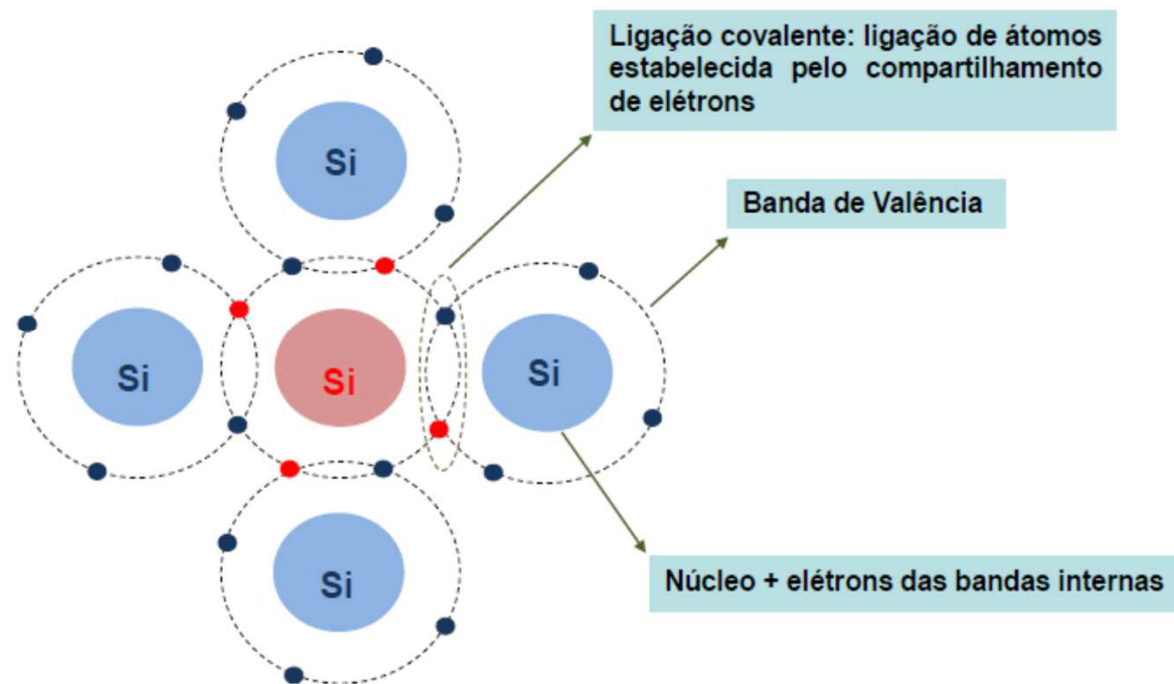
Rede Cristalina do Si Intrínseco (Modelo completo)



- A ligação entre átomos estabelecida pelo compartilhamento de elétrons é chamada de ligação covalente.

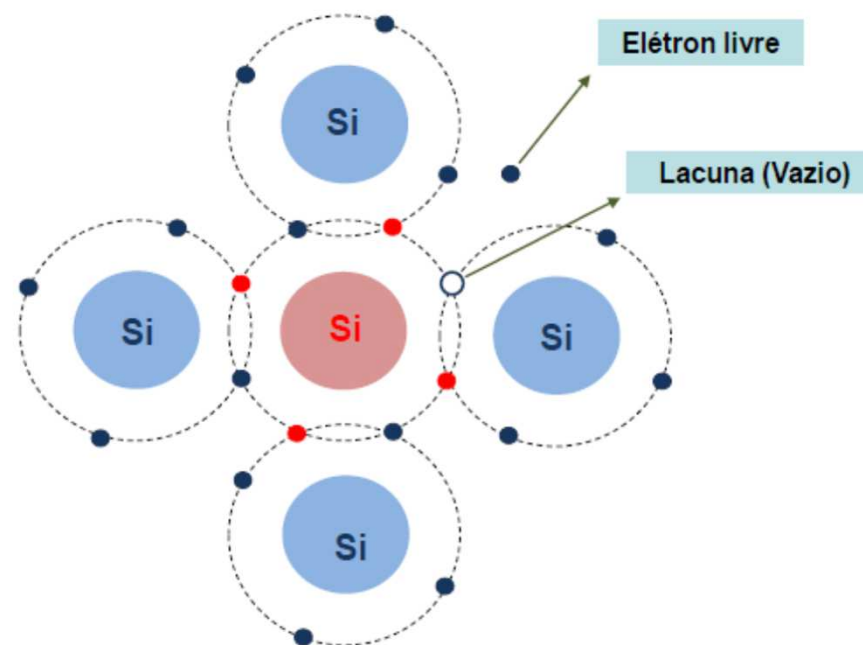
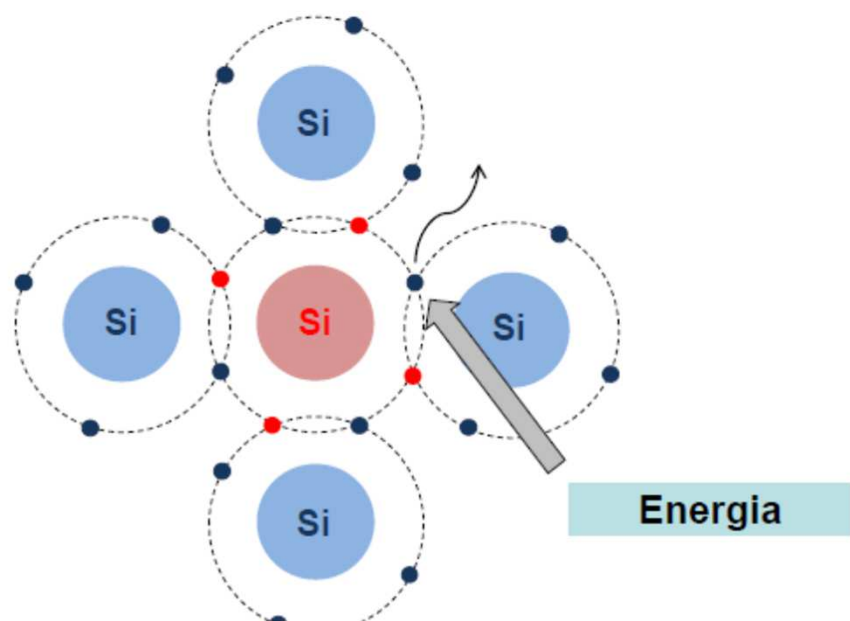
1.2. Rede Cristalina de Material Semicondutor

Rede cristalina do Si intrínseco



1.2. Rede Cristalina de Material Semicondutor

Geração do par Elétron - Lacuna



1.2. Rede Cristalina de Material Semicondutor

Estado Livre

- À temperatura ambiente, elétrons da banda de valência absorvem energia de fontes externas e quebram ligações covalentes, assumindo um estado livre.
- Os elétrons livres, denominados portadores intrínsecos, se tornam sensíveis a campos elétricos externos podendo produzir corrente elétrica.
- O número de portadores intrínsecos de um semicondutor é importante na determinação da sua utilização, entretanto, outro fato importante é a mobilidade relativa desses portadores intrínsecos dos portadores livres se deslocarem por todo o semicondutor.
- A temperatura ambiente, o número de portadores intrínsecos por centímetro cúbico no Ge é 1,67 mil vezes maior do que no Si e 14,7 milhões de vezes maior do que GaAs (Arseneto de Gálio).
- Portadores intrínsecos por cm^3 , à temperatura ambiente:
 - GaAs: $1,7 \times 10^6$ portadores intrínsecos (elétrons livres)
 - Si: 15×10^9 portadores intrínsecos (elétrons livres)
 - Ge: 25×10^{12} portadores intrínsecos (elétrons livres)

1.2. Rede Cristalina de Material Semicondutor

Mobilidade Relativa

- Os portadores livres no GaAs têm mobilidade relativa maior do que 5 vezes com relação ao Si.
- O resultado é que os dispositivos eletrônicos construídos com GaAs podem ser 5 vezes mais rápidos do que os construídos com Si.
- A mobilidade relativa dos portadores livres no Ge é maior de 2 vezes do que no Si.

Semicondutor	Mobilidade Relativa (cm ² /V.s)
Si	1500
Ge	3900
GaAs	8500

1.2. Rede Cristalina de Material Semicondutor

Materiais Semicondutores: Ge, Si, GaAs

1947

- Os primeiros transistores. Fabricados usando o Ge, pois é fácil de refinar até se obter níveis elevados de pureza.
- Porém, transistores de Ge tem baixa confiabilidade, pois são muito sensíveis a temperatura em razão do valor baixo de Gap de energia necessário para gerar portadores intrínsecos.

1954

- Os primeiros transistores de Si, menos sensíveis a temperatura são lançados.
- Porém, com o surgimento de circuitos operando em velocidades cada vez maiores, a mobilidade relativa do Si passou a limitar sua utilização em projetos operando em altas frequências ou altas velocidades de comutação.

1.2. Rede Cristalina de Material Semicondutor

Materiais Semicondutores: Ge, Si, GaAs

1970

- Os primeiros transistores GaAs.
- Menos sensível à temperatura e com velocidade de operação 5 vezes superior ao Si.
- A limitação do semicondutor de GaAs está no custo de fabricação, o que, atualmente, limita o seu uso a projetos de circuitos integrados de alta velocidade.
- Atualmente o uso do Ge, por ser altamente sensível a temperatura, encontra aplicação em número limitado de áreas. Por ter mobilidade relativa melhor do que o Si, ainda são utilizados em aplicações de rádio frequência de alta velocidade.
- O Si, menos sensível a temperatura do que o Ge e com mobilidade relativa inferior a do GaAs, atualmente, é líder em materiais semicondutores para componentes eletrônicos e CIs.

1.3. Condução no Semicondutor

Ionização

- Processo pelo qual um átomo perde ou ganha elétrons.

Recombinação

- A ionização térmica resulta na geração de pares elétrons-lacuna.
- Os elétrons e lacunas livres se movem aleatoriamente através da estrutura do cristal e, nesse processo, alguns elétrons podem preencher algumas lacunas, o que denomina-se recombinação.
- Da recombinação resulta o desaparecimento de pares elétrons-lacuna livres.
- No equilíbrio térmico, a taxa de recombinação é igual à taxa de ionização.

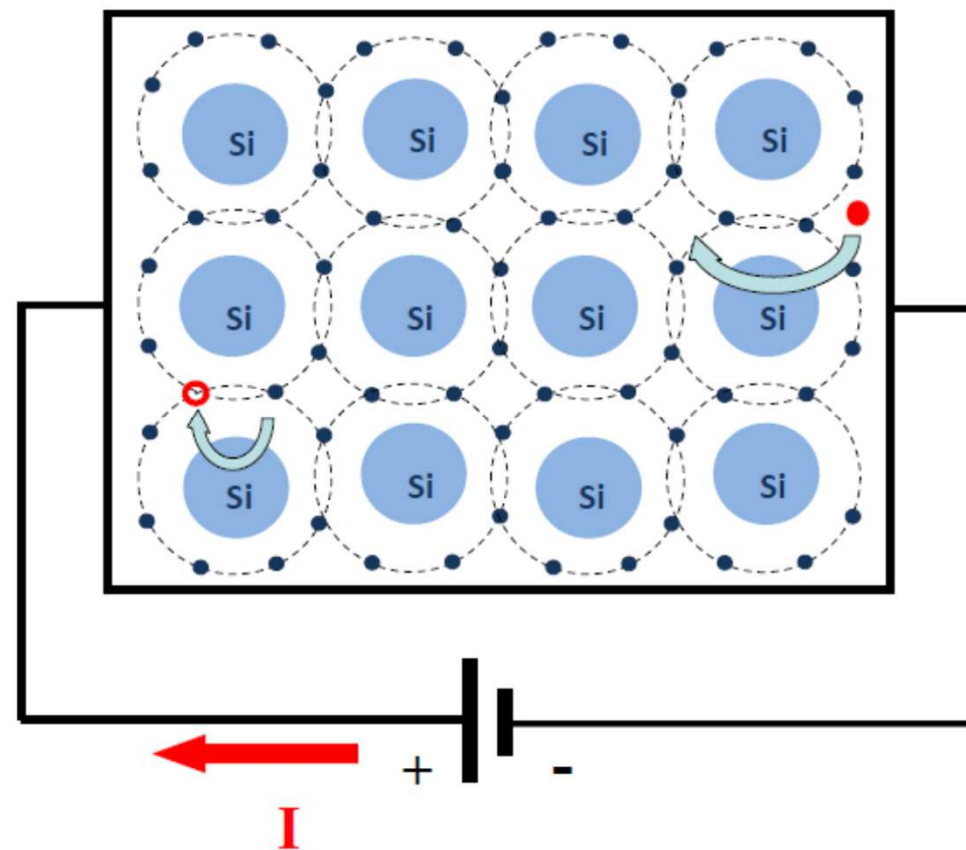
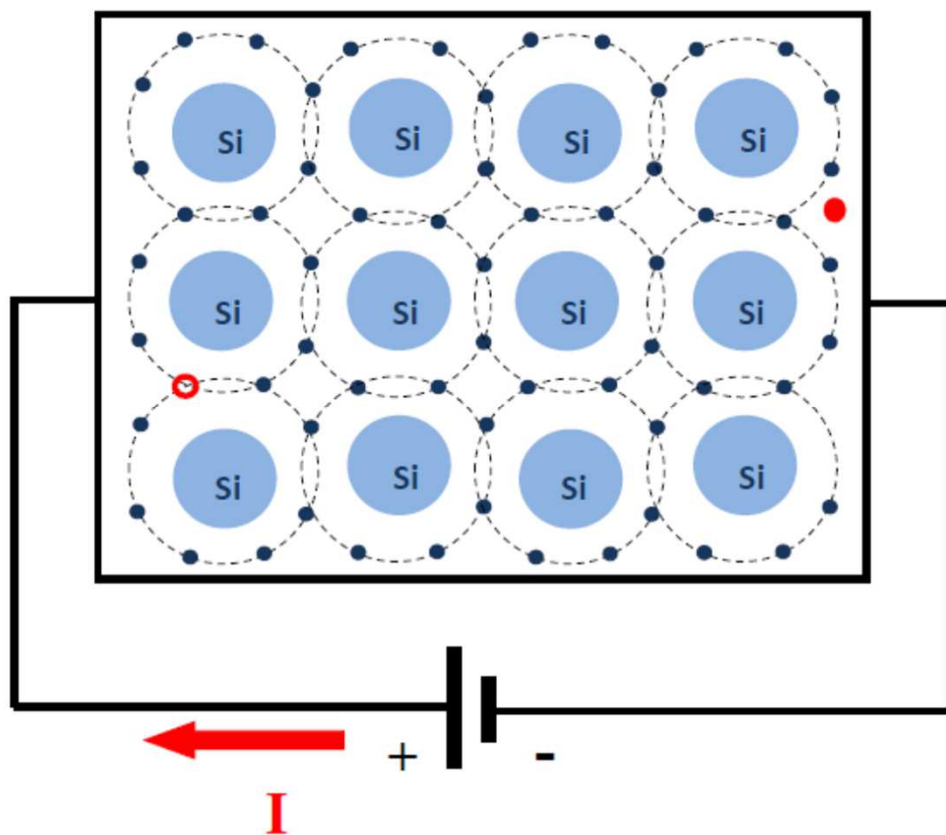
1.3. Condução no Semicondutor

Difusão e Deriva

- São mecanismos através dos quais elétrons e lacunas se movimentam através de uma cristal.
- **Difusão:** Corresponde a um fluxo de portadores de cargas (elétrons ou lacuna) de uma região de maior para uma de menor concentração de cargas, gerando um fluxo líquido de cargas, ou seja, corrente elétrica.
- **Deriva:** Corresponde a um movimento de cargas originado a partir da aplicação de um campo elétrico.

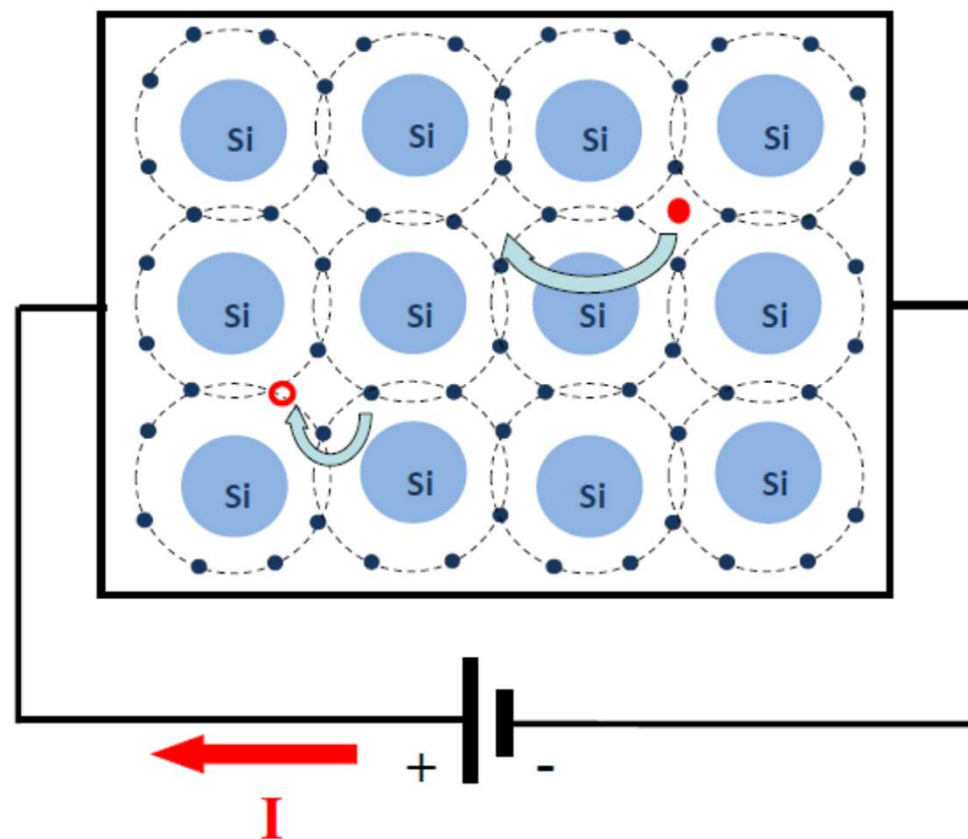
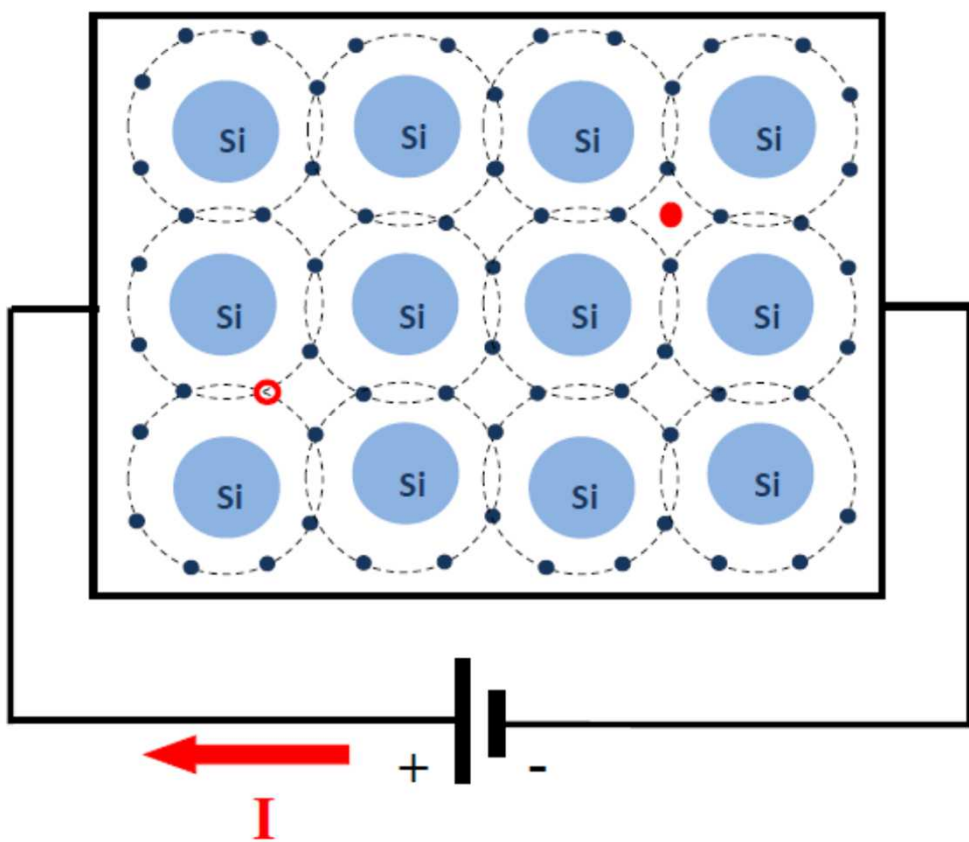
1.3. Condução no Semicondutor

Corrente no Semicondutor Intrínseco



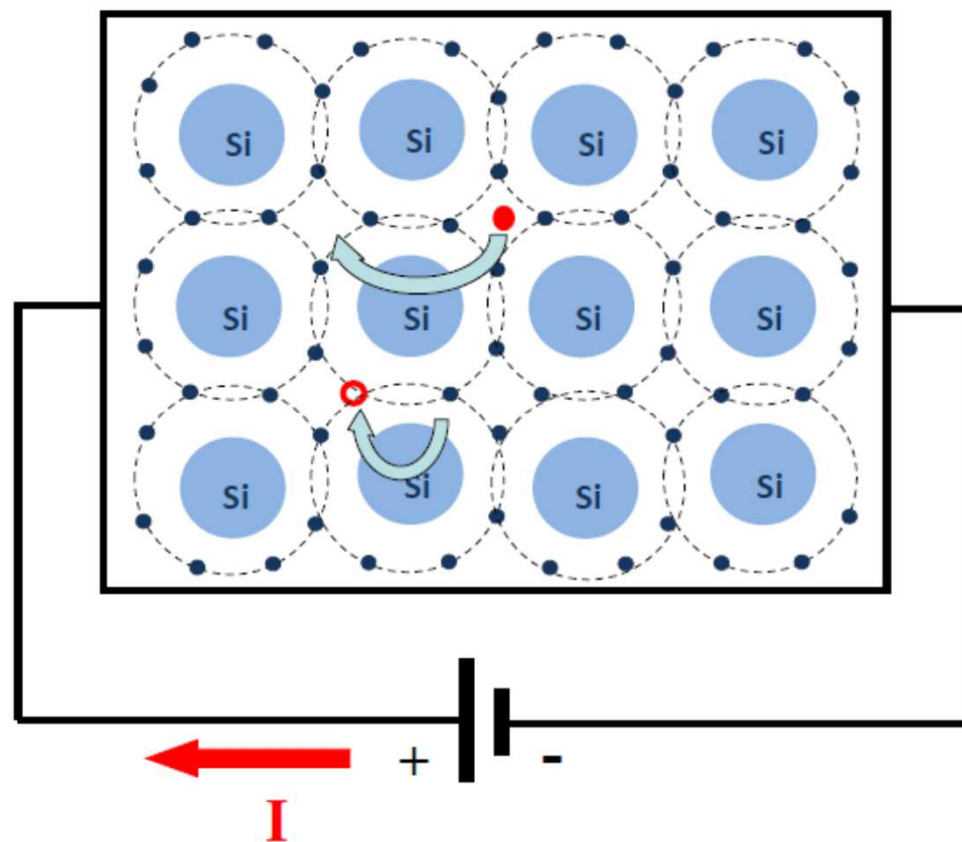
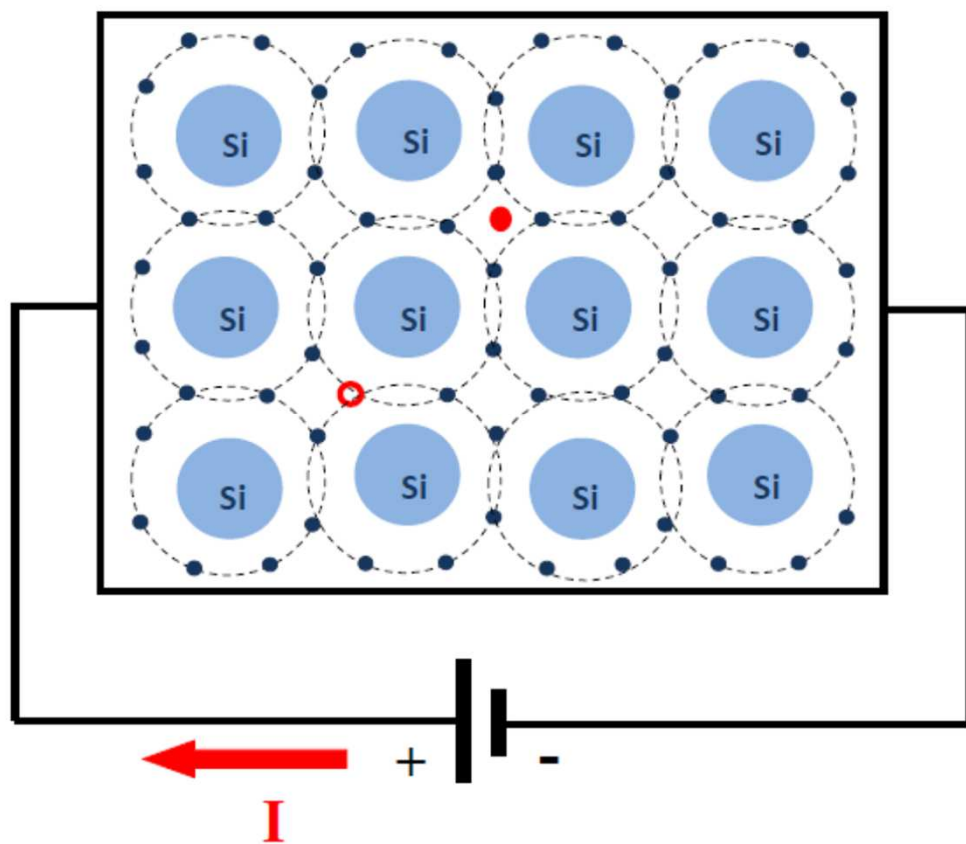
1.3. Condução no Semicondutor

Corrente no Semicondutor Intrínseco



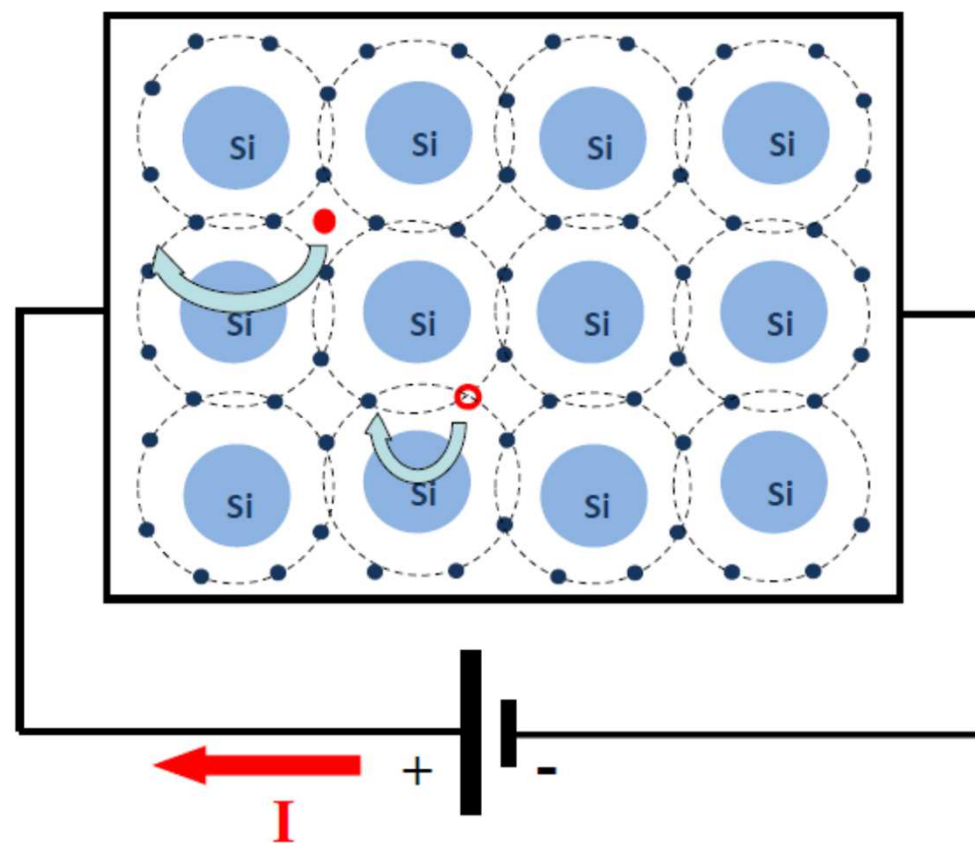
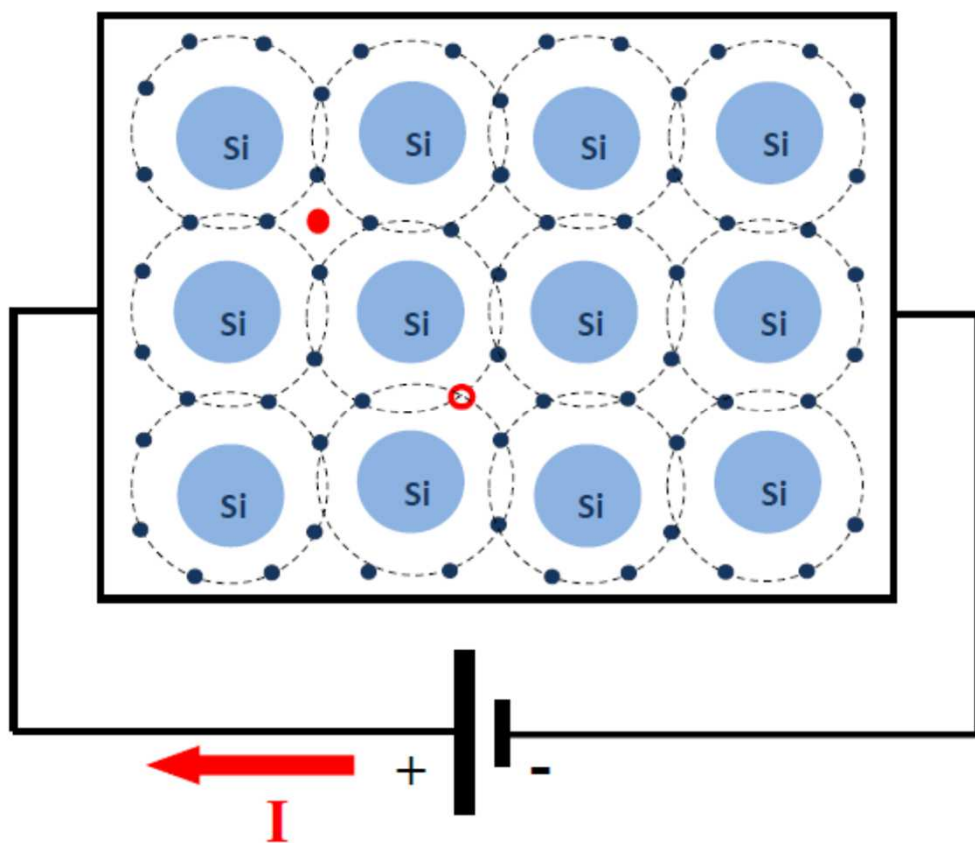
1.3. Condução no Semicondutor

Corrente no Semicondutor Intrínseco



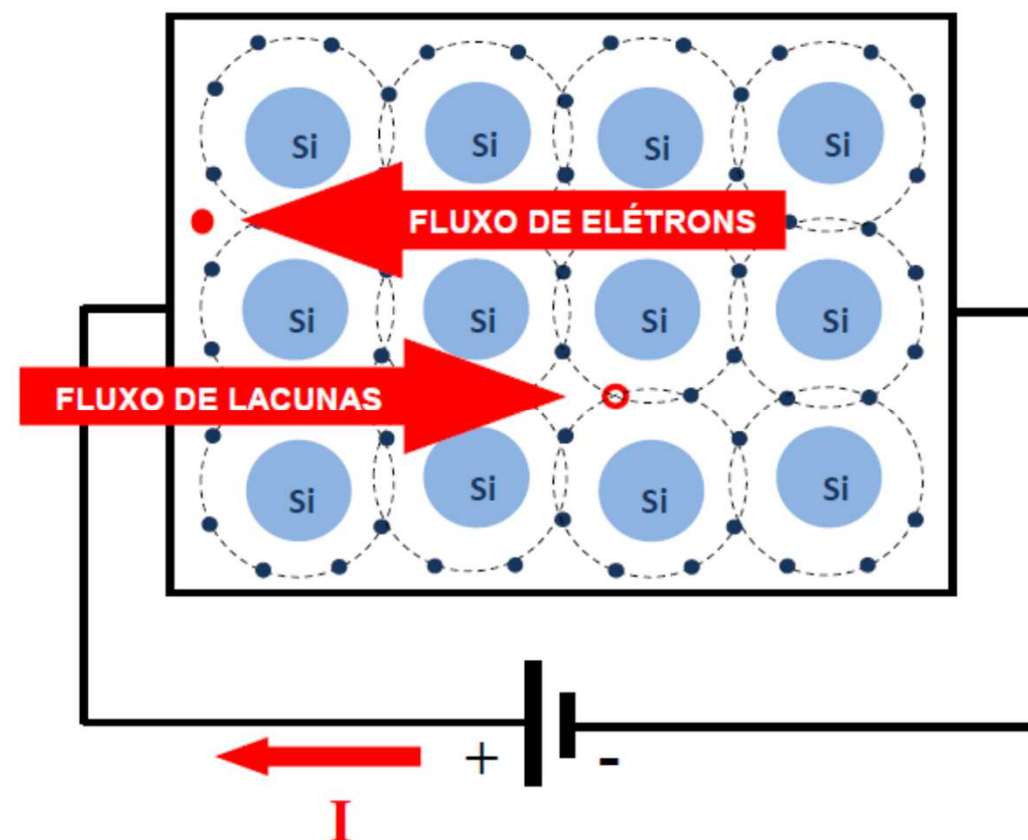
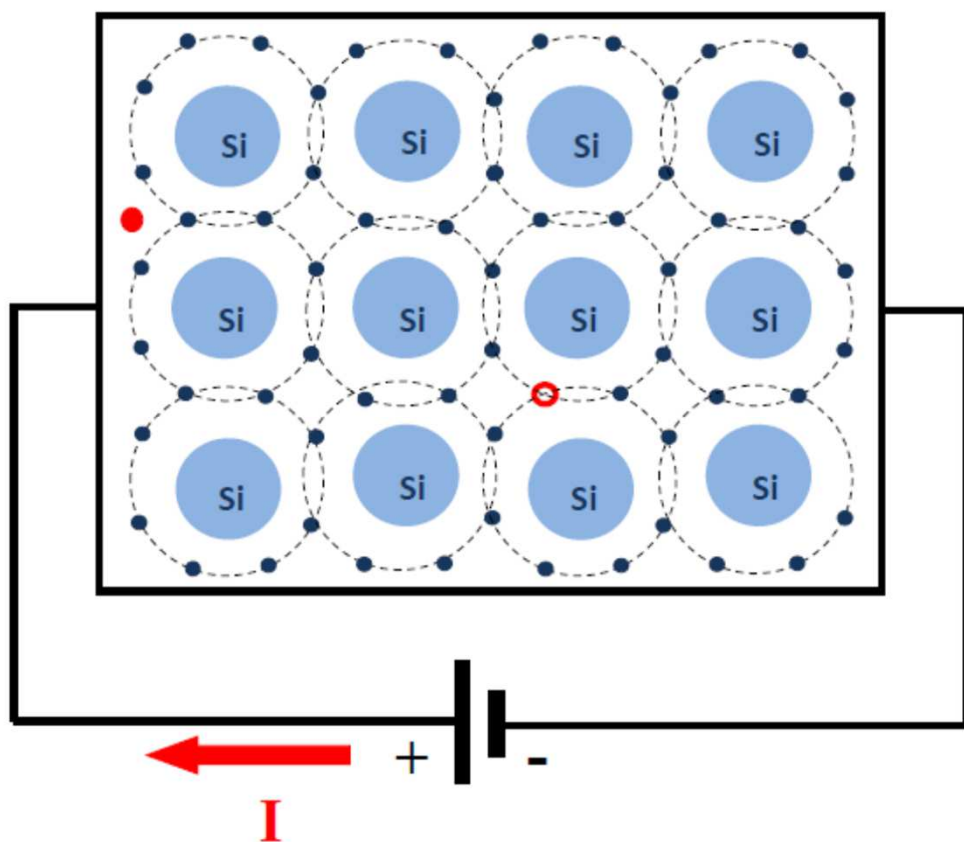
1.3. Condução no Semicondutor

Corrente no Semicondutor Intrínseco



1.3. Condução no Semicondutor

Corrente no Semicondutor Intrínseco



1.4. Dopagem do Semicondutor

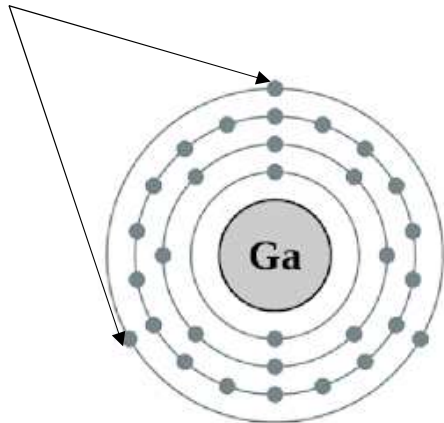
Material Intrínseco e Material Extrínseco

- **Material Intrínseco:** Material semicondutor livre de impurezas.
- **Material Extrínseco:** Material semicondutor submetido ao processo de dopagem.
 - **Tipo n**
 - Obtido a partir de impurezas pentavalentes (5 elétrons na banda de valência).
 - Exemplos: Antimônio, Arsênio, Fósforo.
 - **Tipo p**
 - Obtido a partir de impurezas trivalentes (3 elétrons na banda de valência).
 - Exemplos: Boro, Gálio, Índio.

1.2. Rede Cristalina de Material Semicondutor

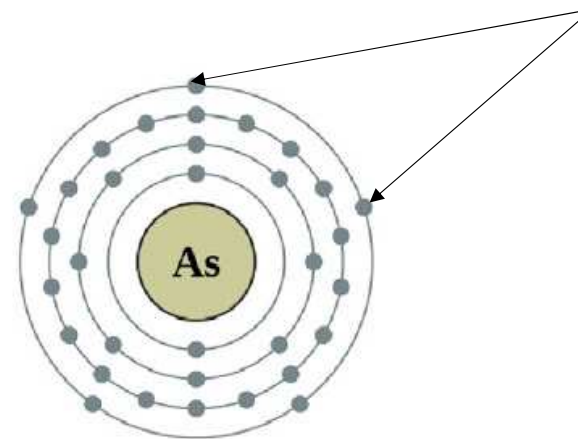
Estrutura Atômica do Ga e do As

Três elétrons de valência



Gálio (31)

Cinco elétrons de valência

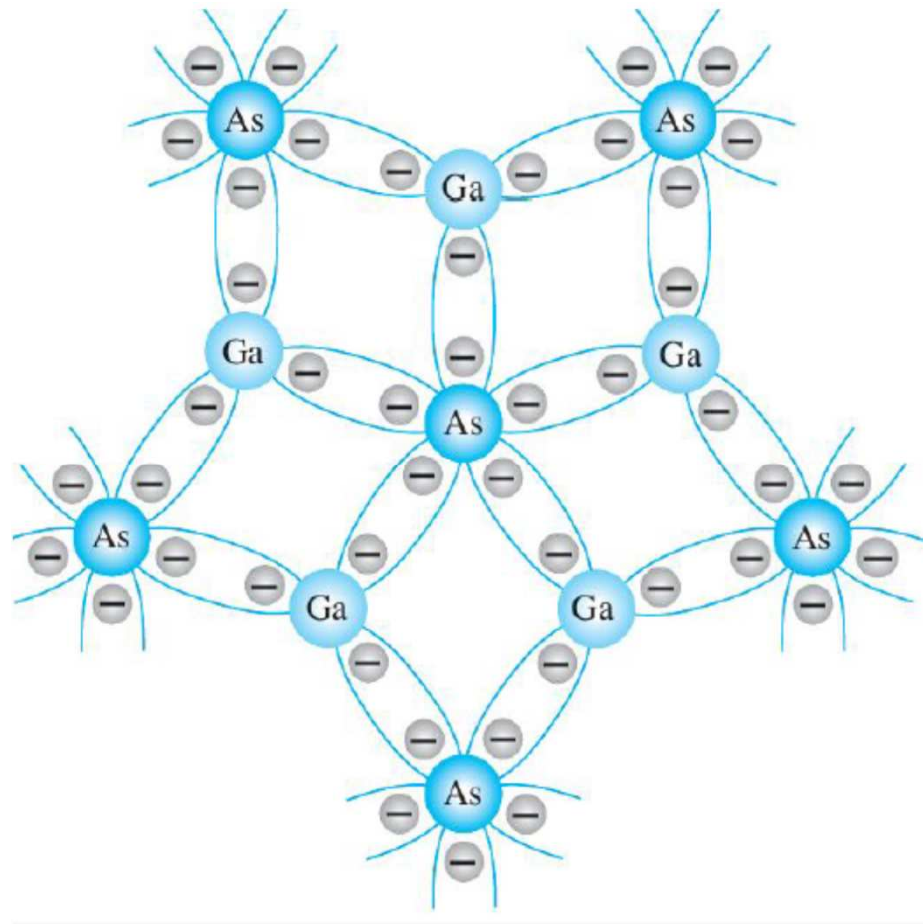


Arsênio (33)

- Átomo Trivalente (Ga) e átomo Pentavalente (As)

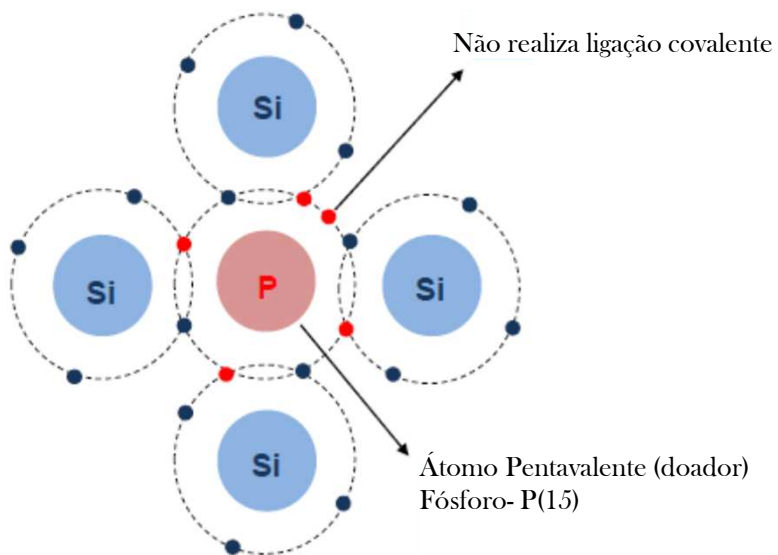
1.2. Rede Cristalina de Material Semicondutor

Rede cristalina do GaAs intrínseco

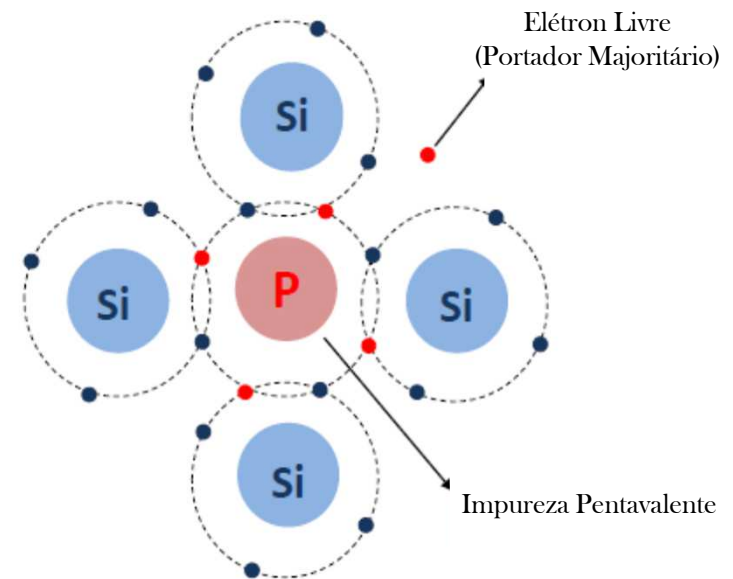


1.4. Dopagem do Semicondutor

Tipo n



Dopagem com átomos Pentavalentes

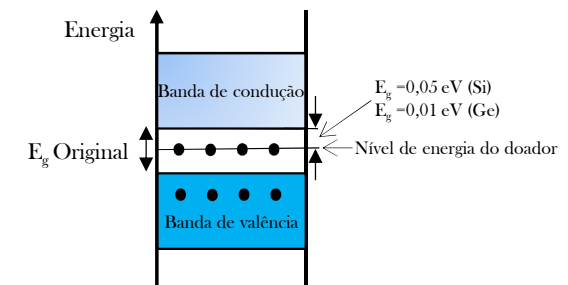
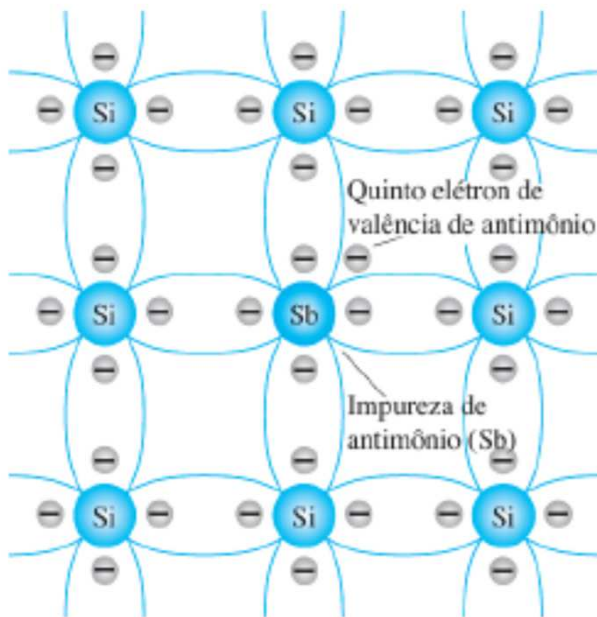


Dopagem com impurezas Pentavalentes

1.4. Dopagem do Semicondutor

Tipo *n*

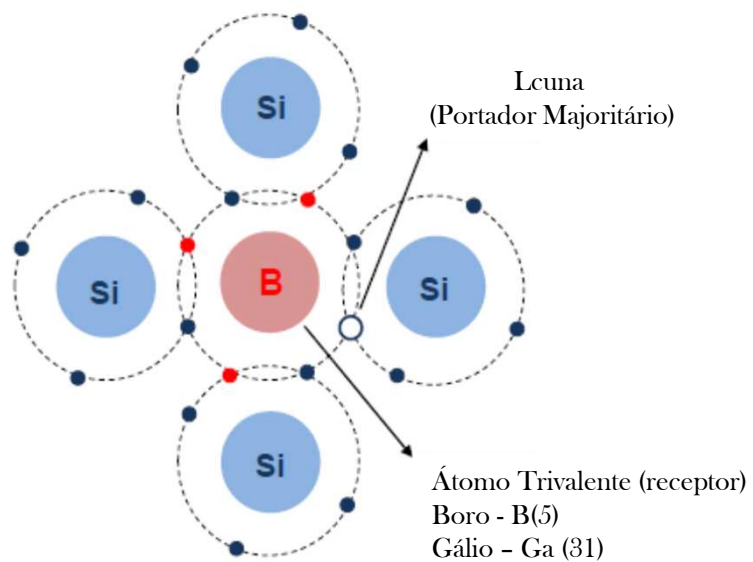
- O 5º elétron do átomo de impureza não estabelece uma ligação covalente, ficando situado na banda proibida e tenuamente ligado ao átomo de origem.
- Portanto, precisará de menor energia para saltar para a banda de condução:



- $E_g = 0,05$ [eV] para o Silício (Si)
- $E_g = 0,01$ [eV] para o Germânio (Ge)
- À temperatura ambiente, em um material intrínseco de Si, existe 1 elétron livre para cada 10^{12} átomos. No Ge 1 em 10^9 átomos.
- Para um nível de dopagem de 1 átomo de impureza para cada 10 milhões de átomos de Si ($1:10^7$), tem-se um aumento na concentração de portadores livres de 100.000:1 ($10^{12}/10^7 = 10^5$).
- As impurezas difundidas com 5 elétrons de valência são chamadas de átomos doadores.

1.4. Dopagem do Semicondutor

Tipo *p*

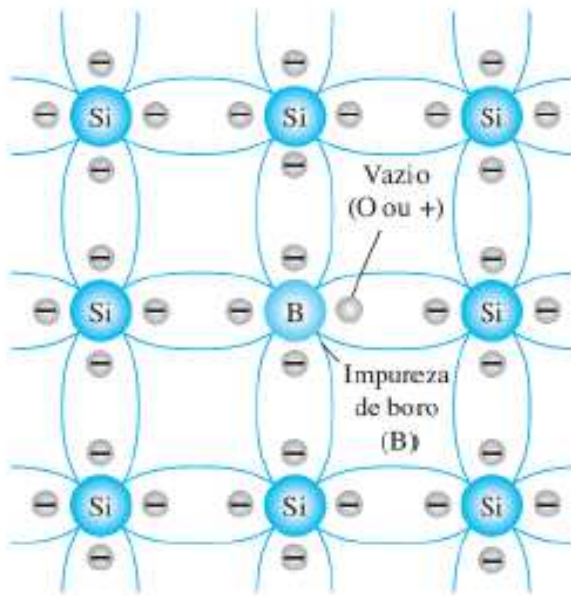


Dopagem com impurezas Trivalentes

1.4. Dopagem do Semicondutor

Tipo *p*

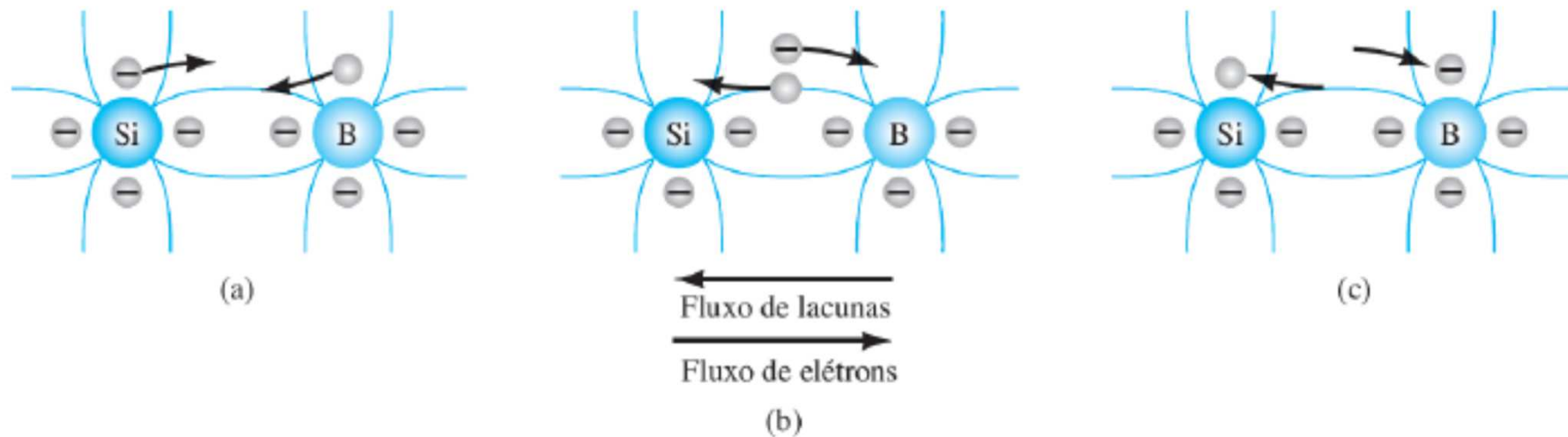
- Com impurezas trivalentes haverá insuficiência de elétrons para completar as ligações covalentes, resultando em lacunas que aceitarão elétrons.
- A condução pelo efeito lacuna se dará quando um elétron adquire energia suficiente para quebrar a sua ligação covalente.



- Assim, ocupará uma lacuna existente e, assim, criar uma nova lacuna na ligação covalente que liberou o elétron.

1.4. Dopagem do Semicondutor

O efeito Lacuna



- O elétron que se desloca para preencher uma lacuna existente não é livre.
- O efeito elétrico corresponde ao deslocamento de uma lacuna e, portanto, a condução se dá pelo deslocamento de lacunas livres.

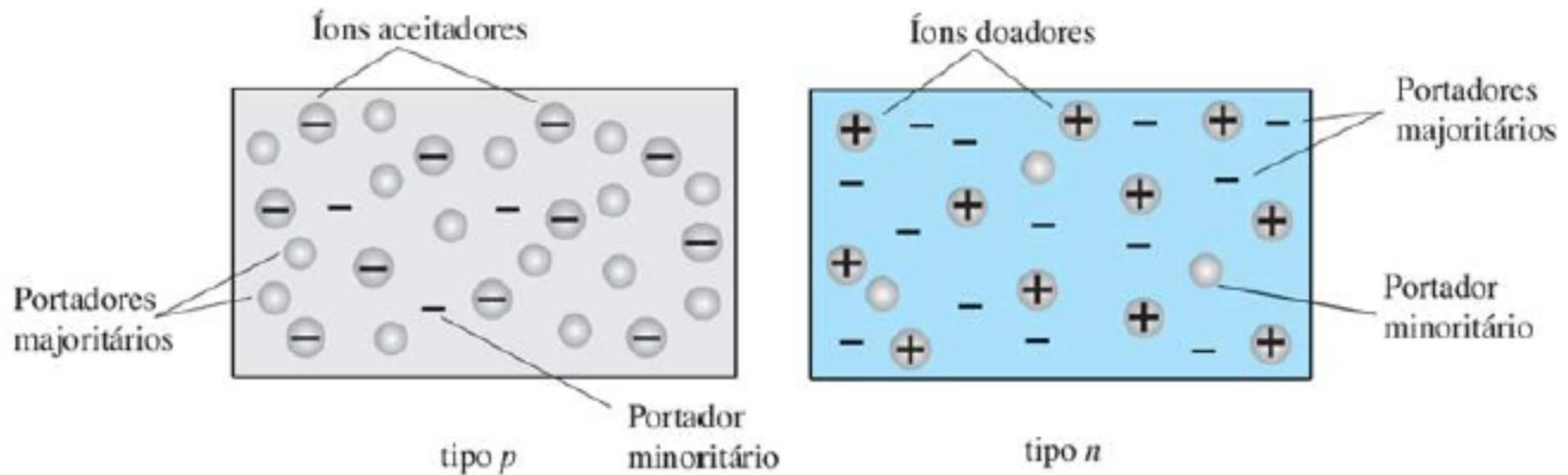
1.4. Dopagem do Semicondutor

Portadores Majoritários

- No estado intrínseco, apenas os elétrons que receberam energia suficiente para quebrar uma ligação covalente se encontram na banda de condução.
- Em um material tipo ***n***, o número de lacunas é praticamente o mesmo em relação ao estado intrínseco de semicondutor, mas o número de elétrons livres excede, em muito, o número de lacunas, sendo denominados de Portadores Majoritários.
- Já para um material tipo ***p***, as lacunas livres são os Portadores Majoritários.

1.4. Dopagem do Semicondutor

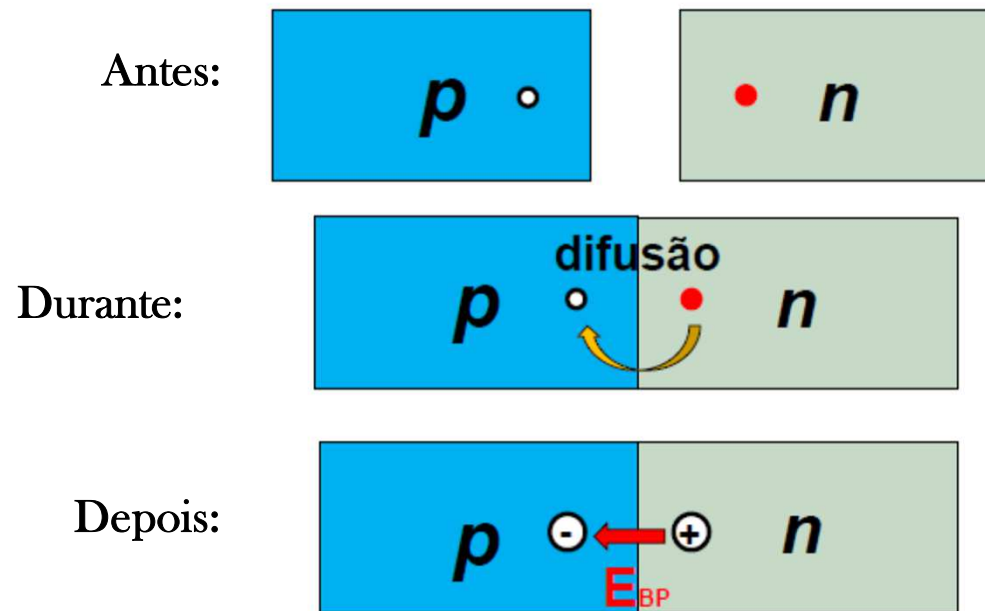
Cristal tipo p e Cristal tipo n



- Para um átomo pentavalente, quando o 5º elétron abandona o átomo de origem, este adquire uma carga positiva (íons doadores).
- O átomo trivalente, ao receber um elétron, adquire uma carga negativa (íons receptores).

1.5. Formação da junção pn

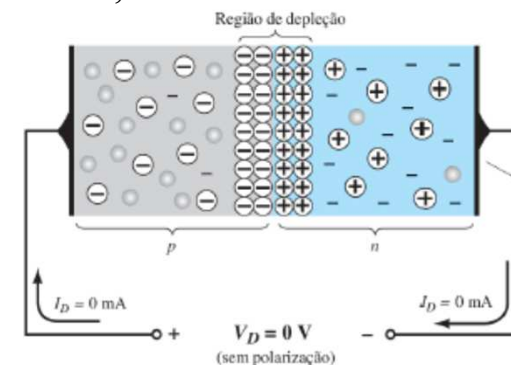
- A junção é a borda onde as regiões do tipo p e do tipo n se encontram, e diodo de junção é outro nome para um cristal pn .
- A palavra **diodo** é a contração de dois eletro**do**s, onde *di* representa dois.



1.5. Formação da junção *pn*

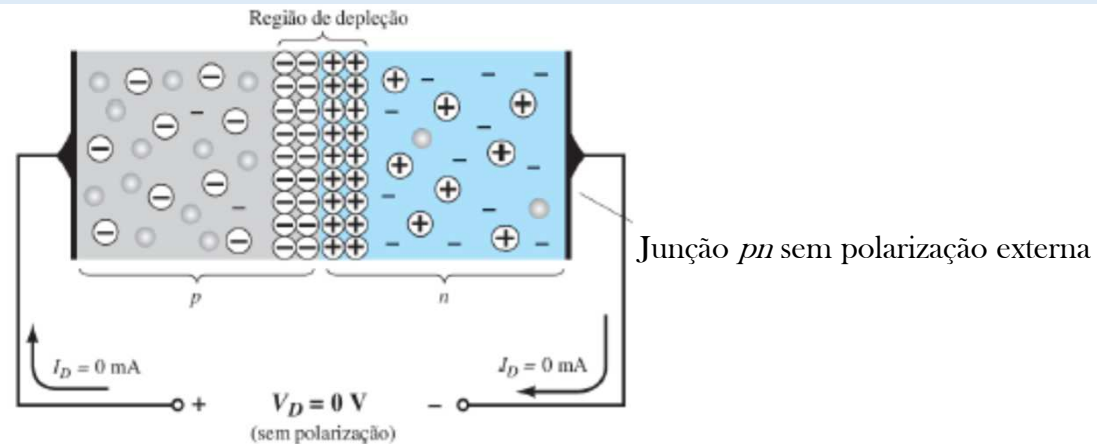
Barreira de Potencial

- Os elétrons que se difundem para dentro da região *p*, se recombinam com as lacunas majoritárias de *p* e as lacunas que se difundem para dentro da região *n* se recombinam com o elétron majoritários de *n*, o que resulta no desaparecimento de lacunas livres do lado *p* e elétrons livres do lado *n*.
- Como a recombinação se dá próxima a região da junção, surgirão cargas fixas (íons) negativas no lado *p* e positivas no lado *n*. Haverá então uma região de depleção (redução) de portadores de carga de ambos os lados da junção chamada de Região de Depleção.
- A presença de cargas fixas dos dois lados da junção dará origem a um campo elétrico que se oporá à difusão de lacunas na região *n* e de elétrons na região *p*, agindo como uma barreira, denominada **Barreira de Potencial**, a ser superada para que novos elétrons e lacunas se difundam.



1.5. Formação da junção pn

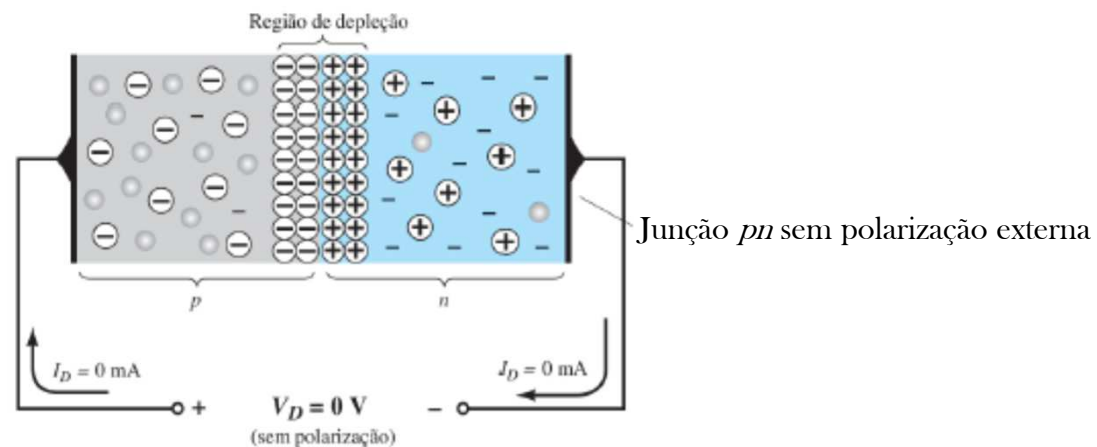
Corrente de Difusão e de Deriva (Saturação)



- Corrente de Difusão (I_{maj}):
 - Existe uma maior concentração de lacunas do lado p e de elétrons do lado n (portadores majoritários), logo, lacunas se difundirão de p para n e elétrons de n para p , formando a corrente de difusão.
- Corrente de Deriva ou de saturação (I_s):
 - Os portadores minoritários, elétrons do lado p e lacunas do lado n se difundirão para a borda da região de depleção, onde serão acelerados pelo campo elétrico lá existente, passando de p para n e de n para p , formando a corrente de saturação. O nome saturação significa que não poderá obter-se mais portadores minoritários do que os gerados pela energia térmica.

1.5. Formação da junção *pn*

Corrente de Difusão e de Deriva (Saturação)



- Corrente de Difusão (I_{maj}):
 - É fortemente dependente da largura da barreira de potencial.
- Corrente de Deriva ou de saturação (I_S):
 - Formada pelos portadores minoritários, depende da temperatura. Como não há corrente externa, conclui-se que $I_{\text{maj}} = I_S$.

1.5. Formação da junção *pn*

Corrente de Deriva e Fuga

- Corrente de Fuga (I_{fuga}):
 - Pequena corrente que circula pela superfície do cristal. Provocada pelas impurezas na superfície e estrutura do cristal.
- Diferença entre I_{fuga} e I_S :
 - I_S (muito pequena e depende da Temperatura)
 - I_{fuga} (muito pequena e depende da Tensão)
 - Em uma estrutura com polarização direta, como estudaremos no próximo capítulo, essas correntes são aproximadamente zero.