



UNIUBE – CAMPUS VIA CENTRO – Uberlândia/MG  
Cursos de Engenharia Elétrica  
Disciplina: Materiais Elétricos

## Aula 5

# Materiais semicondutores e aplicações

Revisão 2, de 06/05/2024

Prof. João Paulo Seno  
[joao.seno@uniube.br](mailto:joao.seno@uniube.br)

1



## Referência para esta aula

- Unidade 3, Capítulo 5, “Materiais semicondutores e aplicações materiais”, páginas 79 a 109, do livro ROCHA, M.F. et al. Materiais Elétricos. Porto Alegre: SAGAH, 2018. Disponível na Biblioteca A, acessível via AVA.

2

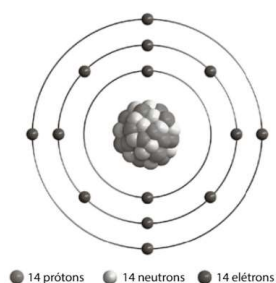
## Introdução

- Os semicondutores são materiais elétricos cujas características de condutividade são intermediárias entre as características dos materiais isolantes, que são maus condutores de eletricidade e as características dos materiais condutores, que têm alta condutividade;
- A afirmação acima é válida para a temperatura ambiente!
- O material semiconductor mais utilizado é o Silício, e o motivo para isso é sua abundância na natureza (constitui 27,7% da crosta terrestre);
- O Germânio, outro semiconductor, é mais antigo, mas foi sendo substituído gradativamente pelo Silício. O Germânio é mais raro e de difícil extração.
- Para serem utilizados em eletrônica, precisam ser tratados quimicamente, por um processo chamado de dopagem.

3

## Estrutura dos materiais semicondutores

- Os elétrons que se encontram na última camada são chamados de elétrons de valência. Estes elétrons podem se libertar dos átomos por ação de uma força externa (energia).



**Figura 1.** Estrutura de um átomo.  
Fonte: oorka/Shutterstock.com.



**Figura 2.** Átomos de germânio e silício.  
Fonte: Adaptada de BlueRingMedia/Shutterstock.com.

4



## Germânio x Silício



Comercialmente é obtido a partir de poeiras do processamento de minérios de zinco ou como subproduto da combustão de alguns tipos de carvão. Pode ser separado de outros metais pela destilação do tetracloreto, o que permite obter um elevado grau de pureza.

Propriedades	Ge	Si
Peso atômico, g	72,59	28,087
Densidade, a 25 °C, g/cm <sup>3</sup>	5,32	2,33
Ponto de fusão, graus	958	1414
Ponto de ebulição, graus	~ 2700	2600
Largura da zona proibida, eV	0,72	1,21
Resistência própria a 25 °C, ohms/cm	~ 65	63000
Mobilidade de elétrons, cm <sup>2</sup> /V · s	3900 ± 100	1350
Mobilidade das lacunas, cm <sup>2</sup> /V · s	1900 ± 100	500
Condutividade térmica a 25 °C cal/s · cm · graus	0,136	0,309
Coefficiente de dilatação linear a 25 °C, 1/graus	6,65 · 10 <sup>-6</sup>	4,15 · 10 <sup>-6</sup>
Número de átomos, cm <sup>3</sup>	4,42 · 10 <sup>22</sup>	4,96 · 10 <sup>22</sup>
Coefficiente de difusão de elétrons, m <sup>2</sup> /s	90	38
Coefficiente de difusão de lacunas, cm <sup>2</sup> /s	45	13

Fonte: Adaptada de Schmidt (2010, p. 118).

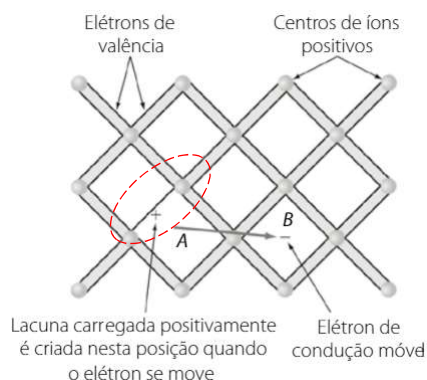
Vantagens:

- Mais abundante na natureza;
- Termicamente mais estável;

5

## As lacunas

- A ausência de um elétron que saiu de uma ligação covalente indo para a banda de condução, ao receber energia, cria um espaço livre conhecido com **LACUNA**, que possui carga positiva (pela falta da carga negativa do elétron que saiu).



Este fenômeno ocorre apenas nos semicondutores. Isto é o que permitiu o desenvolvimentos dos diodos e transistores.

6



## O movimento dos elétrons e das lacunas

- Este movimento ocorre quando um campo elétrico é aplicado ao material, criando uma força elétrica que fará os elétrons que estão na camada de valência se movimentarem. O movimento de um elétron num sentido implica no “movimento” de uma lacuna no sentido oposto.
- Este movimento faz surgir uma corrente elétrica.
- Agora, vejamos: num semicondutor puro, sem impurezas (entenda-se átomos de outros elementos), chamado de semicondutor intrínseco, o número de elétrons se movimentando é sempre igual ao número de lacunas. Sempre que um elétron é movimentado e uma lacuna criada, outro par “elétron – lacuna” é destruído.
- Além disso, o número de elétrons livres num semicondutor intrínseco é muito pequeno e não produz uma corrente elétrica utilizável em termos práticos.
- Para aumentar o número de elétrons livres ou lacunas, a solução é a **dopagem**. 7

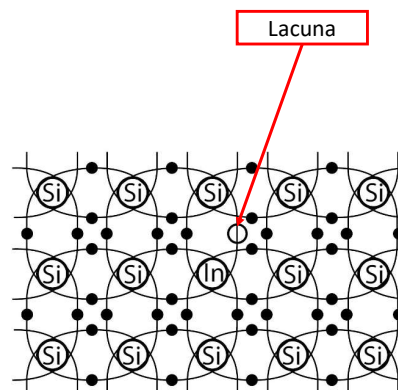


## Dopagem

- A dopagem é um processo industrial no qual colocam-se determinadas impurezas no material semicondutor;
- Essas impurezas são átomos de outros materiais, acrescentada de forma controlada, com o objetivo de (como foi dito) aumentar a quantidade de elétrons na banda de condução dos semicondutores intrínsecos;
- Utilizam-se para isso, átomos com 3 elétrons na última camada de valência (trivalentes) ou átomos com 5 elétrons na última camada de valência (pentavalentes);
- Cada um vai gerar um efeito diferente no semicondutor intrínseco.

## Dopagem com elementos trivalentes

- Neste caso, todos os átomos da impureza trivalente formam ligações covalentes com os elétrons do semiconductor;
- Mas o semiconductor, que possui 4 elétrons na camada de valência, ficará com uma lacuna em cada átomo de impureza adicionado;
- Portanto, este processo de dopagem cria um número controlado de lacunas no material semiconductor, que serão maioria. As lacunas, agora, são majoritárias. O semiconductor dopado desta maneira recebe o nome de “semiconductor do tipo P”.



9

## Impurezas trivalentes comumente usadas

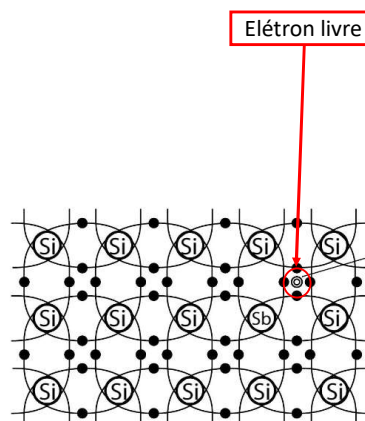
- Estas impurezas são conhecidas como impurezas aceitadoras.

Impurezas aceitadoras	Semiconductor tipo P
Boro (3 elétrons na camada de valência)	B
Gálio (3 elétrons na camada de valência)	Ga
Índio (3 elétrons na camada de valência)	In
Tálio (3 elétrons na camada de valência)	Tl
Alumínio (3 elétrons na camada de valência)	Al

10

## Dopagem com elementos pentavalentes

- Neste caso, todos os elétrons do semiconductor formam ligações covalentes com os elétrons do átomo da impureza.
- Mas o átomo da impureza, que possui 5 elétrons na camada de valência, ficará com um elétron livre em cada átomo de impureza adicionado;
- Portanto, este processo de dopagem cria um número controlado de elétrons no material semiconductor, que serão majoritários. O semiconductor dopado desta maneira recebe o nome de "semiconductor do tipo N".



11

## Impurezas pentavalentes comumente usadas

- Essas impurezas são chamadas de impurezas doadoras.

Impurezas doadoras	Semiconductor tipo N
Fósforo (5 elétrons na camada de valência)	P
Arsênio (5 elétrons na camada de valência)	As
Bismuto (5 elétrons na camada de valência)	Bi
Antimônio (5 elétrons na camada de valência)	Sb

12

## Aplicações

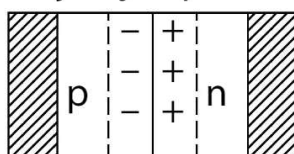
- A partir dos semicondutores tipo P e tipo N são construídos diversos dispositivos com aplicações essenciais na indústria, como: diodos, LEDs (diodos emissores de luz), transistores, células fotovoltaicas, circuitos integrados,... e outros;
- O mais simples deles, o diodo, é formado por uma junção PN.
- Com a união de materiais tipo P (que tem as lacunas como portador majoritário) e tipo N (no qual os elétrons são os portadores majoritários) o excesso de elétrons presente no material tipo N é atraído para o lado do material tipo P a fim de buscar o equilíbrio eletrostático.

13

## Aplicações

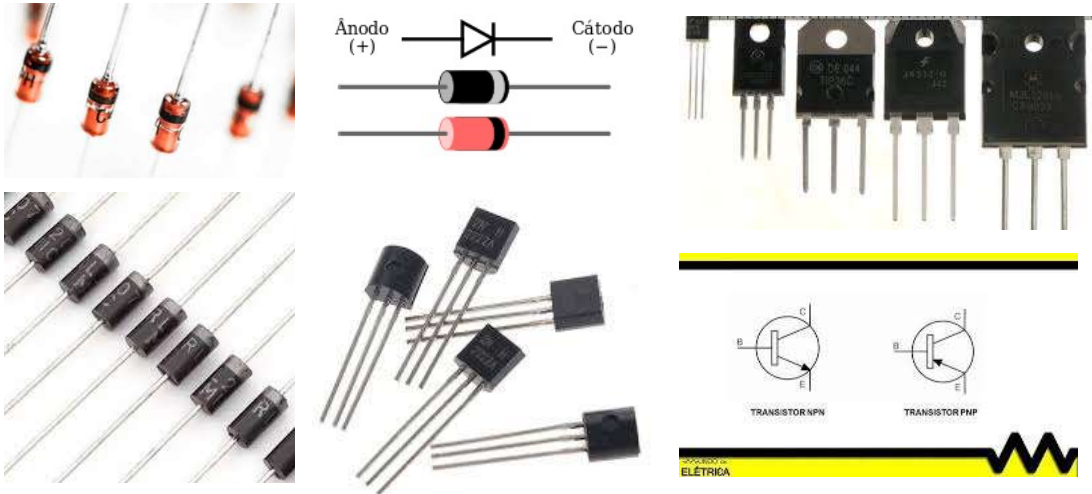
- Continuando, cada átomo do material tipo P tem sua lacuna ocupada por um elétron livre do material tipo N;
- Este fenômeno é chamado de recombinação e ocorre primeiro na região próxima à junção formando uma camada chamada de “camada de depleção”, que não possui portadores majoritários, e que permite a passagem de corrente elétrica;
- Esta camada cria uma barreira de potencial (de 0,3 V nas junções de Germânio e de 0,7 V nas junções de Silício).

junção p-n



14

## Imagens de dispositivos semicondutores



15

## Testes

16





**1.** O principal processo para possibilitar a utilização dos materiais semicondutores na indústria é a dopagem. Qual das alternativa explica corretamente esse processo?

- a)** É o processo industrial onde se coloca de maneira controlada determinadas impurezas no material semicondutor.
- b)** É o processo industrial onde se coloca de maneira controlada determinadas quantidades de elétrons isolantes no material semicondutor.
- c)** É o processo industrial onde se coloca de maneira controlada determinadas quantidades de lacunas condutoras no material semicondutor.
- d)** É o processo industrial onde se purifica o material semicondutor, retirando de maneira controlada as impurezas contidas nos átomos.
- e)** É o processo industrial onde se troca de maneira controlada os átomos do silício pelos átomos do germânio.

17



**2.** Os semicondutores são materiais que têm características intermediárias entre os condutores e os isolantes, ou seja, necessitam mais energia que os condutores para que os elétrons de valência passem para a banda de condução e proporcionem mais corrente elétrica que os isolantes. Os semicondutores intrínsecos são os semicondutores que:

- a)** são elementos compostos por impurezas de átomos trivalentes, que ajudam a isolar a passagem de corrente elétrica.
- b)** são elementos compostos por impurezas de átomos pentavalentes, que amplificam a corrente elétrica.
- c)** são elementos compostos por uma mistura controlada de 70% de silício e 30% de germânio, sempre nessa mesma proporção atômica.
- d)** são materiais semicondutores sem impurezas, normalmente com quatro elétrons na camada de valência.
- e)** são elementos obtidos a partir do processo de dopagem de semicondutores, normalmente com quatro elétrons na camada de valência.

18



**3.** Nos materiais semicondutores, os locais onde existe falta de elétron são chamados de lacunas. Em relação à quantidade de lacunas nos semicondutores intrínsecos, podemos afirmar que:

- a)** em um semicondutor intrínseco, a quantidade de lacunas é sempre igual ao número de elétrons do átomo utilizado no processo de dopagem, pois ele que cede seus elétrons ao semicondutor.
- b)** Em um semicondutor intrínseco, a quantidade de lacunas é sempre igual ao número de elétrons covalentes, pois sempre que uma ligação covalente é gerada ou rompida um par elétron-lacuna é formado ou destruído no processo.
- c)** em um semicondutor intrínseco, a quantidade de lacunas é sempre igual ao número de elétrons livres dos átomos pentavalentes das impurezas dopadas no semicondutor, pois as lacunas
- d)** em um semicondutor intrínseco, a quantidade de lacunas é sempre muito maior que a quantidade de elétrons, pois as ligações covalentes são geradas pelas dopagens.
- e)** nos semicondutores intrínsecos, sempre há três ou cinco lacunas de acordo com o seu tipo, que pode ser tipo P ou tipo N.

19



**4.** A "ausência de elétron" que encontramos nos semicondutores é chamada de lacuna. A alternativa que melhor explica o processo de surgimento dessas lacunas é:

- a)** quando se coloca impurezas trivalentes em um semicondutor pelo processo de dopagem, 5 elétrons trivalentes aumentam sua energia e ficam livres, gerando as lacunas covalentes.
- b)** a única maneira de formar as lacunas é através da dopagem covalente, que acrescenta duas impurezas ao material semicondutor, uma trivalente e uma pentavalente, fazendo assim surgirem as lacunas livres.
- c)** quando se aumenta a temperatura dos semicondutores, os dois elétrons da camada de valência fundem-se através do processo de dopagem originando as lacunas.
- d)** quando se coloca impurezas tetravalentes em um semicondutor pelo processo de dopagem, 3 elétrons tetravalentes aumentam sua energia e ficam livres, gerando as lacunas covalentes
- e)** nos semicondutores, quando um elétron passa da banda de valência para a banda de condução, ficando livre, ocorre uma "ausência de elétron" na ligação covalente da qual esse elétron saiu. Esse local que o elétron ocupava na ligação covalente passa a ficar vazio, e essa falta de elétron é chamada de lacuna.

20

- 5.** O diodo é o componente semicondutor mais simples utilizado pela indústria, e seu funcionamento está descrito corretamente em qual alternativa?
- a)** O diodo é um componente de alta tecnologia que tem na sua construção milhões de transistores do tipo PNP ou NPN.
  - b)** O diodo é um componente semicondutor que serve para amplificar um sinal através da passagem de corrente pelas suas três camadas intercaladas de semicondutor dos tipos P e N.
  - c)** O diodo é um componente semicondutor que bloqueia a passagem de corrente em apenas um sentido e permite a passagem de corrente em outro sentido mediante o rompimento da sua barreira de potencial.
  - d)** O diodo é um componente semicondutor que amplifica as lacunas em apenas um sentido e amplifica os elétrons em outro sentido mediante o rompimento da sua barreira de potencial.
  - e)** O diodo é um componente semicondutor do tipo fotovoltaico que gera tensão elétrica quando exposto à ação de um fluxo luminoso através do aquecimento solar da barreira de potencial do material.

21

# Fim

22