

Fontes e Detectores Ópticos

Aula 5

Prof.^a Cindy Stella Fernandes

cindy.fernandes@unifesspa.edu.br – cindy.fernandes@gmail.com

xx/xx/2022

Agenda

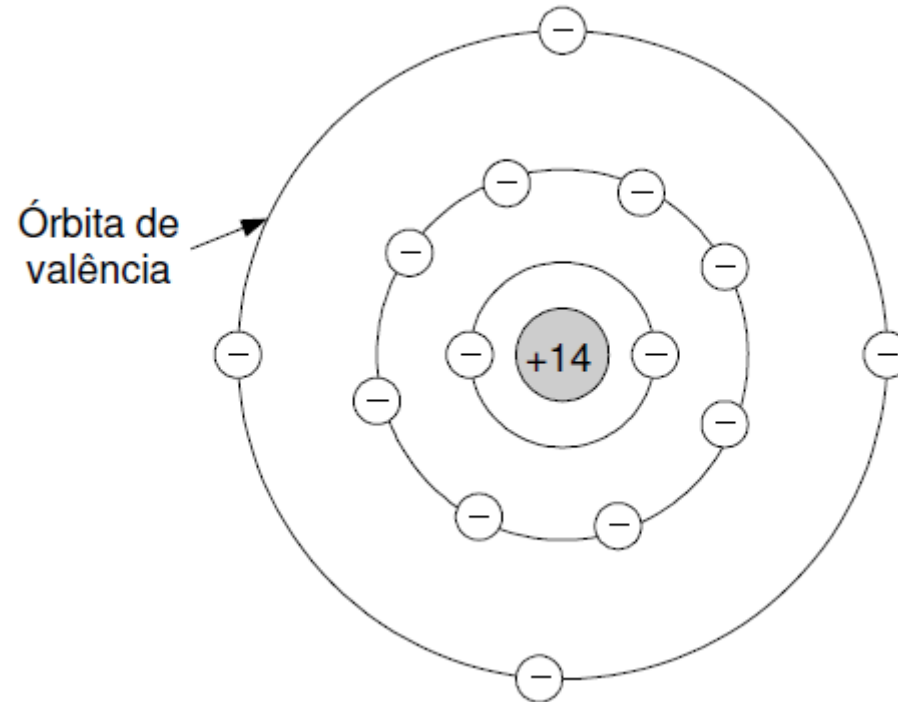
- 1. Materiais semicondutores
- 2. Fonte LED (Light Emitting Diode)
- 3. Fonte Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)
- 4. Fotodiodo PIN
- 5. Fotodiodo Avalanche
- 6. Referências Bibliográficas
- Referências Bibliográficas

1. Materiais semicondutores

- Um semicondutor é um material que possui um nível de condutividade em algum ponto entre os extremos de um isolante (condutividade muito baixa) e um condutor (condutividade muito alta);
- São constituídos por materiais que apresentam 4 elétrons na camada de valência;
- O material semicondutor mais utilizado na eletrônica é o silício, e sua distribuição atômica pode ser vista na Figura 1;

1. Materiais semicondutores

Figura 1. Átomo de silício.



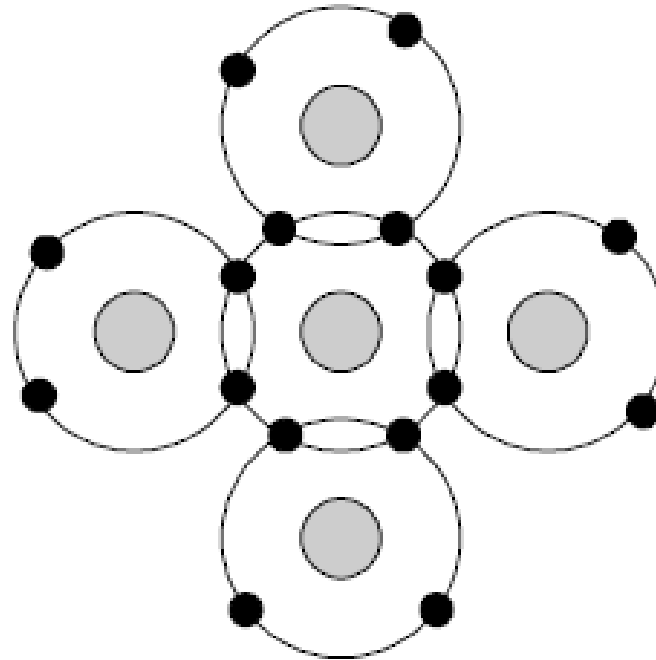
Fonte: Apostila de Comunicações Ópticas

1. Materiais semicondutores

- A órbita mais externa do átomo de silício é chamada de órbita de valência;
- Estes tipos de átomos tem tendência a se agruparem entre si, para formar uma estrutura cristalina, como mostra a Figura 2;
- Cada átomo combina com quatro outros (ligação covalente) para que suas órbitas de valência atinjam a estabilidade com 8 elétrons;

1. Materiais semicondutores

Figura 2. Distribuição dos átomos em um cristal de silício.



Fonte: Apostila de Comunicações Ópticas

1. Materiais semicondutores

- Como os elétrons sofrem atração pelos núcleos positivos dos átomos, eles ficam presos nessa treliça, sem a possibilidade de escapar, a não ser que alguma fonte externa lhe forneça energia suficiente para isto;
- Caso essa energia adicional não seja fornecida, para nenhum elétron, todos eles permanecerão na treliça;

1. Materiais semicondutores

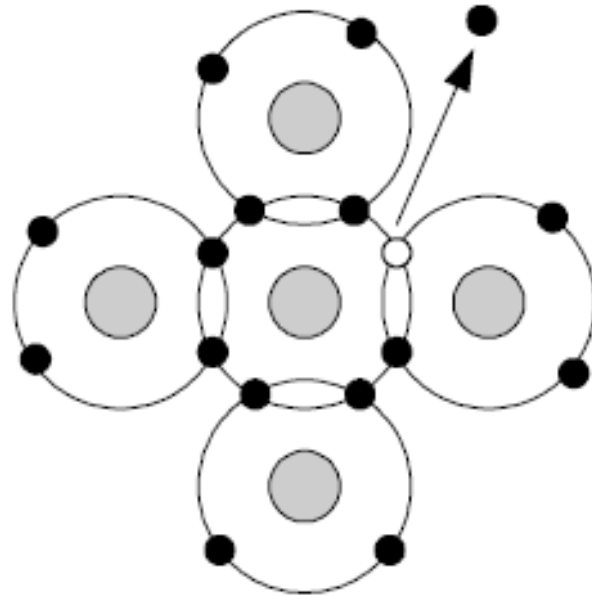
- A aplicação de um campo elétrico moderado não consegue deslocar os elétrons de sua posição na treliça;
- Portanto, a corrente elétrica não encontra condições para ser estabelecida;
- Isto é o mesmo que dizer que, nesta situação, o silício se comporta como um material isolante;

1. Materiais semicondutores

- Entretanto, a temperatura ambiente pode fornecer a energia necessária para a extração de uma certa quantidade de elétrons da treliça;
- Os elétrons que escapam da treliça são facilmente deslocados sob ação de um campo elétrico;
- Por isto, eles são chamados de elétrons livre, como mostra a Figura 3;

1. Materiais semicondutores

Figura 3. Elétron livre.



Fonte: Apostila de Comunicações Ópticas

1. Materiais semicondutores

- O elétron que escapa retorna depois de algum tempo para uma das lacunas da órbita de valência;
- Nesse caso, ele devolve a energia que ele adquiriu quando escapou;
- A energia devolvida pode estar na forma de calor ou de emissão de um fóton;

1. Materiais semicondutores

- Mas, em todo instante, haverá uma certa quantidade de elétrons que escaparam da treliça e ainda não tiveram tempo de retornar para as lacunas disponíveis na treliça;
- A cada instante, os elétrons que estão na treliça são os da banda de valência;
- Os que estão livres, são os da banda de condução;

1. Materiais semicondutores

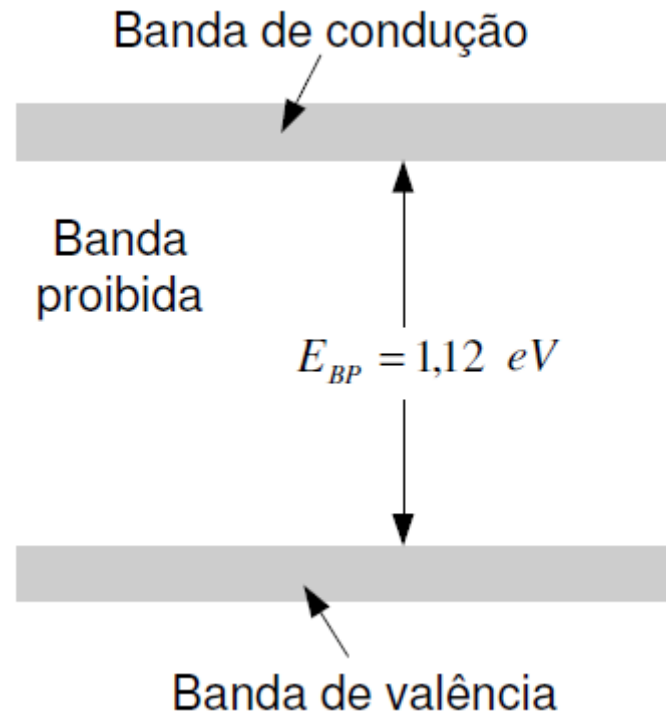
- As energias dos elétrons livres estão na banda de condução;
- As energias dos elétrons presos na treliça estão na banda de valência;
- Não há elétrons entre essas duas bandas de energia;
- Por isto, esta banda sem elétrons é chamada de banda proibida;

1. Materiais semicondutores

- A amplitude da banda proibida depende do tipo de semicondutor;
- No caso do silício, seu valor é $E_{BP} = 1,12 \text{ eV} = 1,79 \times 10^{-19} \text{ J}$;
- A Figura 4 ilustra a banda proibida;

1. Materiais semicondutores

Figura 4. Banda proibida.



Fonte: Apostila de Comunicações Ópticas

1. Materiais semicondutores

- É possível alterar as características físicas e elétricas de um cristal semicondutor por meio do processo denominado dopagem;
- A dopagem consiste em substituir alguns átomos tetravalentes do cristal semicondutor por átomos trivalentes ou pentavalentes;
- Esses átomos são denominados impurezas, e o semicondutor dopado é denominado impuro (ou extrínseco);

1. Materiais semicondutores – Semicondutor tipo N

- Existem alguns elementos químicos pentavalentes, ou seja, possuem cinco elétrons na banda de valência;
- Se o silício intrínseco for misturado com átomos desses elementos, o silício passa a ser classificado como extrínseco;
- A treliça do cristal passa a ter átomos tetravalentes de silício juntamente com os pentavalentes introduzidos;

1. Materiais semicondutores – Semicondutor tipo N

- Entretanto, só quatro elétrons deste último elemento são usados na composição da treliça;
- Sobrará um elétron desocupado;
- Para deslocar este elétron para a banda de condução é necessário um fornecimento de energia calorífica quase insignificante comparada com os dos elétrons presos na treliça;

1. Materiais semicondutores – Semicondutor tipo N

- Inicialmente, todos eles vão para a banda de condução, somando-se àqueles que tinham escapado do silício sob efeito da energia térmica;
- Entretanto, a grande quantidade de elétrons na banda de condução aumenta a probabilidade de que um número maior de elétrons retornem para as lacunas disponíveis na banda de valência;

1. Materiais semicondutores – Semicondutor tipo N

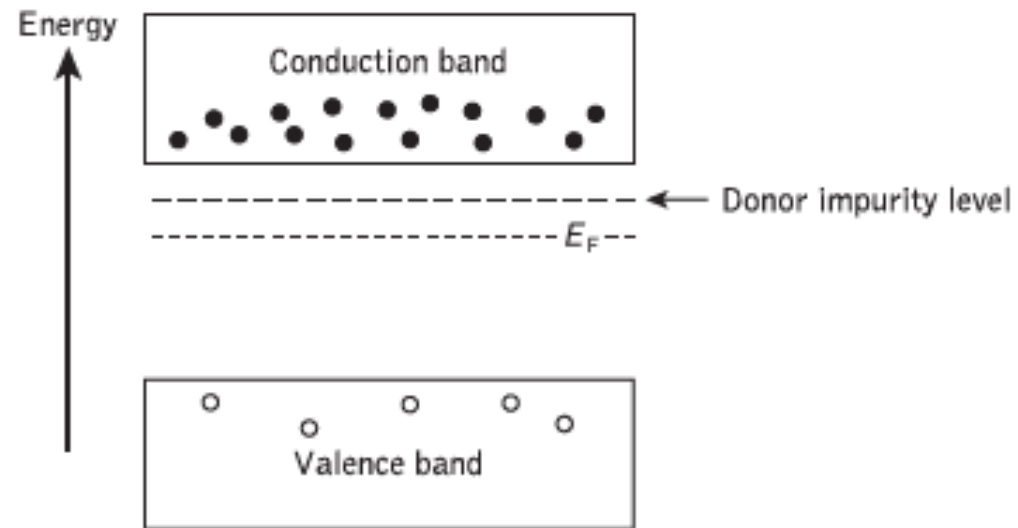
- Portanto, na situação de equilíbrio, haverá menor quantidade de lacunas do que existiria se não houvesse a introdução dos átomos pentavalentes;
- Isto equivale a dizer que a corrente elétrica, provocada por um campo de força, acontece quase que totalmente na banda de condução;

1. Materiais semicondutores – Semicondutor tipo N

- Por isto, este tipo de material é classificado como semicondutor tipo N;
- A letra N especifica que os portadores majoritários são os portadores negativos, que se deslocam, na banda de condução, para o pólo positivo da bateria;
- A Figura 5 ilustra as bandas de energia de um semicondutor tipo N;

1. Materiais semicondutores – Semicondutor tipo N

Figura 5. Bandas de energia de um semicondutor tipo N.



Fonte: Optical Fiber Communications: Principles and Practice, 3ª edição.

1. Materiais semicondutores – Semicondutor tipo P

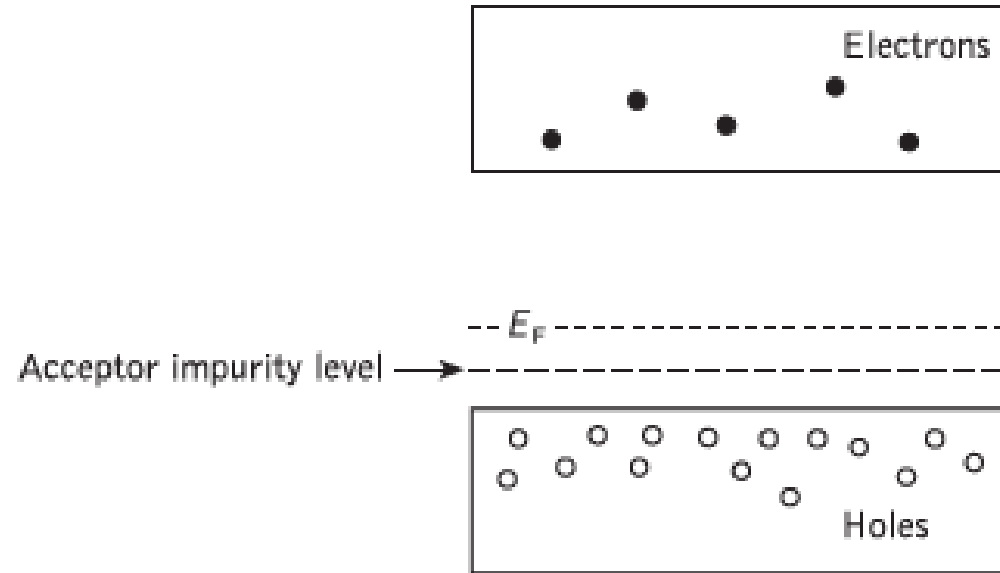
- Neste tipo de semicondutor, o elemento que constitui a impureza é trivalente;
- Neste caso, quando seu átomo ocupa o lugar de um átomo de silício, automaticamente se forma uma lacuna na treliça;
- Seguindo raciocínio análogo ao semicondutor tipo N, podemos concluir que, neste caso, quase toda a corrente elétrica flui na banda de valência;

1. Materiais semicondutores – Semicondutor tipo P

- Este resultado mostra que a impureza trivalente faz com que a quantidade de portadores negativos, na banda de condução, fique praticamente desprezível quando comparada à quantidade de portadores positivos, como mostra a Figura 6;
- Isto equivale a dizer que a corrente elétrica, provocada por um campo de força, acontece quase que totalmente na banda de valência;

1. Materiais semicondutores – Semicondutor tipo P

Figura 6. Bandas de energia de um semicondutor tipo *P*.



Fonte: Optical Fiber Communications: Principles and Practice, 3ª edição.

1. Materiais semicondutores – Semicondutor tipo P

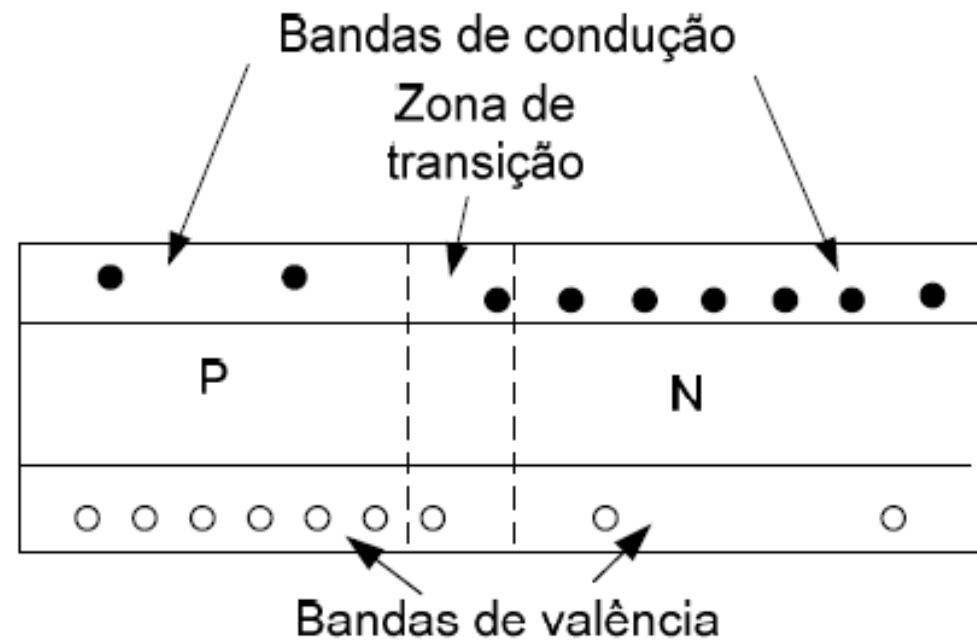
- Por isto, este tipo de material é classificado como semicondutor tipo P;
- A letra P especifica que os portadores majoritários são os portadores positivos que se deslocam, na banda de valência, para o pólo negativo da bateria;

1. Materiais semicondutores – Junção PN

- Junção PN é um semicondutor formado pela união de dois semicondutores extrínsecos: um tipo P e outro tipo N;
- A Figura 7 mostra a distribuição de elétrons e lacunas neste semicondutor híbrido;
- Vamos supor que se conecta uma bateria DC a este componente, como mostra a Figura 8;

1. Materiais semicondutores – Junção PN

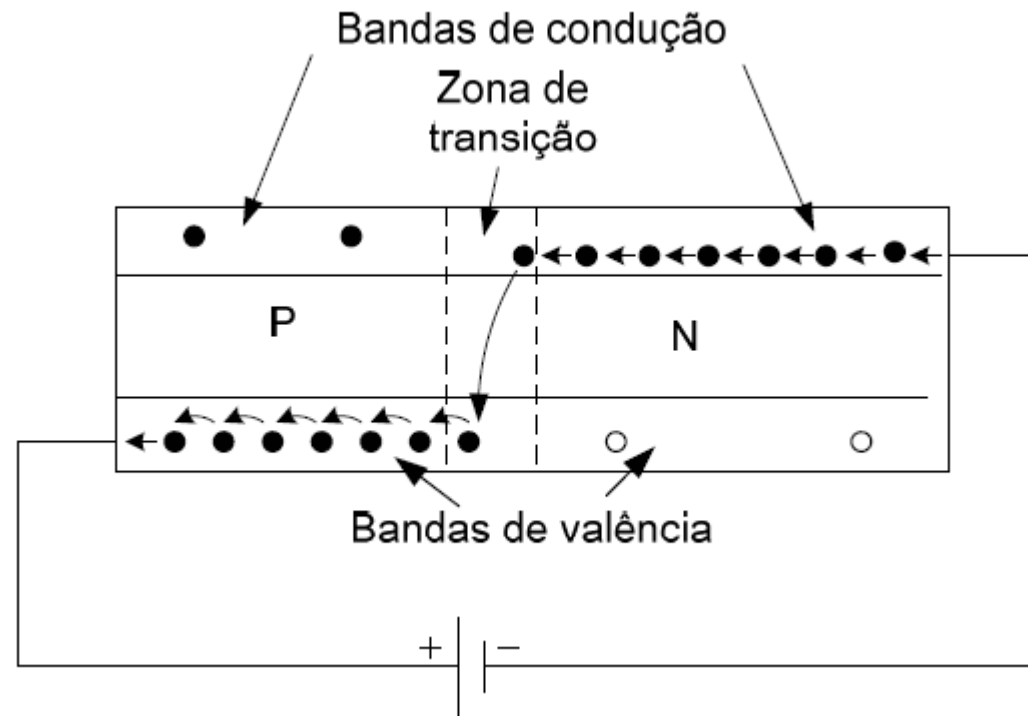
Figura 7. Distribuição de elétrons e lacunas na junção *PN*.



Fonte: Apostila de Comunicações Ópticas

1. Materiais semicondutores – Junção PN

Figura 8. Polarização direta da junção *PN*.



Fonte: Apostila de Comunicações Ópticas

1. Materiais semicondutores – Junção PN

- Neste caso, o pólo negativo da bateria fornece elétrons que caminham por esse componente;
- Os elétrons são impelidos pelo campo elétrico e caminham, pela banda de condução, em direção ao pólo positivo da bateria;
- Dada a enorme quantidade de portadores negativos nesta banda de condução, o fluxo de elétrons constitui uma corrente elétrica relativamente grande;

1. Materiais semicondutores – Junção PN

- Quando os elétrons atingem a parte P do dispositivo, a nova banda de condução quase não tem portadores negativos;
- Entretanto, nesta parte P, a banda de valência possui uma grande quantidade de lacunas;
- Isto faz com que a quase totalidade dos elétrons que chegam nesta parte P acabem se transferindo para as lacunas da banda de valência;

1. Materiais semicondutores – Junção PN

- Portanto, daí pra frente, aquela grande quantidade de elétrons continua a viagem em direção ao pólo positivo da bateria, deslocando-se pelas lacunas;
- Se invertermos a bateria, a primeira parte do trajeto dos elétrons seria pelas lacunas da banda de valência da parte P, como mostra a Figura 9;

1. Materiais semicondutores – Junção PN

Fonte: Apostila de Comunicações Ópticas

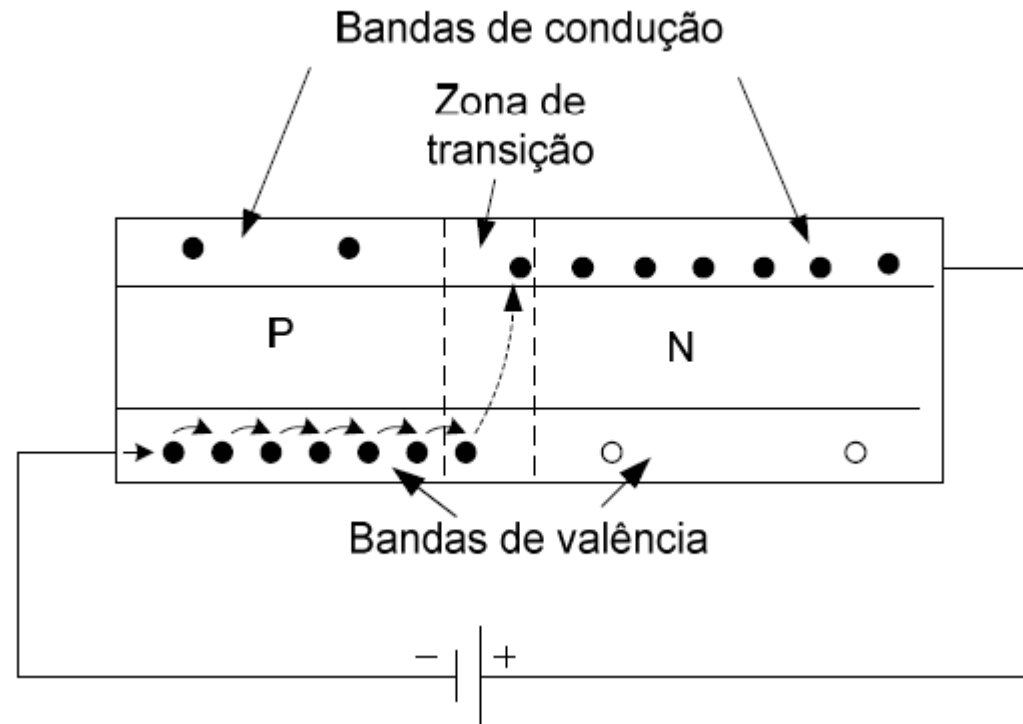


Figura 9. Polarização inversa da junção *PN*.

1. Materiais semicondutores – Junção PN

- Quando os elétrons chegam na junção, eles tem que passar para a banda de condução da parte N;
- Entretanto, um campo elétrico moderado não consegue fornecer energia suficiente para essa mudança de nível energético;
- Isto elimina a possibilidade de estabelecimento de corrente elétrica nesse sentido;

2. Fonte LED (Light Emitting Diode)

- Na situação da polarização direta, vimos que, ao passar pela junção, o elétron deixa a banda de condução e entra na banda de valência;
- Como antes ele tinha mais energia do que na nova situação, ele deve se livrar dessa diferença de energia;
- Essa perda de energia de um elétron acontece, às vezes, na forma de calor e, outras vezes, na forma de emissão de um fóton;

2. Fonte LED (Light Emitting Diode)

- Um LED é um diodo PN otimizado para que a parte da energia, na forma de fótons, seja maior que a parte na forma de calor;
- Um LED construído com silício possui baixo rendimento de irradiação luminosa;
- Isto significa que a produção de energia luminosa é sensivelmente menor do que a energia calorífica;

2. Fonte LED (Light Emitting Diode)

- Entretanto, um LED construído com qualquer outro elemento tetravalente, que não seja o silício, é ainda menos eficiente como emissor de luz;
- Pesquisadores desenvolveram um material formado de uma liga composta de Arsênio e Gálio que, conforme as porcentagens desses elementos no material, pode se comportar tanto como semicondutor intrínseco, ou como tipo P, ou como tipo N;

2. Fonte LED (Light Emitting Diode)

- Uma certa quantidade de átomos de gálio é substituída por átomos de índio ou alumínio;
- Estes elementos são, também, trivalentes;
- Eles são uma espécie de elemento de ajuste da amplitude da banda proibida;
- Nos sistemas mais antigos de comunicação óptica foram usados LEDs de arseneto de gálio, dopados com uma porcentagem específica de alumínio;

2. Fonte LED (Light Emitting Diode)

- Atualmente, os LEDs mais usados são os de liga quaternária, contendo gálio, arsênio, índio e fósforo;
- Os diodos de arseneto de gálio possuem rendimentos de irradiação luminosa próximos a 90%;
- São usados quase sempre com fibras multimodo;

2. Fonte LED (Light Emitting Diode)

- Geralmente operam na janela de transmissão de 850 nm;
- Dentre vantagens do uso do LED, pode-se citar:
- Baixo custo
- Maior tempo de vida
- Mais simples de serem instalados
- Menos sensível a variações nas condições atmosféricas
- Circuitos drivers menos complexos

2. Fonte LED (Light Emitting Diode)

- Como desvantagens do uso do LED, pode-se citar:
- Menor potência óptica
- Maior largura de espectro
- Emissão muito divergente
- Pequena taxa de transmissão

3. Fonte Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

- Quando um átomo possui a órbita de valência completa, dizemos que ele é um átomo pertencente à banda de energia inferior;
- O valor dessa energia inferior é a energia que cada um dos quatro elétrons de sua órbita de valência possui;

3. Fonte Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

- Quando um dos elétrons adquire energia e se transfere para a órbita de condução, dizemos que este átomo passou a pertencer à banda de energia superior;
- O valor dessa energia superior é a energia inferior adicionada àquela que o elétron adquiriu para se transferir de uma órbita para outra;

3. Fonte Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

- Até o momento, informamos que a passagem de um elétron da banda de valência para a banda de condução acontece devido ao fornecimento de energia térmica aos átomos da treliça do cristal;
- Entretanto, existe outra forma disto acontecer;
- Vamos supor que um fóton incide em um átomo que já está na banda de energia superior;

3. Fonte Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

- Fisicamente, isto significa que um de seus elétrons está em uma órbita mais externa do que sua órbita de valência;
- Portanto, este elétron possui energia em um nível da banda energética de condução;
- Nesta situação, quando o fóton incide sobre este átomo, ele estimula o retorno do elétron desgarrado para sua órbita de valência;

3. Fonte Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

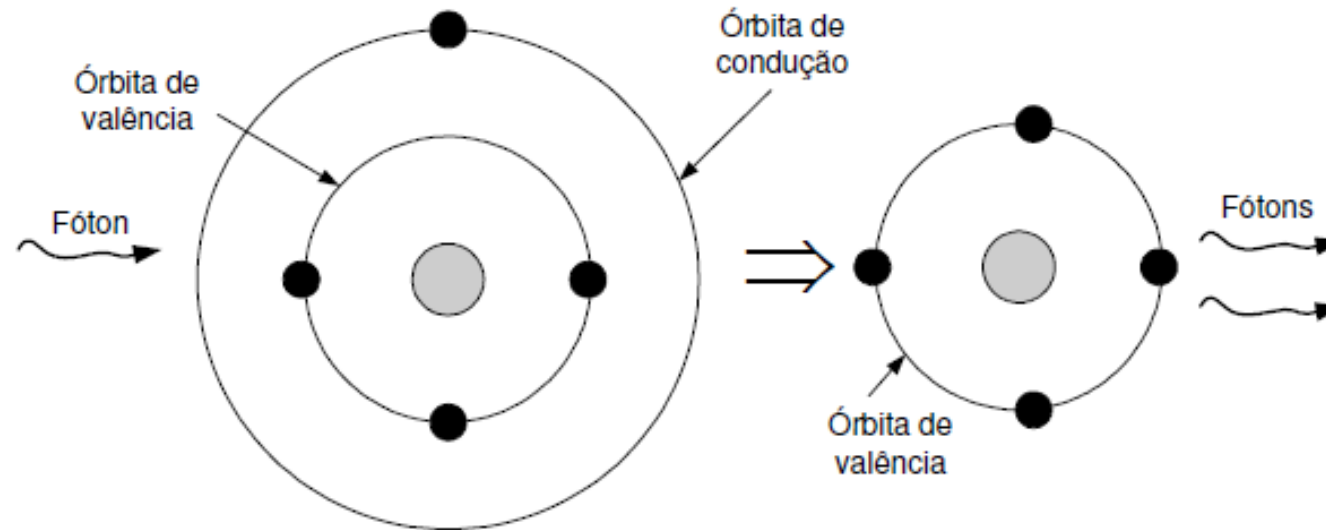
- Este retorno se faz, obrigatoriamente, pela emissão de outro fóton, como mostra a Figura 10;
- Este novo fóton possui a mesma frequência e a mesma fase do fóton incidente;
- Este estímulo, provocado pelo fóton incidente, não envolve a absorção de sua energia;

3. Fonte Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

- Portanto, o fóton incidente, após estimular o átomo de energia superior, continua existindo;
- Podemos dizer que a entrada de um fóton acarretou a presença de dois fótons: um que já existia e outro que passou a existir;
- Isto significa que a potência luminosa da saída ficou o dobro da potência luminosa de entrada;

3. Fonte Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

Figura 10. Emissão estimulada de fótons.



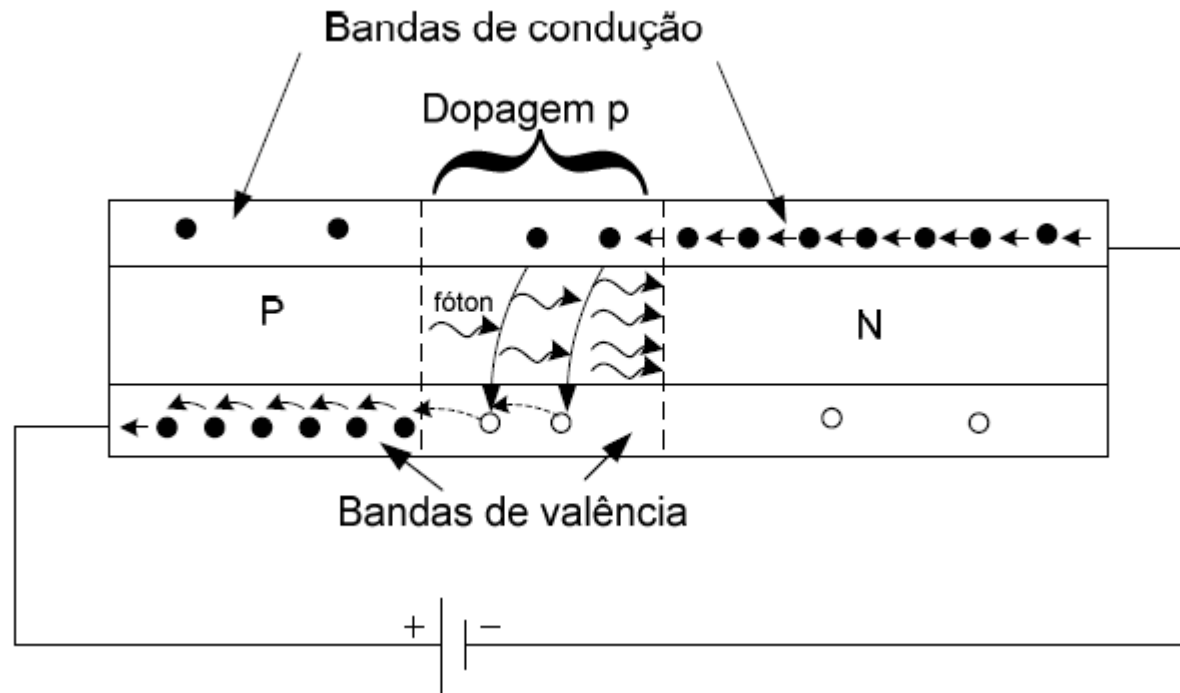
Fonte: Apostila de Comunicações Ópticas

3. Fonte Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

- Modernamente, o diodo laser é constituído de três partes: uma parte N, uma parte P e uma parte intermediária dopada fracamente com elementos trivalentes, como mostra a Figura 11;
- É preciso lembrar que, caso haja poucos elétrons livres, a maioria dos fótons incidentes será absorvida pelos átomos e não estimularia a emissão de luz;

3. Fonte Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

Figura 11. Construção diodo laser.



Fonte: Apostila de Comunicações Ópticas

3. Fonte Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

- Portanto, a amplificação de luz só se torna efetiva quando existe uma grande quantidade de elétrons livres à disposição de serem estimulados pelos fótons;
- Por isto o laser trabalha com polarização direta, para que se produza uma intensa corrente elétrica;

3. Fonte Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

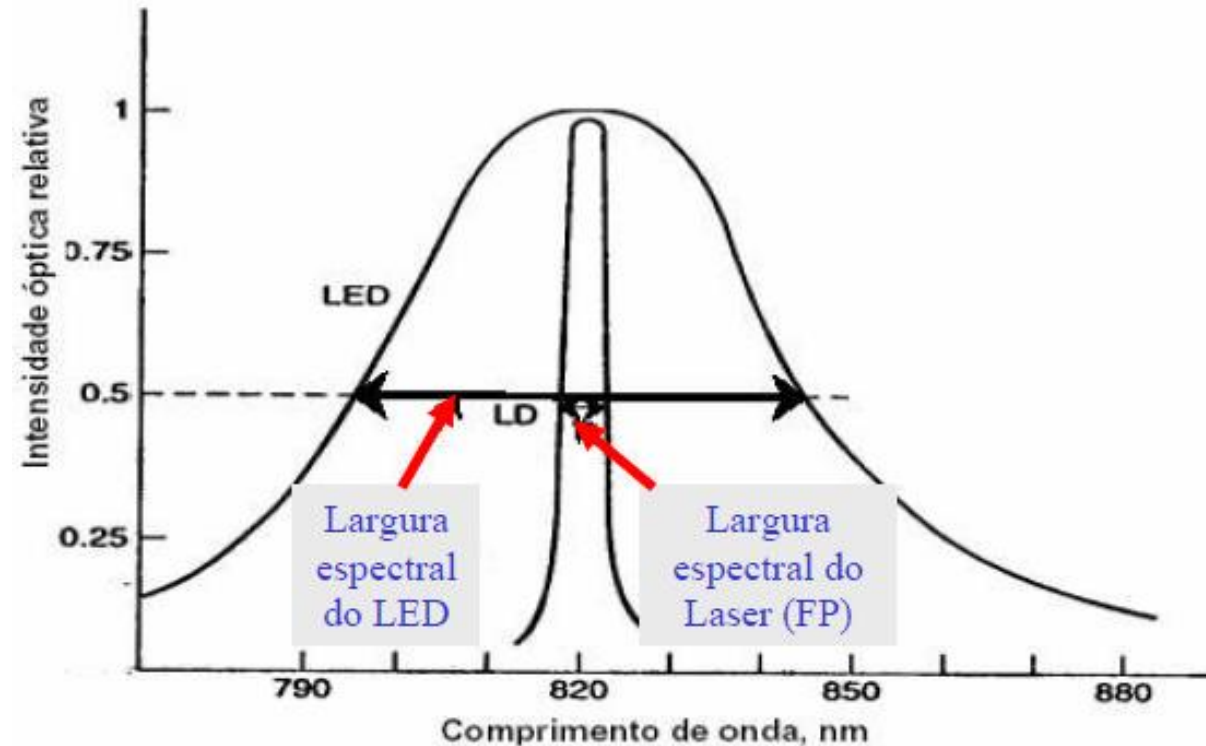
- Mesmo com a polarização direta, não é qualquer valor de corrente elétrica que acarreta a amplificação de luz;
- O material utilizado na construção do laser é o arseneto de gálio, com os mesmos elementos dopantes que são utilizados nos LEDs;

3. Fonte Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

- A luz emitida pelo laser é altamente direcionada, com pequena dispersão, como pode ser visto na Figura 12;
- Essa característica acarretará um melhor acoplamento de luz no núcleo da fibra óptica;
- Os lasers geralmente são empregados em fibras ópticas monomodo;

3. Fonte Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

Figura 12. Comparação de espectro LED x Laser.



Fonte: Apostila de Comunicações Ópticas.

3. Fonte Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

- Operam geralmente nas janelas de transmissão de 1310 nm e 1550 nm;
- Como vantagens dos lasers, pode-se citar:
- Menor largura de espectro
- Maior potência óptica
- Altas taxas de transmissão
- Menor divergência na emissão
- Melhor acoplamento na fibra

3. Fonte Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

- Como desvantagens dos lasers, pode-se citar:
- Maior custo
- Menor tempo de vida
- Circuitos drivers mais complexos
- Maior sensibilidade a temperatura

4. Fotodiodo PIN

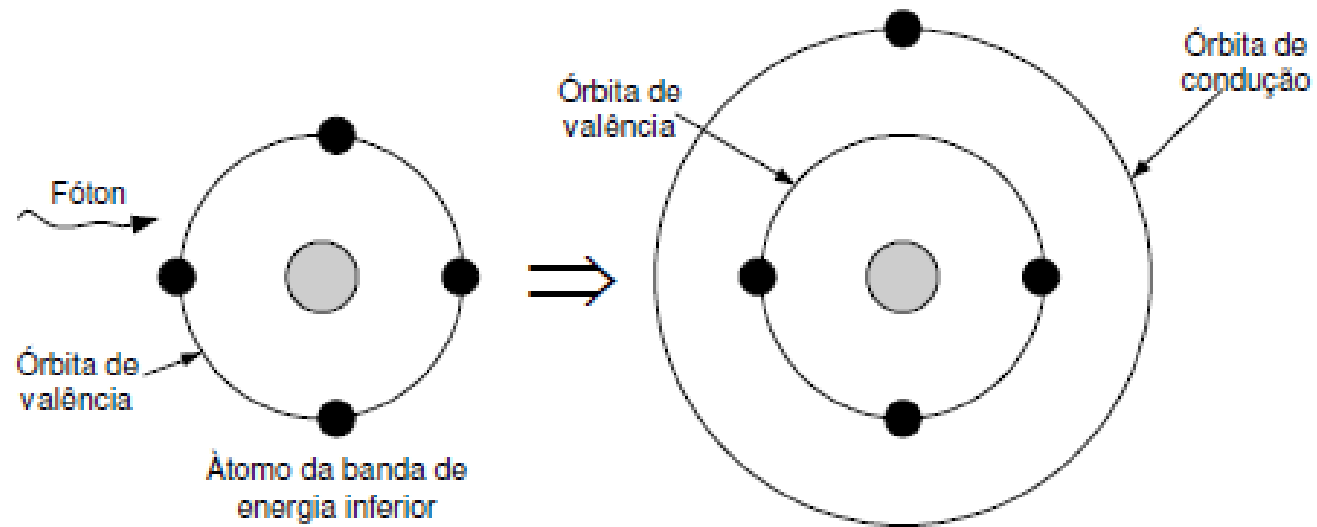
- Foi visto, nos tópicos anteriores, que a passagem de um elétron da banda de valência para a banda de condução acontece devido ao fornecimento de energia térmica aos átomos da treliça do cristal;
- Entretanto, existe outra forma disto acontecer;

4. Fotodiodo PIN

- É o fornecimento da energia de um fóton a um átomo da banda de energia inferior;
- Este fóton transfere sua energia para um dos elétrons da órbita de valência daquele átomo;
- Desta maneira, este elétron passa a fazer parte da população de elétrons da banda energética de condução, como mostra a Figura 13;

4. Fotodiodo PIN

Figura 13. Elétron passando da banda de valência para a banda de condução.



Fonte: Apostila de Comunicações Ópticas

4. Fotodiodo PIN

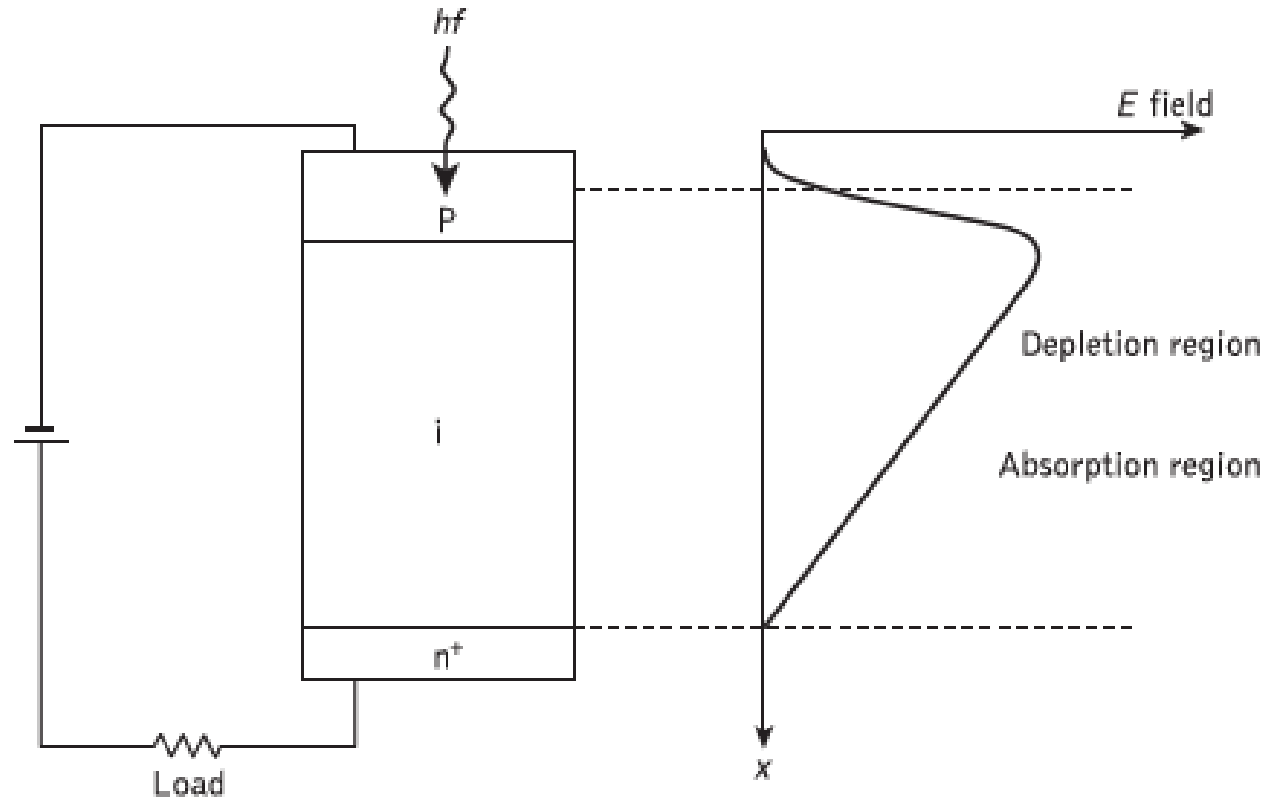
- Quando um fóton fornece sua energia para um átomo, ele deixa de existir;
- Nesta situação, diz-se que esse fóton foi absorvido pelo átomo do cristal semicondutor;
- O efeito da absorção de fótons pelo material é a base do funcionamento dos diodos fotodetectores;

4. Fotodiodo PIN

- Na Figura 14 encontra-se representada a estrutura típica de um diodo PIN;
- Esta estrutura é constituída por duas regiões fortemente dopadas, onde se estabelecem os contatos metálicos, e uma região intermediária fracamente dopada;

4. Fotodiodo PIN

Figura 14. Estrutura do fotodiodo PIN.



Fonte: Optical Fiber Communications: Principles and Practice, 3ª edição.

4. Fotodiodo PIN

- Quando um fóton incidente tem energia maior ou igual ao intervalo energético entre as bandas do semicondutor, essa energia fornecida pelo fóton excita um elétron da banda de valência, fazendo este se deslocar para a banda de condução;
- Este processo vai gerando pares de elétron/lacuna, que constituem justamente os fotoportadores;

4. Fotodiodo PIN

- O elevado campo elétrico na região de depleção faz com que os portadores se separem e sejam recolhidos pelos terminais da junção inversamente polarizada;
- Este movimento de cargas provoca um fluxo de corrente no circuito exterior, conhecida como corrente fotodetectada;

4. Fotodiodo PIN

- Um PIN ideal deveria originar um par elétron/lacuna na região de depleção para cada fóton incidente;
- Na prática, contudo, isto não se verifica;
- Nem todos os fótons incidentes são absorvidos e originam pares elétron/lacuna;

4. Fotodiodo PIN

- A eficiência quântica depende do material usado para fabricar o fotodiodo e do comprimento de onda da radiação incidente;
- Existe um comprimento de onda crítico λ_c , acima do qual a eficiência quântica se anula, porque os fótons com esses comprimentos de onda não possuem energia suficiente para gerar pares elétron/lacuna;

4. Fotodiodo PIN

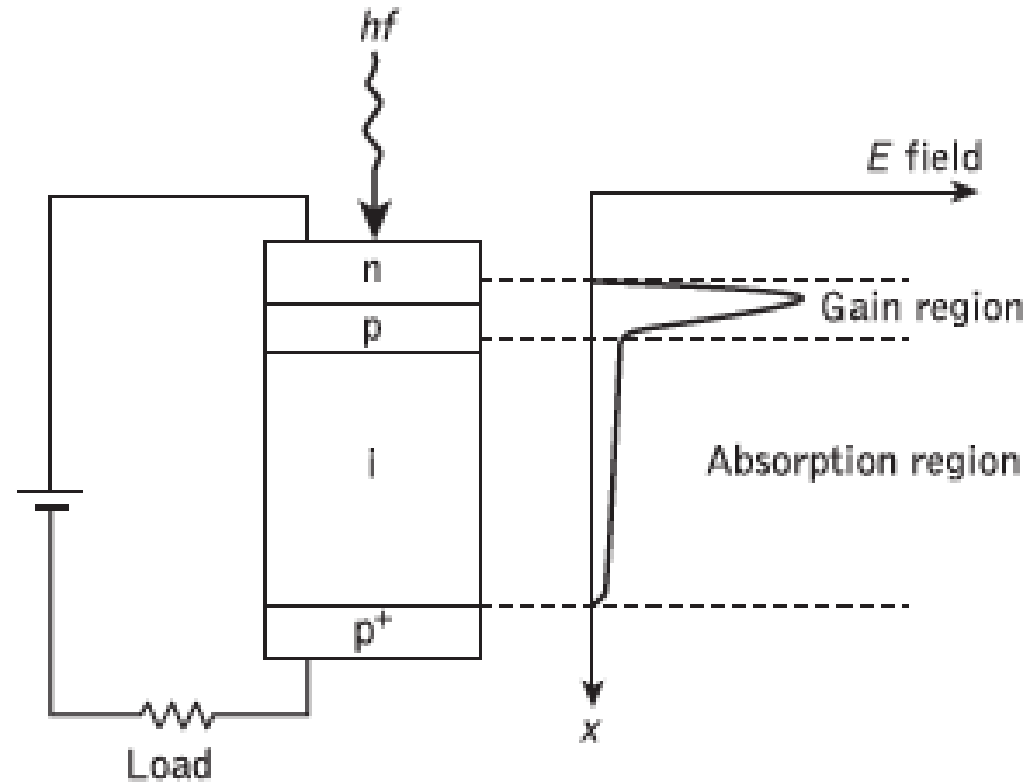
- Outra grandeza usada para caracterizar os fotodiodos é a responsividade R_λ , a qual relaciona a corrente elétrica na saída do fotodiodo com a potência óptica nele incidente;
- Independente do tipo de fibra, os fotodiodos PIN geralmente operam na região entre 850 a 1310 nm;

5. Fotodiodo Avalanche

- Outro tipo de fotodetector muito usado nos sistemas de comunicação óptica é o fotodiodo de avalanche ou APD;
- Neste fotodiodo, a corrente elétrica gerada em resposta ao fluxo de fótons é amplificada no interior do próprio dispositivo;
- A Figura 15 mostra a estrutura típica de um fotodiodo APD;

5. Fotodiodo Avalanche

Figura 15. Estrutura do fotodiodo APD.



Fonte: Optical Fiber Communications: Principles and Practice, 3ª edição

5. Fotodiodo Avalanche

- Os fotodiodos de avalanche são construídos de forma a terem uma região com um elevado campo elétrico, que irá acelerar os fotoportadores até uma velocidade suficiente para que as colisões entre os átomos produzam novos portadores;
- Estas partículas criadas por ionização são aceleradas pelo campo elétrico, dando então continuidade ao processo de avalanche;

5. Fotodiodo Avalanche

- Deste modo, os diodos de avalanche possuem uma sensibilidade muito mais elevada que os diodos PIN, e são, por isso, particularmente importantes nas aplicações em que os níveis de iluminação são muito baixos;
- A Figura 16 mostra um quadro comparativo entre os diodos PIN e APD.

5. Fotodiodo Avalanche

Figura 16. Comparação entre PIN x APD.

CARACTERÍSTICAS	PIN	APD
Sensibilidade	Menor	Muito maior
Linearidade	Maior	Menor
Relação sinal/ruído	Pior	Melhor
Custo	Baixo	Alto
Vida útil	Maior	Menor
Tempo de resposta	Maior	Menor
Variação das características com a variação da temp.	Menor	Maior
Circuitos de polarização	Simples	Complexo

Fonte: Apostila de Comunicações Ópticas

Informações

Este material de slides foi escrito, para esta disciplina, por meio de colaboração dos professores: Prof. Dr. Valdez Aragão de Almeida Filho e profa. Dra. Cindy Stella Fernandes.

Bibliografia

Bibliografia Básica

- KEISER, G.: **Optical Fiber Communications**. Mac-Graw Hill, 2000.
- RIBEIRO, J. A. J.: **Comunicações Ópticas**. 4ª edição. São Paulo. Editora Érica, 2003.
- AGRAWAL, G. P.: **Fiber-Optic Communication Systems**. John Wiley & Sons, 2002.
- PINHEIRO, J. M. dos S.: **Cabeamento Óptico**. São Paulo. Editora Campus, 2004.
- SENIOR, J. M.: **Optical Fiber Communications: Principles and Practice**. Prentice-Hall, 2009.

Contato

Contato Aluno/professor

- **SIGAA (Oficial)**
- Dias de aulas
- E-mails para contato: cindy.fernandes@unifesspa.edu.br (Oficial Unifesspa)
cindy.fernandes@gmail.com (Não Oficial - pessoal)
- WhatsApp: (91) 98256 – 9649 (Não Oficial)