

---

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE EDUCAÇÃO E SAÚDE  
Curso DE LICENCIATURA EM FÍSICA



## Física dos Painéis Solares

Autor: Roniel de Lima Araújo

Orientador: Prof. Dr. Fábio Ferreira de Medeiros

Cuité-PB

Fevereiro / 2015

---

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

CENTRO DE EDUCAÇÃO E SAÚDE

GRADUAÇÃO DE LICENCIATURA EM FÍSICA

Roniel de Lima Araújo

Física dos Painéis Solares

Cuité-PB

2015

RONIEL DE LIMA ARAÚJO

FÍSICA DOS PAINÉIS SOLARES

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como exigência parcial  
para a obtenção do título de Graduação  
do Curso de Licenciatura em Física da  
Universidade Federal de Campina Grande.

Orientador: Prof. Dr. FÁBIO FERREIRA DE MEDEIROS

Cuité-PB

2015

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA NA FONTE  
Responsabilidade Rosana Amâncio Pereira – CRB 15 – 791

A663f Araújo, Roniel de Lima.

Física dos Painéis Solares. / Roniel de Lima Araújo. –  
Cuité: CES, 2015.

62 fl.

Monografia (Curso de Licenciatura em Física) – Centro de  
Educação e Saúde / UFCG, 2015.

Orientador: Dr. Fábio Ferreira de Medeiros

1. Dispositivos fotovoltaicos. 2. Energia renovável. 3. Matriz  
energética. I. Título.

Biblioteca do CES - UFCG

CDU 620.97

RONIEL DE LIMA ARAÚJO

FÍSICA DOS PAINÉIS SOLARES

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como exigência parcial  
para a obtenção do título de Graduação  
do Curso de Licenciatura em Física  
da Universidade Federal de Campina  
Grande.

Aprovada em \_\_\_\_\_ de 2015.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. FÁBIO FERREIRA DE MEDEIROS - Orientador  
UFCG

---

Prof. Dr. HERON NEVES DE FREITAS - Examinador Interno  
UFCG

---

Prof. Dr. JOSECLÉCIO DUTRA DANTAS - Examinador Interno  
UFCG

---

Prof. Dr. PEDRO CHAVES DE SOUSA SEGUNDO - Suplente  
UFCG

Cuité-PB

2015

Uma pessoa inteligente resolve um problema,  
um sábio o previne. (Albert Einstein)

Dedico este trabalho a minha família, que  
sempre acreditou em mim.

Obrigado por tudo.

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por ter me iluminado e me dado forças para superar as dificuldades.

Agradeço aos meus pais Francisco e Rosângela que, sem dúvida nenhuma, estiveram presentes em todos os momentos, possibilitando a conclusão deste curso.

Agradeço aos meus irmãos Franciel, Francielma e Romildo pelo apoio prestado.

Agradeço à minha esposa Aline pelo apoio, compreensão e paciência.

Agradeço aos meus avós e tios que torceram por mim.

Agradeço ao professor Dr. Fábio Ferreira de Medeiros pela orientação, dedicação e interesse com que acompanhou este trabalho.

Agradeço a todos os professores que contribuíram para minha formação.

A todos que de forma direta e indireta contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.



# Lista de Figuras

1.1	O crescimento global acumulado da capacidade fotovoltaica [1] .....	3
1.2	Potencial energético brasileiro [2] .....	5
1.3	Combustíveis usados na geração de energia [20] .....	6
2.1	Nível de energia da estrutura de banda do metal, do isolante e do semicondutor [4].....	8
2.2	Efeito Hall [11].....	11
2.3	Geração de uma rede cristalina devido à translação de um cubo [21] .....	13
2.4	Células primitivas de Wigner-Seitz [21] .....	14
2.5	Estrutura cristalina do cloreto de sódio [4] .....	14
2.6	Redes de Bravais bidimensionais [4].....	15
2.7	Redes de Bravais tridimensionais [4].....	16
2.8	Estrutura de banda de energia do Silício e do Germânio [4] .....	21
3.1	Distribuição das $n_i$ partículas nos $N_i$ estados com energia $E_i$ [11] .....	24
3.2	Distribuição de Fermi-Dirac [11] .....	28
3.3	Distribuição de Fermi-Dirac: semicondutor intrínseco (a), tipo n (b) e tipo p (c) [11] .....	29
3.4	Potencial periódico no cristal em uma dimensão [12] .....	30
4.1	Efeito fotoelétrico [9] .....	34
4.2	Satélite Vanguard I [25] .....	35
4.3	Dispositivo PV, converte a luz solar em energia elétrica de corrente DC [22].	36
4.4	Módulos solares de silício monocristalino [3] .....	37
4.5	Módulos solares de silício policristalino [3] .....	37
4.6	Módulos solares de silício amorfo [3] .....	38
4.7	Tipos de tecnologias fotovoltaicas [23] .....	38

4.8	Esquema de filmes finos de CdTe, CIGS e a-Si [23].....	39
4.9	Módulos solares de células orgânicas [3] .....	40
A.1	Efeito fotoelétrico [9] .....	43

# Lista de Tabelas

1.1	Geração de energia elétrica no Brasil [2] .....	4
2.1	Elementos e compostos que cristalizam em redes cúbicas simples (SC) e os respectivos valores do parâmetro de rede <b>a</b> [21] .....	18
2.2	Elementos e compostos que cristalizam em redes cúbicas de corpo centrado (BCC) e os respectivos valores do parâmetro de rede <b>a</b> [21] .....	18
2.3	Elementos e compostos que cristalizam em redes cúbicas de face centrada (FCC) e os respectivos valores do parâmetro de rede <b>a</b> [21] .....	19

# Sumário

<b>Agradecimentos</b>	<b>vi</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>viii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>ix</b>
<b>Resumo</b>	<b>xii</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Apresentação</b>	<b>1</b>
1.1 Introdução .....	2
1.2 Motivação .....	5
<b>2 Semicondutores</b>	<b>7</b>
2.1 Noções de Cristalografia .....	12
2.2 Cristais semicondutores .....	18
<b>3 Propriedades dos Materiais Semicondutores</b>	<b>24</b>
3.1 Distribuição de Fermi-Dirac de um Metal Semicondutor .....	24
3.2 Estruturas de Bandas de Energia.....	28
3.2.1 Teorema de Bloch .....	30
3.3 Propriedades Ópticas .....	31
<b>4 Células Solares</b>	<b>34</b>
4.1 Desenvolvimento das Células Solares .....	34
4.2 Estrutura das Células Solares .....	35
4.2.1 Cristais Monocristalinos (m-Si) .....	36

4.2.2	Cristais Policristalinos (p-Si).....	37
4.2.3	Cristais Amorfos (a-Si).....	37
4.3	Materiais utilizados na fabricação das células solares .....	38
4.3.1	Células de filmes finos .....	39
4.3.2	Células orgânicas .....	39
<b>5</b>	<b>Utilização dos painéis solares</b>	<b>41</b>
5.1	Perspectivas .....	42
<b>A</b>	<b>Efeito fotoelétrico</b>	<b>43</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>45</b>

# Resumo

Diante do atual aumento na demanda de energia e a preocupação com fontes energéticas não poluentes, a implantação de dispositivos fotovoltaicos é uma alternativa que se estabelece como fonte de energia renovável e não poluente.

Este trabalho apresenta inicialmente dados que refletem o crescimento mundial na utilização de dispositivos fotovoltaicos, a matriz energética brasileira, onde se mostra as fontes utilizadas na geração de energia, e a evolução dos recursos energéticos mundiais. As células fotovoltaicas são fabricadas com materiais semicondutores; por isto vamos apresentar algumas informações importantes à teoria dos semicondutores, como redes de Bravais, tipos de redes cristalinas e coeficiente de absorção. É fundamental entendermos o que é uma célula solar, sua estrutura e os cristais semicondutores usados em sua fabricação.

Palavras-chave: Dispositivos fotovoltaicos. Energia renovável. Matriz energética.

# Abstract

In today's increase in the energy demand and the concern about energy sources clean, the deployment of photovoltaic devices is an alternative that is established as a source of renewable and clean energy.

Firstly this paper presents data that reflects the worldwide growth in the use of photovoltaic devices, the Brazilian energy matrix, which shows the sources used in power generation, and the development of world energy resources. Photovoltaic cells are made of semiconductor materials, for this we will introduce some important information theory of semiconductors, as Bravais lattices, types of crystal lattices and absorption coefficient. It is essential to understand what is a solar cell, its structure and semiconductor crystals used in their manufacture.

Keywords: Photovoltaic devices. Renewable energy. Energy matrix.

# Capítulo 1

## Apresentação

Nessa monografia trataremos das fontes de energia elétrica, focando o uso das células fotovoltaicas.

Esta monografia está estruturada em cinco capítulos.

O primeiro capítulo apresenta uma introdução abordando o consumo de energia elétrica, o uso das células solares e os países que mais utilizam esta tecnologia.

O segundo capítulo descreve um pouco sobre semicondutores e, em seguida, algumas noções de cristalografia e os tipos de redes de Bravais, e posteriormente sobre cristais semicondutores.

No capítulo três são apresentadas as propriedades dos materiais semicondutores, tais como, distribuição de Fermi-Dirac de um metal semicondutor, as estruturas de banda de energia, o teorema de Bloch e por fim as propriedades ópticas.

O quarto capítulo descreve o desenvolvimento das células solares e suas estruturas, os tipos de cristais mais usados na fabricação de células PV e alguns materiais que são usados na fabricação fotovoltaica.

O capítulo cinco apresenta as considerações finais do trabalho realizado.

Por fim, apresentamos a lista de referências bibliográficas, usada para realização do trabalho de monografia.



## 1.1 Introdução

A energia solar tem um papel promissor, tanto para o uso no aquecimento de água em casas, escolas e hospitais, quanto para a geração de energia fotovoltaica (PV). Quando usamos a energia solar para aquecer a água para tomar banho, por exemplo, evitamos o gasto de energia elétrica fornecida por usinas como as hidrelétricas e termoeletricas, que são grandes contribuintes para geração de gases do efeito estufa.

A utilização de fontes de energias alternativas como, a energia eólica e a energia fotovoltaica são símbolos tecnológicos que visam um futuro abastecimento de energia sustentável em muitos países. Ao mesmo tempo que a geração de energia fotovoltaica é reconhecida como uma promissora fonte de energia renovável e que não agride o meio ambiente. Em contra partida, os custos para compra e instalação deste tipo de equipamento são considerados muito altos, se comparados com a energia da rede convencional. Uma das principais características que favorecem a geração de energia elétrica, usando painéis solares, é o grande potencial de energia irradiada diariamente pelo Sol.

A sociedade moderna tornou-se dependente da energia elétrica devido ao seu importante papel em proporcionar maior capacidade de trabalho, produção e com isso se desenvolver, oferecendo conforto, comodidade e o bem-estar à população. Diante da importância da energia elétrica e o crescente aumento da sua demanda, temos uma preocupação com a crescente utilização de fontes convencionais de energia baseadas em combustíveis fósseis, e conseqüentemente com os problemas ambientais provocados por este tipo de tecnologia.

O aumento no consumo de energia elétrica torna a busca por sistemas alternativos de geração de energia uma constante. Como a sociedade atual tem aumentado suas necessidades energéticas, o uso de fontes de energias renováveis e alternativas surge como um fator importante que visa suprir a demanda de energia elétrica, sem agredir o meio ambiente e serve como base para um desenvolvimento sustentável. Por outro lado, a utilização de usinas termoeletricas para geração de energia elétrica são responsáveis por grandes emissões de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) na atmosfera.

Há diversas formas de geração de energia elétrica menos prejudiciais ao meio ambiente, como por exemplo, a energia solar e a eólica. A produção de energia elétrica solar ocorre a partir da conversão direta da energia irradiada pelo Sol em energia elétrica através de painéis solares formados por células fotovoltaicas (Photovoltaics - PV). A energia

proveniente do Sol, tanto pode ser usada para conversão em energia elétrica, usando módulos fotovoltaicos, ou como fonte de energia térmica (aquecimento de fluidos e etc.). Por questões políticas e econômicas, o uso da energia solar que atinge a superfície terrestre constantemente em nosso país ainda é extremamente limitado.

A capacidade PV cumulativa<sup>1</sup> tem aumentado devido ao desenvolvimento do mercado. Na Figura 1.1, percebe-se que há um grande crescimento da capacidade PV cumulativa mundial, os maiores produtores dessa energia são Alemanha e Itália. Porém, atualmente a China é o país que mais fabrica células fotovoltaicas.

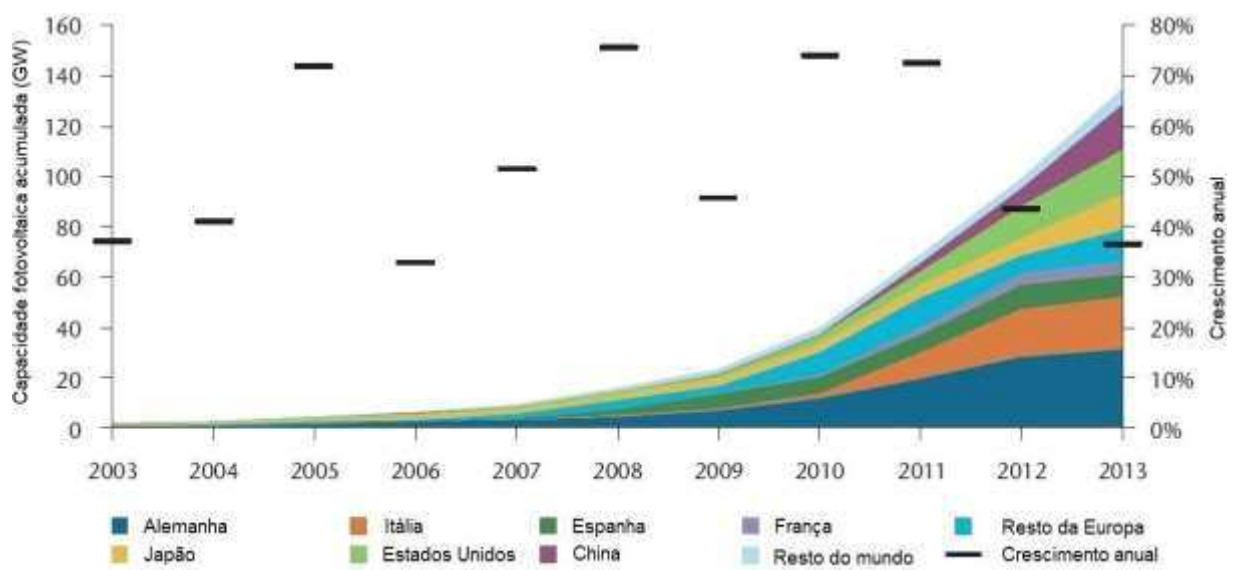


Figura 1.1: O crescimento global acumulado da capacidade fotovoltaica [1].

O Brasil possui elevados índices de radiação solar com um enorme potencial de aproveitamento. Atualmente o Brasil, como mostrado na Tabela 1.1, possui um total de 3.612 empreendimentos para produção de energia elétrica em operação, gerando um total máximo de 134.351.261 kW de potência. Com este potencial é possível fornecer energia elétrica para cerca de 1 milhão e 119 mil e 593 residências com um consumo médio de 120 kW. Desses empreendimentos instalados apenas 317 (aproximadamente 8.7%) são de energia fotovoltaica que geram um potencial total máximo de 15.179 kW de potência. No Brasil não existe nenhuma central geradora de energia fotovoltaica em fase de construção, mas existem dois empreendimentos com construção não iniciadas que serão capazes de gerar cerca de 58.548 kW, podendo assim, fornecer energia para mais de 400 residências

<sup>1</sup>Capacidade de geração de energia elétrica.

com consumo médio de 120 kW [2]. Na Tabela 1.1, temos os dados atuais de geração o de energia elétrica no Brasil.

Tabela 1.1: Geração de energia elétrica no Brasil [2].

<b>Empreendimentos em Operação</b>			
<b>Tipo</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Potência (kW)</b>	<b>%</b>
Central Geradora (C.G.) Hidrelétrica	488	312.142	0, 23
Central Geradora (C.G.) Eólica	238	5.139.489	3, 83
Pequena Central (P.C.) Hidrelétrica	472	4.753.509	3, 54
Central Geradora (C.G.) Solar Fotovoltaica	317	15.179	0, 01
Usina Hidrelétrica	201	84.319.838	62, 76
Usina Termelétrica	1.894	37.821.104	28, 15
Usina Termonuclear	2	1.990.000	1, 48
<b>Total</b>	<b>3.612</b>	<b>134.351.261</b>	<b>100</b>

A Figura 1.2 deixa mais claro o potencial de energia utilizado no Brasil. A produção de energia pelas centrais geradoras eólica e fotovoltaica fornecem menos de 4% do total de energia gerada. Atualmente mais de 90 % da energia gerada no Brasil é produzida nas usinas hidrelétricas e termelétricas. Em junho de 2012, as usinas hidrelétricas produziam 66,49 % da energia total gerada e as usinas termelétricas eram responsáveis por 26,92 %. Quando se tem uma redução na produção de energia nas usinas hidrelétricas, tem-se um aumento na produção das usinas termelétricas. Este fato fica mais evidente se considerarmos os dados de dezembro de 2001, onde 82,21 % da energia gerada era produzida pelas hidrelétricas e somente 14,00 % pelas termelétricas.

Apesar dos avanços tecnológicos na eficiência energética, e a preocupação com a sustentabilidade do abastecimento de energia, as tendências mundiais não se alteram facilmente. Na Figura 1.3, temos um gráfico que mostra o aumento na produção de energia mundial no decorrer de 40 anos e os combustíveis usados.

Mesmo que a utilização de carvão seja abundante e segura na produção de energia, seu uso provoca poluição e emissão de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) na atmosfera. A produção de energia utilizando fontes renováveis tem aumentado nos países que não fazem parte da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), como China, Índia, América Latina e África. O maior crescimento global de energias renováveis

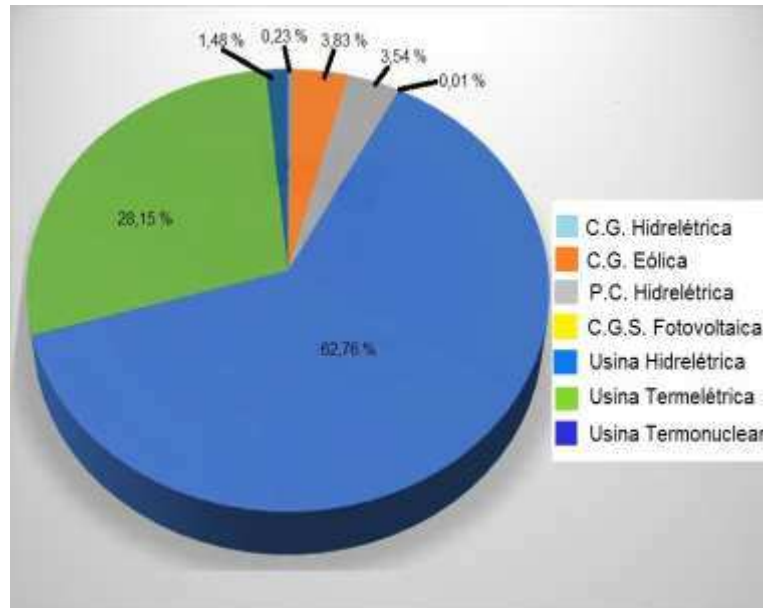


Figura 1.2: Potencial energético brasileiro [2]

foi a eólica, representando 34% do aumento, seguida da energia hidrelétrica 30% e das fotovoltaicas 18%. As células solares são fabricadas com cristais semicondutores, e por isso nos próximos capítulos trabalharemos um pouco à teoria dos semicondutores.

## 1.2 Motivação

O aumento acentuado do consumo de energia elétrica tem aspectos negativos, mesmo que esta expansão reflita o aquecimento econômico e uma melhora na qualidade de vida. Tal aumento pode significar o risco do esgotamento de recursos que são usados para produção de energia e também os impactos ambientais causados por este tipo de serviço.

Nos últimos anos, a falta de chuva tem provocado inquietações, não somente pelo fato da precariedade para obtenção de água adequada para o consumo humano, mas também pelos baixos níveis de água nos reservatórios de usinas hidrelétricas que são responsáveis por mais de 60% da energia elétrica produzida no Brasil. Para que não venhamos a ter colapsos com falta de energia e considerando o fato de que outros tipos de geração convencional de energia elétrica, como as usinas termelétricas, que emitem gases poluentes prejudiciais ao meio ambiente e seu ecossistema, o uso de fontes alternativas como a energia fotovoltaica é uma boa solução, além de não ser poluente.

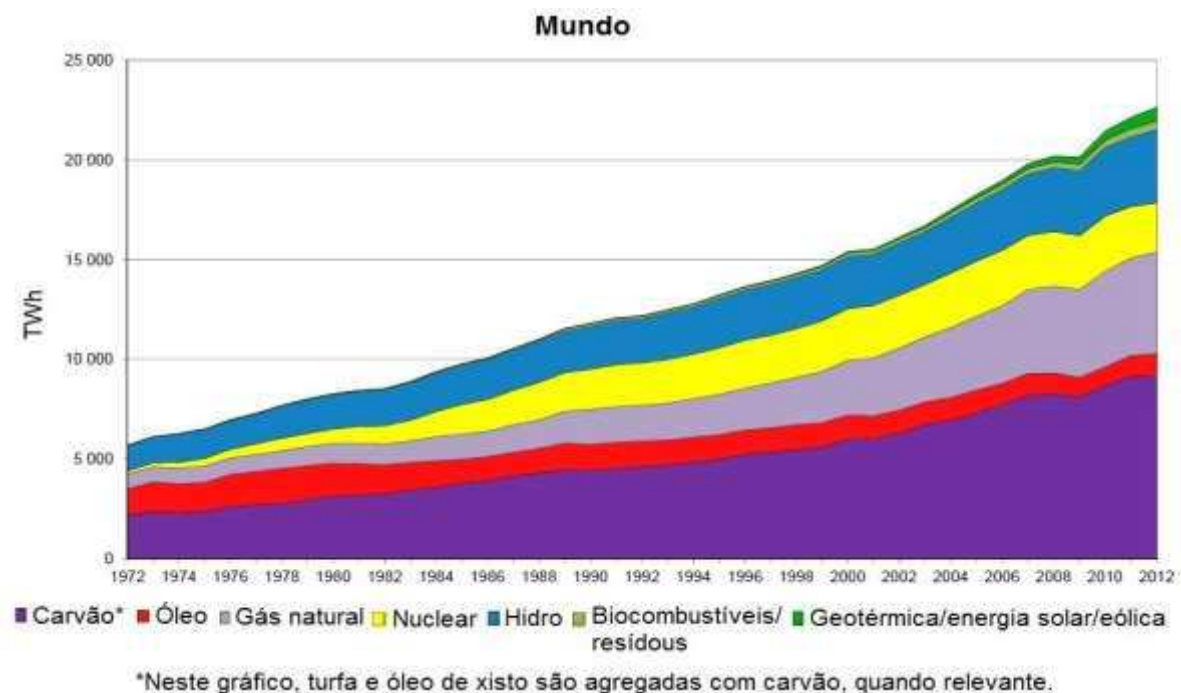


Figura 1.3: Combustíveis usados na geração de energia [20].

Portanto, uma das alternativas para que estes problemas sejam amenizados é a utilização de energias renováveis como a energia eólica e a energia fotovoltaica. O Brasil é um país tropical e passa a maior parte do ano ensolarado. Com isto, o uso da energia do Sol para conversão em energia elétrica é uma das melhores alternativas de energia sustentável. As células fotovoltaicas além de terem um tempo de vida útil longo (em média 25 anos), não emitem gases na atmosfera em seu funcionamento. No Brasil a geração de energia elétrica tem ainda um custo elevado se comparado em relação à fonte hidráulica.

# Capítulo 2

## Semicondutores

Os semicondutores são materiais com características próprias, que apresentam a banda de condução totalmente vazia, e a banda de valência, totalmente preenchida a temperatura de 0 K (zero absoluto), comportando-se neste caso como um isolante. Em temperatura ambiente, os semicondutores apresentam uma condutividade elétrica entre os extremos de um condutor e de um isolante, e uma resistividade elétrica que se localiza entre as faixas de  $10^{-2}$  a  $10^9$   $\Omega$ .cm. Quando há um aumento da temperatura, os semicondutores (como o Si e o Ge) diminuem sua resistividade elétrica (estes materiais possuem coeficiente de temperatura negativo), enquanto que os metais aumentam a resistividade. Diferentemente dos metais que são unipolares e conduzem eletricidade unicamente por intermédio dos elétrons, ou seja, um único tipo de carga; os semicondutores são bipolares e conduzem corrente elétrica, tanto por meio dos elétrons, quanto por meio dos buracos, também chamados de lacunas; ou seja, por dois tipos de cargas com sinais contrários. Com isto, os elétrons que se encontram na banda de condução e os buracos da banda de valência participam da condução elétrica como portadores de cargas. A concentração de elétrons (portadores do tipo n) que participam da condução em um semicondutor é menor que nos metais.

A condução de eletricidade nos semicondutores ocorre somente devido à geração de pares elétron-buraco. Assim, a condução por buracos é tão importante quanto a condução por elétrons. Quando o elétron recebe uma quantidade de energia suficiente para ser separado do átomo e passa da banda de valência para a banda de condução deixa um orbital vazio. Este processo é conhecido como ionização; a probabilidade de que isto ocorra é [21]:

$$p \sim e^{\frac{-E_g}{2kT}}, \quad (2.1)$$

no caso em que o número de elétrons é igual ao número de buracos, e nos fornece a variação sofrida pelos elétrons de um semicondutor intrínseco, excitados termicamente.

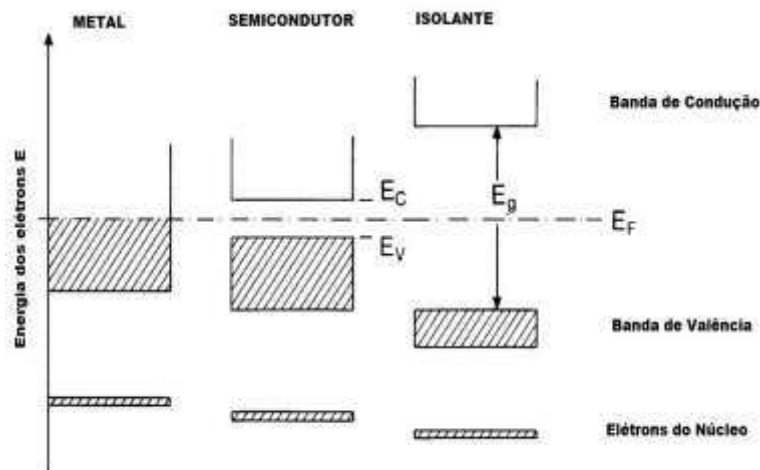


Figura 2.1: Nível de energia da estrutura de banda do metal, do isolante e do semicondutor [4].

Com a aplicação de um campo elétrico ou magnético no material semicondutor os orbitais vazios (buracos) comportam-se como se fossem partículas em movimento com carga, em módulo, igual a carga do elétron. Na Figura 2.1, temos as estruturas de bandas do metal, do semicondutor e do isolante. No semicondutor a estrutura de banda é semelhante a do isolante, mas a energia do *gap*<sup>1</sup> ( $E_g$ ), do isolante é muito maior que a do semicondutor, sendo a distância entre a banda de valência e a banda de condução maior no isolante.

Entre a banda de valência localizada na parte superior com energia  $E_v$  e a banda de condução na parte inferior com energia  $E_c$ , encontra-se a banda proibida ou *gap* de energia, chamada de *bandgap* e dada por:

$$E_g = E_c - E_v. \quad (2.2)$$

<sup>1</sup> Separação energética entre a banda totalmente preenchida, ou de valência, e a totalmente vazia, ou de condução.

Estes intervalos proibidos existentes nas bandas dos materiais não podem ser ocupados e, portanto, não existem níveis de energia de elétrons. Em um metal, quanto maior a probabilidade dos estados disponíveis estarem ocupados maior será sua condução elétrica.

Podemos classificar os semicondutores como sendo, semicondutores intrínsecos (material puro) e semicondutores extrínsecos (material dopado com impurezas). Quando temos um semicondutor dopado com impurezas, este material pode ser do tipo n, ou do tipo p, e suas propriedades elétricas dependem da dopagem. Dizemos que um semicondutor é do tipo n quando a impureza é doadora, ou seja, associada com portadores de cargas negativas. Neste caso, os portadores majoritários da corrente são os elétrons e os portadores minoritários da corrente são os buracos. O semicondutor é do tipo p, quando a impureza é receptora, ou seja, associadas com portadores de cargas positivas; sendo os buracos os portadores majoritários da corrente e os elétrons os portadores minoritários. Contudo não significa que o semicondutor do tipo p contenha cargas positivas, geralmente o material é neutro (os materiais semicondutores do tipo n não contém cargas negativas, e sim, portadores de elétrons).

A probabilidade de um estado da banda de condução estar ocupado quando a diferença de energia  $E - E_F \ll kT$  é [11]:

$$f_c(E) \cong e^{-\frac{(E-E_F)}{kT}}, \quad (2.3)$$

e sendo a densidade de estado na faixa de condução dada por

$$g_c(E) = \frac{1}{2\pi^2} \frac{2m_e}{\hbar^2} \frac{\Sigma^{\frac{3}{2}}}{2} [E - E_{tt}]^{\frac{1}{2}}, \quad (2.4)$$

então, a concentração de portadores n pode ser calculada por:

$$n = \int_{E_G}^{\infty} g_c(E) f_c(E) dE. \quad (2.5)$$

E substituindo as Eqs. (2.3) e (2.4) em (2.5), temos o “n” dado por

$$n = \frac{1}{2\pi^2} \frac{2m_e}{\hbar^2} \frac{\Sigma^{\frac{3}{2}}}{2} e^{\frac{E_F}{kT}} \int_{E_G}^{\infty} [E - E_{tt}]^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{E}{kT}} dE. \quad (2.6)$$

Fazendo uma mudança de variável,  $x = E - E_{tt}$ , então,

$$n = \frac{1}{2\pi^2} \frac{2m_e}{\hbar^2} \frac{\Sigma^{\frac{3}{2}}}{2} e^{\frac{E_F}{kT}} \int_0^{\infty} [x]^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{x-E_G}{kT}} dx = \frac{1}{2\pi^2} \frac{2m_e}{\hbar^2} \frac{\Sigma^{\frac{3}{2}}}{2} e^{\frac{E_F-E_G}{kT}} \int_0^{\infty} [x]^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{x}{kT}} dx, \quad (2.7)$$

onde a integral vale,

$$\int_0^{\infty} [x]^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{x}{kT}} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{1}{kT} \frac{\Sigma^{\frac{3}{2}}}{2} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} (kT)^{\frac{3}{2}}. \quad (2.8)$$



Assim,

$$n = \frac{1}{2\pi^2} \frac{2m_e}{\hbar^2} \frac{\Sigma^3}{2} e^{\frac{E_F - E_G}{kT}} \sqrt{\pi} (kT)^{\frac{3}{2}}, \quad (2.9)$$

$$n = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{m_e kT}{\hbar^2 \pi} \frac{\Sigma^3}{2} e^{\frac{E_F - E_G}{kT}}. \quad (2.10)$$

Por outro lado, no caso em que  $E_F - E \ll kT$ , a probabilidade de que os níveis da faixa de valência estejam ocupados é

$$f_v(E) \cong e^{\frac{-(E_F - E)}{kT}}. \quad (2.11)$$

A densidade de estado na camada de valência é:

$$g_v(E) = \frac{1}{2\pi^2} \frac{2m_h}{\hbar^2} \frac{\Sigma^3}{2} [-E]^{\frac{1}{2}}. \quad (2.12)$$

De maneira análoga, podemos calcular a concentração de portadores p, fazendo:

$$p = \int_{-\infty}^{E_G} g_v(E) f_v(E) dE, \quad (2.13)$$

substituindo as Eqs. (2.11) e (2.12) em (2.13), temos,

$$p = \frac{1}{2\pi^2} \frac{2m_h}{\hbar^2} \frac{\Sigma^3}{2} e^{\frac{-E_F}{kT}} \int_{-\infty}^{E_G} [-E]^{\frac{1}{2}} e^{\frac{-E}{kT}} dE, \quad (2.14)$$

fazendo,  $x = -E$ , então:

$$p = \frac{1}{2\pi^2} \frac{2m_h}{\hbar^2} \frac{\Sigma^3}{2} e^{\frac{-E_F}{kT}} \int_0^{\infty} [x]^{\frac{1}{2}} e^{\frac{-x}{kT}} dx, \quad (2.15)$$

logo,

$$p = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{m_h kT}{\hbar^2 \pi} \frac{\Sigma^3}{2} e^{\frac{-E_F}{kT}}. \quad (2.16)$$

Podemos estabelecer o produto entre a concentração de elétrons e buracos e obter:

$$np = n_i^2 \quad (2.17)$$

onde  $n_i$  é o número de portadores. No caso de semicondutores intrínsecos o número de portadores (elétrons livres e lacunas) por centímetro cúbico, é dado por:

$$n_i^2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{m_e kT}{\hbar^2 \pi} \frac{\Sigma^3}{2} e^{\frac{E_F - E_G}{kT}} \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{m_h kT}{\hbar^2 \pi} \frac{\Sigma^3}{2} e^{\frac{-E_F}{kT}}, \quad (2.18)$$

obtendo assim,

$$n_i^2 = \frac{1}{2} \left( \frac{m_e m_h}{e h} \right)^3 \frac{k^3}{(\hbar^2 \pi)^2} T^3 e^{\frac{-E_g}{kT}}, \quad (2.19)$$

$$n_i^2 = BT^3 e^{\frac{-E_g}{kT}}. \quad (2.20)$$

onde,

$$B = \frac{1}{2} \left( \frac{m_e m_h}{e h} \right)^3 \frac{k^3}{(\hbar^2 \pi)^2}, \quad (2.21)$$

sendo que  $B$  é um parâmetro que depende do material.

Experimentalmente, para encontrar a concentração de portadores e determinar se o material semiconductor é do tipo n, ou do tipo p, aplica-se um campo magnético ao material semiconductor de forma que o campo fique perpendicular ao fluxo de cargas do material. A influência que o campo exerce é conhecido como Efeito Hall [Figura 2.2].

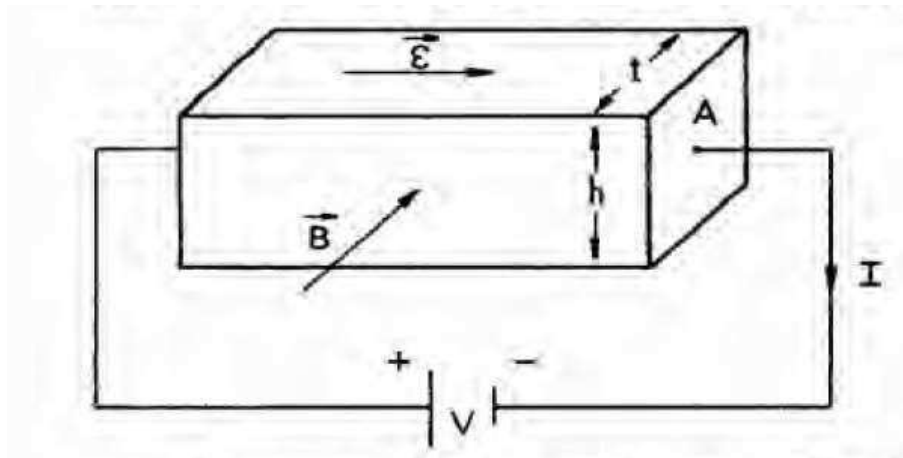


Figura 2.2: Efeito Hall [11].

Como sabe-se a aplicação de um campo magnético em um material (no caso semiconductor) faz com que haja um acúmulo de cargas nas arestas do espécime, produzindo assim um campo elétrico transversal ao fluxo de cargas e com isso produzindo um potencial expresso por [4]:

$$V_H = R_H \frac{IB}{\delta}, \quad (2.22)$$

sendo,  $R_H$  o coeficiente de Hall e  $\delta$  a espessura. Se o semiconductor for do tipo p então,  $V_H$  é positivo, e se for do tipo n,  $V_H$  é negativo.

Outros parâmetros característicos de um semiconductor são: a mobilidade Hall ( $\mu_H$ ), como sendo a razão entre o coeficiente Hall ( $R_H$ ) e a resistividade elétrica  $\rho$  do semiconductor:

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} . \quad (2.23)$$

e a mobilidade elétrica, expressa por:

$$\mu = \frac{q\tau}{m^*} , \quad (2.24)$$

onde  $\tau$  é o tempo médio das colisões e  $m^*$  a massa efetiva<sup>2</sup> do portador.

## 2.1 Noções de Cristalografia

Materiais cristalinos são formados devido à repetição periódica de sua estrutura, seja átomos ou moléculas, ao longo de grandes distâncias atômicas. Os materiais que não apresentam essa estrutura atômica de longo alcance são chamados de não-cristalinos ou amorfos. Um cristal ideal pode ser definido por uma estrutura onde os átomos se localizam de forma ordenada, constituindo uma rede definida por três vetores linearmente independentes **a**, **b** e **c**, denominados vetores fundamentais de translação; de modo que para qualquer observador localizado em **r** ou em **r'**, os aspectos atômicos são os mesmos e é dado por:

$$\mathbf{r}' = \mathbf{r} + u\mathbf{a} + v\mathbf{b} + w\mathbf{c} , \quad (2.25)$$

sendo  $u, v, w$  números inteiros quaisquer.

Variando os números  $u, v$  e  $w$  e mantendo **r** fixo, teremos um conjunto de pontos que são chamados de rede cristalina ou rede de Bravais. Os conceitos de cristal<sup>3</sup> e de rede cristalina<sup>4</sup> são diferentes e portanto não devem ser confundidos. A geração de uma rede cristalina pode ocorrer devido à translação de uma célula primitiva ou célula unitária [Figura 2.3]. Esta célula é formada pelos eixos cristalinos **a**, **b** e **c** nas arestas adjacentes, tomando a forma de um paralelepípedo.

<sup>2</sup>A massa efetiva de uma partícula é a massa que parece ter um cristal de acordo com o modelo semiclassico de transporte. A massa efetiva é uma grandeza tensorial.

<sup>3</sup>O conceito de cristal é mais amplo e o termo descreve qualquer sólido com uma estrutura interna ordenada sistemática, a despeito dele possuir ou não faces externas regulares.

<sup>4</sup>O conceito de rede cristalina está relacionado à organização dos átomos de forma geométrica.

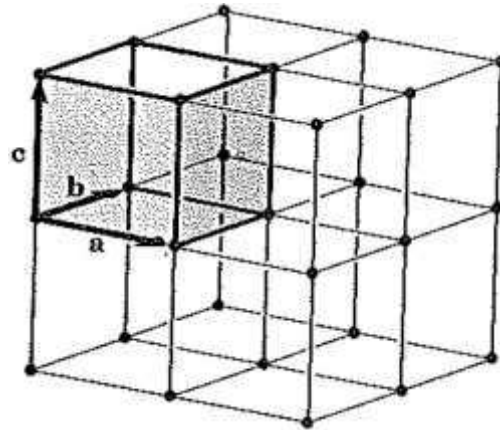


Figura 2.3: Geração de uma rede cristalina devido à translação de um cubo [21].

Com os eixos  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$  e  $\mathbf{c}$  definimos o volume de uma célula que é dada por:

$$V_c = |\mathbf{a} \times \mathbf{b} \cdot \mathbf{c}|, \quad (2.26)$$

Seja qual for a base da célula nenhuma contém um número menor de átomos que na base primitiva. Qualquer ponto que esteja fora da origem em uma rede cristalina pode ser definido por um vetor de translação ou vetor de rede dado por:

$$\mathbf{T} = u\mathbf{a} + v\mathbf{b} + w\mathbf{c}. \quad (2.27)$$

Assim podemos ligar dois pontos da rede com um vetor desta forma. Outra forma de construir uma célula é unindo os pontos mais próximos com segmento de retas; a região do espaço limitada por estes planos forma uma célula primitiva. Este tipo de célula é conhecido como célula de Winger-Seitz. A célula primitiva de Winger-Seitz é conhecida como a primeira zona de Brillouin<sup>5</sup> [Figura 2.4].

Os conceitos de rede de Bravais e de rede de translação descrevem o arranjo periódico da estrutura cristalina. Considerando uma rede de Bravais, definida por  $\mathbf{R}$ , temos:

$$\mathbf{R} = n_1\mathbf{a}_1 + n_2\mathbf{a}_2 + n_3\mathbf{a}_3, \quad (2.28)$$

sendo  $\mathbf{a}_1$ ,  $\mathbf{a}_2$  e  $\mathbf{a}_3$  vetores primitivos e  $n_1$ ,  $n_2$  e  $n_3$  números inteiros. Podemos descrever uma rede recíproca como sendo um conjunto de pontos  $\mathbf{K}$ , onde as ondas planas correspondentes  $e^{i\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}}$  têm a mesma periodicidade da rede de Bravais, ou seja, a rede recíproca é uma rede de Bravais.

<sup>5</sup>A zona de Brillouin é definida como uma célula de Winger-Seitz na rede recíproca.

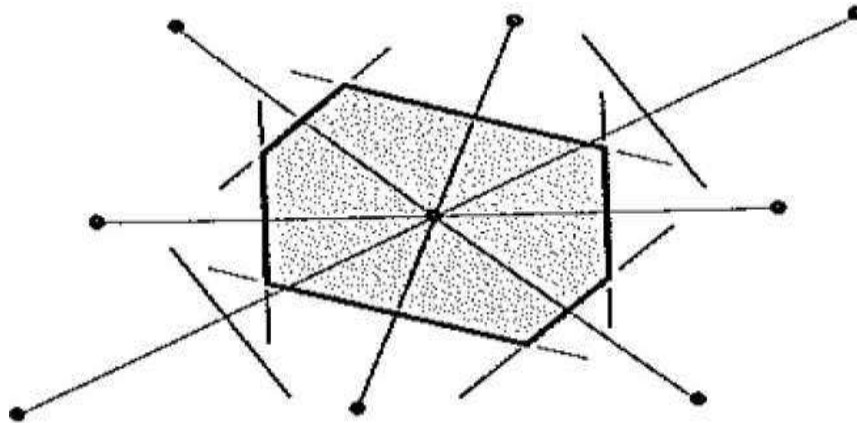


Figura 2.4: Células primitivas de Winger-Seitz [21].

Na Figura 2.5, temos a caracterização do cristal de cloreto de sódio definido em uma estrutura geométrica.

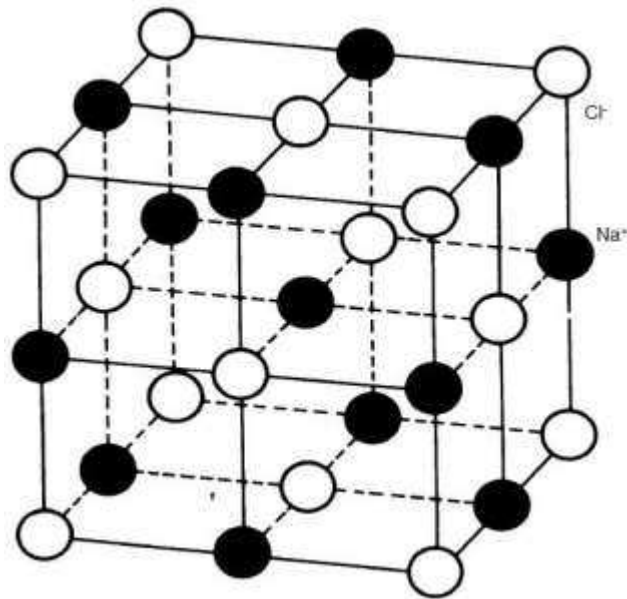


Figura 2.5: Estrutura cristalina do cloreto de sódio [4].

Considerando estruturas em duas dimensões, temos com isso cinco redes de Bravais, caracterizadas pelos módulos dos vetores  $\mathbf{a}$  e  $\mathbf{b}$ , e o ângulo  $\gamma$ . Na Figura 2.6, temos as redes quadrada, oblíqua, retangular, retangular de corpo centrado e hexagonal.

No espaço tridimensional existem 14 redes de Bravais [Figura 2.7]. Estas redes formam sete sistemas cristalográfico que são: cúbico, hexagonal, tetragonal, ortorrômbico, trigonal, monoclínico e triclínico.

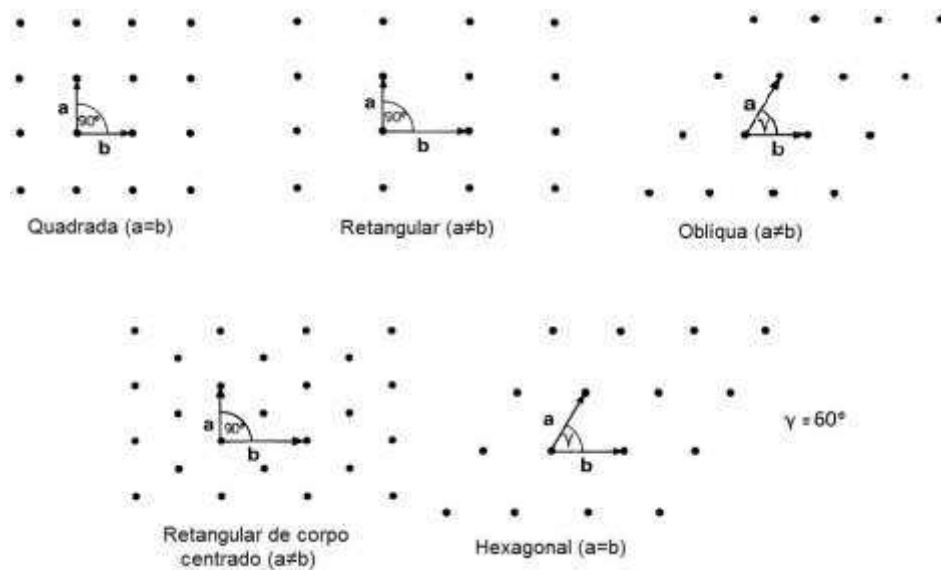


Figura 2.6: Redes de Bravais bidimensionais [4].

### \* Redes Cúbicas

As redes cúbicas em geral são caracterizadas por:

$$a = b = c , \quad (2.29)$$

$$\alpha = \beta = \gamma = \frac{\pi}{2} . \quad (2.30)$$

### \* Redes Tetragonais

Estes tipos de redes podem ser caracterizados da seguinte forma:

$$a = b \neq c , \quad (2.31)$$

$$\alpha = \beta = \gamma = \frac{\pi}{2} . \quad (2.32)$$

### \* Redes Ortorrômbricas

O que caracteriza estas redes são:

$$a \neq b \neq c , \quad (2.33)$$

$$\alpha = \beta = \gamma = \frac{\pi}{2} . \quad (2.34)$$

### \* Redes Monoclínicas

A rede monoclínica é diferenciada das demais pelas seguintes características:

$$a \neq b \neq c , \quad (2.35)$$

$$\alpha = \beta = \frac{\pi}{2} \neq \gamma . \quad (2.36)$$

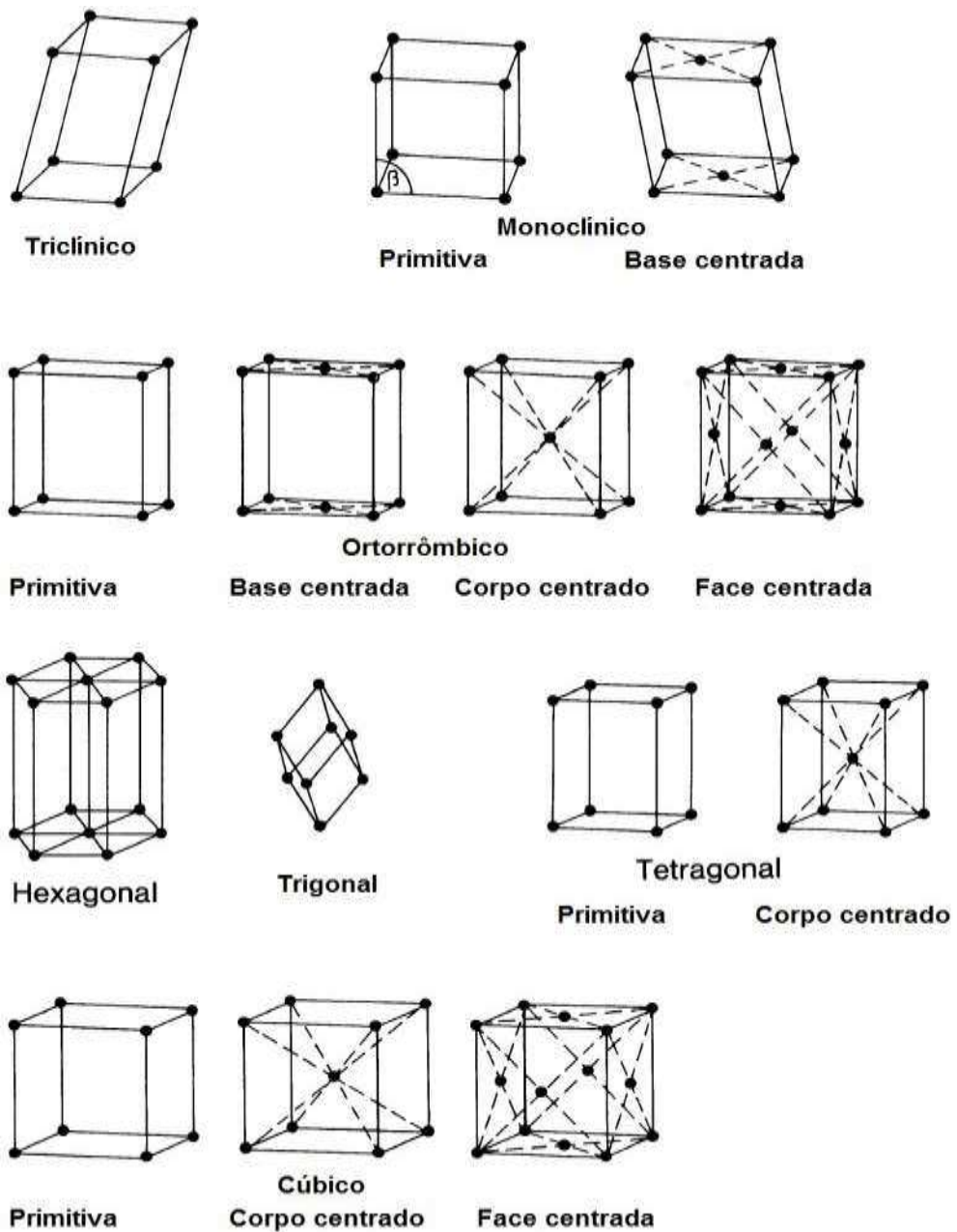


Figura 2.7: Redes de Bravais tridimensionais [4].

\* **Redes triclinicas**

Estas por sua vez apresentam as características:

$$a \neq b \neq c, \quad (2.37)$$

$$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq \frac{\pi}{2}. \quad (2.38)$$

\* **Redes Trigonais**

O que caracteriza estes tipos de redes são:

$$a = b = c, \quad (2.39)$$

$$\alpha = \beta = \gamma < \frac{2}{3}\pi. \quad (2.40)$$

\* **Redes Hexagonais**

São tipos de redes com as seguintes características:

$$a = b \neq c, \quad (2.41)$$

$$\alpha = \beta = \frac{\pi}{2}, \quad \gamma = \frac{2}{3}\pi. \quad (2.42)$$

As estruturas cristalinas para serem formadas requerem um processo lento de arrefecimento. Os cristais podem ser formados pela repetição de uma unidade elementar (um único elemento) ou pela repetição de conjuntos contendo átomos ou moléculas (que podem ser proteínas ou sais como o cloreto de sódio) na distribuição de pontos no espaço, a rede descreve a estrutura cristalina. A maneira na qual os átomos, íons ou moléculas se organizam em suas estruturas cristalinas influenciam as propriedades dos sólidos cristalinos.

Na Tabela 2.1, temos um elemento e alguns compostos que formam redes cristalinas do tipo cúbica simples (CS). O polônio (Po) é o único elemento da tabela periódica que forma uma rede cúbica simples (SC) em temperatura ambiente. Alguns elementos e compostos formam uma rede cúbica de corpo centrado (BCC), como os que estão na Tabela 2.2.

A rede cúbica de face centrada (FCC) é o tipo de rede cristalina mais comum entre os elementos da tabela periódica. Na Tabela 2.3, estão alguns elementos e compostos que formam a rede FCC.

Muitos outros compostos formam essas estruturas de redes SC, BCC, FCC e outros tipos de redes cristalinas que não estão nas tabelas, mas que constituem as estruturas



Tabela 2.1: Elementos e compostos que cristalizam em redes cúbicas simples (SC) e os respectivos valores do parâmetro de rede  $a$  [21].

<b>CS</b>	$a$ (Å)	<b>CS</b>	$a$ (Å)	<b>CS</b>	$a$ (Å)	<b>CS</b>	$a$ (Å)
Po	3, 34	CsCl	4, 11	CsBr	4, 29	CsI	4, 56
TlCl	3, 84	TlBr	3, 97	TlI	3, 74	$NH_4Cl$	3, 87
CuZn	2, 94	AgMg	3, 28	LiHg	3, 29	AlNi	2, 88
BeCu	2, 70						

Tabela 2.2: Elementos e compostos que cristalizam em redes cúbicas de corpo centrado (BCC) e os respectivos valores do parâmetro de rede  $a$  [21].

<b>BCC</b>	$a$ (Å)	<b>BCC</b>	$a$ (Å)	<b>BCC</b>	$a$ (Å)	<b>BCC</b>	$a$ (Å)
Fe	2, 87	Cr	2, 88	V	3, 03	Nb	3, 29
Mo	3, 15	Ta	3, 31	Cs	6, 08	Ba	5, 01
Li	3, 49	Rb	5, 58	K	5, 25	W	3, 16
Na	4, 22	Eu	4, 58				

de um grande número de elementos e compostos. Por exemplo, a rede cristalina do diamante, a rede hexagonal e a rede HCP (do inglês hexagonal close-packed ou hexagonal empacotada fechada). O hidrogênio (H), primeiro elemento da tabela periódica, faz parte dos materiais que apresentam uma rede cristalina do tipo HCP. Alguns outros elementos também apresentam a mesma estrutura cristalina do hidrogênio como o hélio, o magnésio, o titânio e o zinco. Dois dos principais elementos usados no desenvolvimento tecnológico, o silício (Si) e o germânio (Ge), usados para a fabricação de dispositivos eletrônicos, como os diodos, os transistores e os circuitos integrados, fazem parte de um grupo de elementos com rede cristalina do diamante. Também é o caso de outros elementos como o carbono e o estanho. Em temperatura ambiente poucos elementos formam uma rede hexagonal, como no caso do lantânio, do praseódmio e neodímio.

## 2.2 Cristais semicondutores

As redes cristalinas que compõem a estrutura dos materiais semicondutores são formadas por elementos ou compostos, constituindo assim uma gama de aplicações que variam de acordo com as propriedades dos materiais utilizados. Uma dessas propriedades é

Tabela 2.3: Elementos e compostos que cristalizam em redes cúbicas de face centrada (FCC) e os respectivos valores do parâmetro de rede **a** [21].

FCC	a (Å)	FCC	a (Å)	FCC	a (Å)	FCC	a (Å)
Ag	4,09	Al	4,05	Au	4,08	Cu	3,61
Ni	3,52	Pb	4,95	MgO	4,20	Ne	4,46
PbS	5,92	NaCl	5,63	LiF	4,02	KCl	6,28
LiBr	5,49	CdTe	5,48	Ar	5,31	Ca	5,58
InSb	6,49	CdS	5,82	ZnS	5,63	GaAs	5,65
AlAs	5,66	InP	5,86	Kr	5,64	Sr	6,08
Rh	3,80	Pd	3,89	Xe	6,13	Ir	3,84
Ac	5,31	Ce	5,16	Yb	5,48	Th	5,08
Pt	3,92						

a condutividade elétrica<sup>6</sup>; características como esta, tornam os semicondutores atrativos<sup>7</sup> para a fabricação de componentes eletrônicos.

Alguns dos materiais semicondutores são formados por elementos como o silício (Si) e o germânio (Ge) que fazem parte do grupo IV da tabela periódica, e também pela combinação de elementos formando os compostos III-V e II-VI. Os materiais que formam os compostos III-V podem ser binários<sup>8</sup> como o arseneto de gálio (GaAs) e o fosfato de índio (InP); podem ser ternários<sup>9</sup>, como o arseneto de alumínio e gálio (AlGaAs), ou quaternários<sup>10</sup>, como o fosfato de índio, gálio e arsênio (InGaAsP). Na formação dos compostos II-VI, os materiais são diferenciados por duas “classes”: os binários, como é o caso do óxido de zinco (ZnO) e telurieto de zinco (ZnTe), ou ternários, como o telurieto de mercúrio e cádmio (HgCdTe).

Nos semicondutores podem ocorrer um aumento de condutividade elétrica através de dois processos: A termocondutividade, onde há um aumento da condução devido a um aumento de temperatura; e a fotocondutividade, onde o que faz aumentar a condutividade

<sup>6</sup>Diferentemente dos metais, a densidade de transportadores de carga  $n$ , nos semicondutores depende da temperatura.

<sup>7</sup>A possibilidade de se poder variar substancialmente sua condutividade elétrica pela alteração controlada de sua composição química ou estrutura cristalina.

<sup>8</sup>No caso de combinações de dois elementos.

<sup>9</sup>No caso da combinação de três elementos.

<sup>10</sup>No caso da combinação de quatro elementos.

do material é a luz.

O Silício (Si) e o Germânio (Ge) são dois semicondutores com uma energia de *gap* indireta<sup>11</sup>, sendo suas energias do *gap*  $E_g$  1,1eV e 0,6eV, respectivamente, quando em temperatura ambiente. Na Figura 2.8, temos as estruturas de bandas de energia do Si e Ge.

Na Figura 2.8, os pontos  $\Gamma$ , X e L correspondem aos valores do vetor de onda  $\mathbf{k}$ :  $(0,0,0)$ ,  $(\frac{\pi}{a},0,0)$  e  $(\frac{\pi}{a},\frac{\pi}{a},\frac{\pi}{a})$ , respectivamente. Na estrutura de banda de energia do Silício, o topo da banda de valência, ocorre em  $K = 0$ , o ponto  $\Gamma$  da zona de Brillouin. O máximo da banda de valência é tomado como referência na escala de energia,  $E = 0$ . O mínimo da banda de condução ocorre num vetor de onda  $\mathbf{K} = \mathbf{0}$  na direção [100], próximo do ponto X na fronteira da zona de Brillouin. A estrutura de banda do Germânio é semelhante a do Silício, porém com um *gap* de energia menor, sendo,  $E_g = 1,12eV$  do Si e  $E_g = 0,66eV$  do Ge.

O movimento aleatório de partículas ocasionadas pela agitação térmica, faz com que ocorra o fenômeno de difusão de portadores, proporcionando um acúmulo de cargas nos lados do semicondutor. Estes fluxos de cargas geram uma corrente de difusão.

Seja um condutor de comprimento  $L$ , com  $N$  elétrons que demoram  $T$  segundos para percorrer uma distância  $L$ . Por definição a corrente é dada por

$$I \equiv \frac{Nq}{T} . \quad (2.43)$$

A velocidade média  $v$  dos elétrons é  $L/T$ . Logo

$$I = \frac{Nqv}{L} . \quad (2.44)$$

Por definição a densidade de corrente é:

$$J \equiv \frac{I}{A} . \quad (2.45)$$

Substituindo a Eq. (2.44) em (2.45), obtemos

$$J = \frac{Nqv}{LA} , \quad (2.46)$$

sendo, a concentração  $n$  de elétrons dada por,

$$n = \frac{N}{LA} . \quad (2.47)$$

<sup>11</sup>No *gap* indireto a energia absorvida é liberada na forma não apenas de luz, mas também de calor.

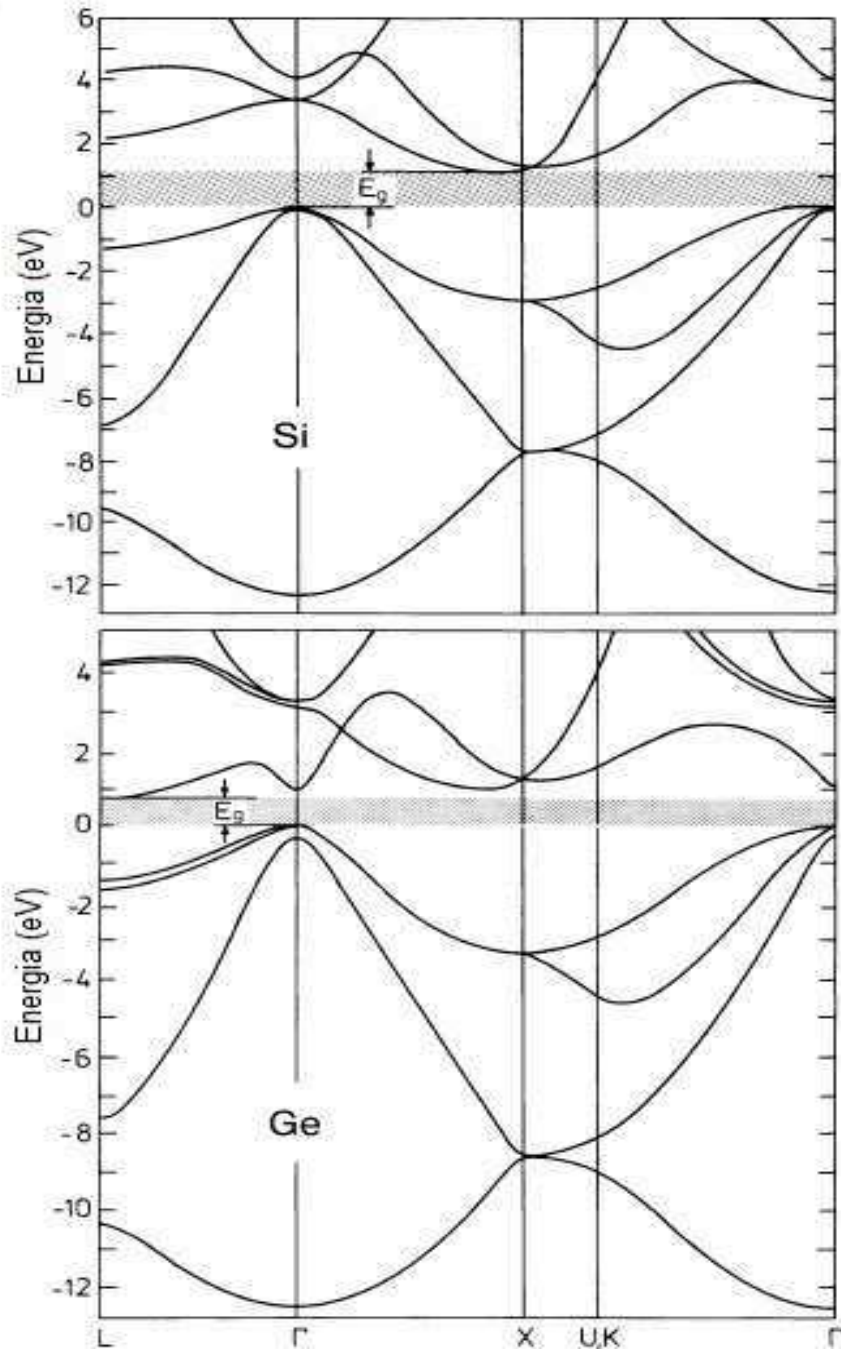


Figura 2.8: Estrutura de banda de energia do Silício e do Germânio [4].

Logo, a Eq. (2.45), torna-se:

$$J = nqv = \rho v , \quad (2.48)$$

onde  $\rho = nq$  é a densidade de carga.

A condutividade do metal é dada por:

$$\sigma = nq\mu , \quad (2.49)$$

onde  $\mu$  é a mobilidade dos portadores.

Substituindo a Eq. (2.49) na (2.48), obtemos:

$$J = \frac{\sigma}{\mu} v , \quad (2.50)$$

sendo que,

$$\frac{v}{\mu} = E . \quad (2.51)$$

Portanto,

$$J = \sigma E , \quad (2.52)$$

é a densidade de corrente do metal.

No caso dos semicondutores, a densidade de corrente é:

$$J = (n\mu_n + p\mu_p)qE . \quad (2.53)$$

Considerando o caso em que se tenha a concentração  $p$  de lacunas que varia com a distância  $x$ , existe um gradiente de concentração  $dp/dx$  de portadores. Com isto, temos uma densidade de corrente de lacunas  $J_p$  proporcional ao gradiente de concentração, dado por:

$$J_p = -qD_p \frac{dp}{dx} . \quad (2.54)$$

O termo  $D_p[m^2/s]$  é a constante de difusão para lacunas. O sinal (-) usado na expressão anterior é necessário para que a corrente tenha valor positivo, pois o gradiente da concentração de portadores é negativo, ou seja, o fluxo é da região de maior concentração para a região de menor concentração.

Como expresso na equação anterior a densidade de lacunas  $J_p$  é proporcional ao gradiente de concentração de portadores, logo pode ser expressa por:

$$\mathbf{J}_p = -qD_p \nabla_p p(x, y, z) . \quad (2.55)$$

De maneira semelhante podemos escrever a densidade de elétrons como sendo:

$$\mathbf{J}_n = -qD_n \nabla_n p(x, y, z) \quad (2.56)$$

Se o material semiconductor é sujeito a um campo elétrico, ocorre o processo de deriva de portadores. Com a presença desse campo, os elétrons livres e as lacunas são aceleradas e ganham velocidade, denominada velocidade de deriva, que de acordo com a Eq. (2.51), é expressa por:

$$\mathbf{v}_d = \mu_p \mathbf{E} \quad \text{e} \quad \mathbf{v}_d = \mu_n \mathbf{E} . \quad (2.57)$$

Estas são as velocidades de deriva, das lacunas e dos elétrons, respectivamente, sendo  $\mu_p$  a mobilidade das lacunas e  $\mu_n$  a mobilidade dos elétrons.

# Capítulo 3

## Propriedades dos Materiais Semicondutores

### 3.1 Distribuição de Fermi-Dirac de um Metal Semi-condutor

Para chegarmos à distribuição de Fermi-Dirac, vamos considerar que nosso sistema é constituído por partículas idênticas, o número de partículas é constante (ou seja, o número total de partículas é conservado), a energia total é conservada e não viola o princípio de exclusão de Pauli<sup>1</sup>.

Consideremos um sistema com  $N_i$  estados permitidos com energia  $E_i$ , sendo que nestes estados estão distribuídas  $n_i$  partículas. Com isto, temos as energias mostradas na Figura 3.1.



Figura 3.1: Distribuição das  $n_i$  partículas nos  $N_i$  estados com energia  $E_i$  [11].

<sup>1</sup>O princípio de exclusão de Pauli é um princípio da mecânica quântica onde afirma que dois férmions idênticos não podem ocupar o mesmo estado quântico simultaneamente.

Deste modo, o número de maneiras possíveis de colocar  $n_1$  partículas no estado  $N_1$  é  $W_1$ ,  $n_2$  partículas no estado  $N_2$  é  $W_2$  e assim sucessivamente. Ou seja,

$$W_1 = \frac{N_1!}{n_1!(N_1 - n_1)!} ; W_2 = \frac{N_2!}{n_2!(N_2 - n_2)!} ; W_3 = \frac{N_3!}{n_3!(N_3 - n_3)!} \dots \quad (3.1)$$

Com isto o número total de possibilidades de colocarmos as  $n_i$  partículas nos  $N_i$  estados é dado por:

$$W = W_1 W_2 W_3 \dots = \frac{N_1!}{n_1!(N_1 - n_1)!} \frac{N_2!}{n_2!(N_2 - n_2)!} \frac{N_3!}{n_3!(N_3 - n_3)!} \dots \quad (3.2)$$

Contudo podemos escrever a equação anterior como o produtório,

$$W = \prod \frac{N_i!}{n_i!(N_i - n_i)!} \quad (3.3)$$

Agora precisamos encontrar o máximo de  $W$ , porém vamos trabalhar com  $\ln W$ , pois varia mais lentamente. Aplicando a função logarítmica em ambos os lados da Eq. (3.3), temos que:

$$\ln W = \ln \prod \frac{N_i!}{n_i!(N_i - n_i)!} \quad (3.4)$$

O segundo termo da Eq. (3.4) fica

$$\ln \prod \frac{N_i!}{n_i!(N_i - n_i)!} = \ln \frac{N_1!}{n_1!(N_1 - n_1)!} \frac{N_2!}{n_2!(N_2 - n_2)!} \dots \quad (3.5)$$

De acordo com as propriedades logarítmicas, sabemos que

$$\ln a \cdot b = \ln a + \ln b \quad \text{e,} \quad \ln \frac{a}{b} = \ln a - \ln b \quad (3.6)$$

Logo,

$$\begin{aligned} \ln \frac{N_1!}{n_1!(N_1 - n_1)!} \frac{N_2!}{n_2!(N_2 - n_2)!} \dots &= \ln \frac{N_1!}{n_1!(N_1 - n_1)!} + \ln \frac{N_2!}{n_2!(N_2 - n_2)!} \dots = \\ &= \sum \ln \frac{N_i!}{n_i!(N_i - n_i)!} \end{aligned} \quad (3.7)$$

e,

$$\sum \ln \frac{N_i!}{n_i!(N_i - n_i)!} = \sum [\ln N_i! - \ln n_i! - \ln(N_i - n_i)!] \quad (3.8)$$

Portanto, a Eq. (3.4), torna-se:

$$\ln W = \sum [\ln N_i! - \ln n_i! - \ln(N_i - n_i)!] \quad (3.9)$$



Usando a expansão de Stirling,

$$\ln N! = N \ln N - N . \quad (3.10)$$

Então temos,

$$\begin{aligned} & \sum [\ln N_i! - \ln n_i! - \ln(N_i - n_i)!] = \\ = & \sum [N_i \ln N_i - N_i - (n_i \ln n_i - n_i) - ((N_i - n_i) \ln(N_i - n_i) - (N_i - n_i))] = \\ = & \sum [N_i \ln N_i - N_i - n_i \ln n_i + n_i - (N_i - n_i) \ln(N_i - n_i) + (N_i - n_i)] = \\ = & \sum [N_i \ln N_i - n_i \ln n_i - (N_i - n_i) \ln(N_i - n_i)] . \quad (3.11) \end{aligned}$$

Então ficamos com:

$$\ln W = \sum [N_i \ln N_i - n_i \ln n_i - (N_i - n_i) \ln(N_i - n_i)] . \quad (3.12)$$

Usando as equações de vínculo, encontramos que

$$\sum n_i = \text{constante} \quad \Rightarrow \quad \sum dn_i = 0 \quad (3.13)$$

e

$$\sum n_i E_i = \text{constante} \quad \Rightarrow \quad \sum E_i dn_i = 0 . \quad (3.14)$$

O desenvolvimento posterior será feito usando multiplicadores de Lagrange, onde vamos definir  $a$  e  $\beta$ .

$$df = a dg_1 + \beta dg_2 \quad (3.15)$$

sendo

$$f = \ln W , \quad dg_1 = \sum dn_i \quad \text{e} \quad dg_2 = \sum E_i dn_i . \quad (3.16)$$

Logo, diferenciando com relação a  $n_i$ , obtemos

$$\begin{aligned} d \sum [N_i \ln N_i - n_i \ln n_i - (N_i - n_i) \ln(N_i - n_i)] - a \sum dn_i - \beta \sum E_i dn_i &= 0 , \\ \sum [-\ln n_i - 1 + \ln(N_i - n_i) + 1 - a - \beta E_i] dn_i &= 0 . \quad (3.17) \end{aligned}$$

Portanto,

$$-\ln n_i - 1 + \ln(N_i - n_i) + 1 - a - \beta E_i = 0 ,$$

$$\ln \frac{N_i - n_i}{n_i} = \alpha + \beta E_i . \quad (3.18)$$

Aplicando a função exponencial em ambos os lados, temos

$$\frac{N_i - n_i}{n_i} = \exp(\alpha + \beta E_i) \Rightarrow \frac{N_i}{n_i} - 1 = \exp(\alpha + \beta E_i) ,$$

$$\frac{N_i}{n_i} = \exp(\alpha + \beta E_i) + 1 \Rightarrow n_i = \frac{N_i}{\exp(\alpha + \beta E_i) + 1} , \quad (3.19)$$

Sendo que  $\alpha$  é proporcional ao negativo da energia de Fermi<sup>2</sup> ( $E_F$ ) e inversamente proporcional a  $k_B T$ , e  $\beta$  é inversamente proporcional a  $k_B T$ .

$$\alpha = -\frac{E_F}{k_B T} \quad \text{e} \quad \beta = \frac{1}{k_B T} , \quad (3.20)$$

logo,

$$n_i = \frac{N_i}{\exp[(E_i - E_F)/kT] + 1} . \quad (3.21)$$

Fazendo  $f = \frac{n_i}{N_i}$ , a Eq. (3.21) torna-se:

$$f = \frac{1}{\exp[(E_i - E_F)/kT] + 1} . \quad (3.22)$$

Eliminando o índice  $i$ ,

$$f = \frac{1}{\exp[(E - E_F)/kT] + 1} . \quad (3.23)$$

Obtemos assim a função de distribuição de Fermi-Dirac.

Na Figura 3.2, podemos ver o gráfico de  $f$  em função da energia, considerando várias temperaturas. Podemos perceber que quando  $T = 0$ , todos os estados de energia menores que a energia de Fermi estão ocupados ( $f = 1$ ), e todos os estados com energia maiores que a energia de Fermi estão desocupados ( $f = 0$ ).

Considerando o caso em que a temperatura é nula,  $T = 0$ , obtemos:

- Para  $E < E_F$ , o termo exponencial da função de distribuição de Fermi-Dirac, que nos fornece a probabilidade de ocupação é  $e^{-\infty} \Rightarrow 0$  e, portanto  $f = 1$ , o que está de acordo com a Figura 3.2.

—<sup>2</sup>Energia de Fermi é a energia do nível ocupado mais energético em um sistema quântico à temperatura de zero absoluto.

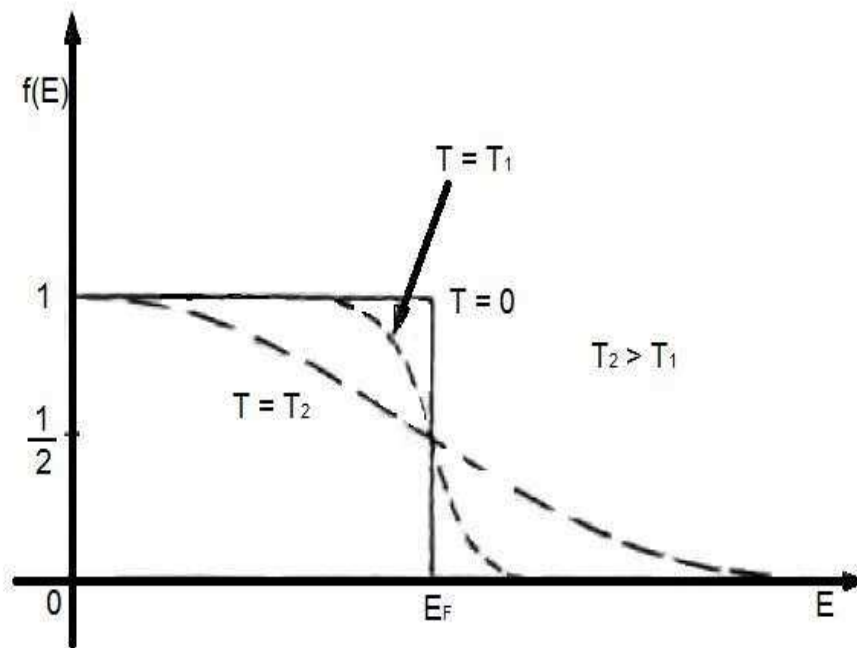


Figura 3.2: Distribuição de Fermi-Dirac [11].

- Para  $E > E_F$ , o termo exponencial da Eq. (3.23) é  $e^\infty \Rightarrow \infty$  e, portanto  $f \Rightarrow 0$ , o que também corresponde com a Figura 3.2.

Em qualquer temperatura,  $f = \frac{1}{2}$  para  $E = E_F$ , ou seja, a probabilidade de ocupação no nível  $E_F$  é igual a  $\frac{1}{2}$ .

No estado fundamental (zero absoluto),  $E_F = \mu$ , sendo  $\mu$  o potencial químico<sup>3</sup>. No gás ideal de elétrons em equilíbrio térmico, a probabilidade de um orbital com energia  $E$  seja ocupado é dado pela função de distribuição de Fermi-Dirac.

Nos semicondutores intrínsecos do tipo n, o nível de Fermi e a distribuição de Fermi-Dirac estão mais próximos da faixa de condução. Já no caso dos semicondutores tipo p, o nível de Fermi e a distribuição de Fermi-Dirac se deslocam para baixo próximo a banda de valência, conforme ilustrado na Figura 3.3.

## 3.2 Estruturas de Bandas de Energia

As propriedades que diferenciam metais, semicondutores e isolantes surgem como consequência das estruturas de bandas de energia de cada material. Respeitando o prin-

<sup>3</sup>Potencial químico de um elemento é a energia livre parcial molar de Gibbs deste elemento dentro de uma solução.

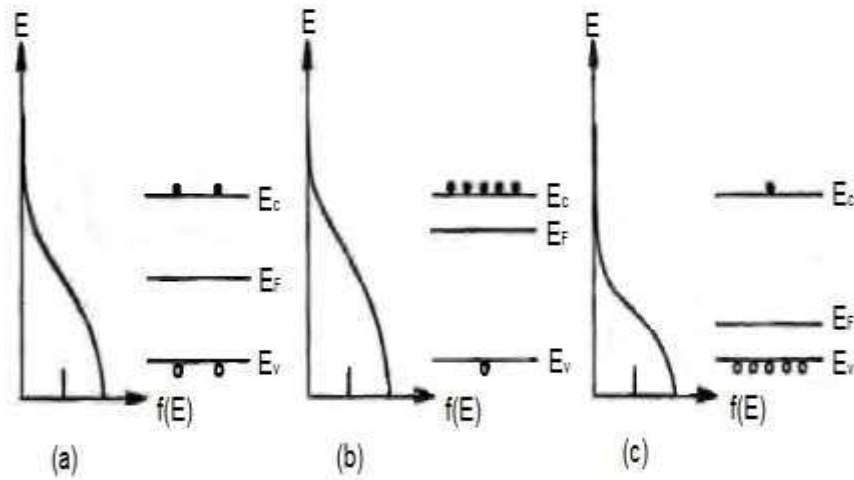


Figura 3.3: Distribuição de Fermi-Dirac: semiconductor intrínseco (a), tipo n (b) e tipo p (c) [11].

cípio de exclusão de Pauli, as interações elétron-rede e os níveis de energias eletrônicas preenchidos resulta nas bandas de energia.

Considerando o caso de um cristal unidimensional que tenha um potencial periódico e que cada átomo forneça um íon com energia potencial, temos que

$$V = \frac{-e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \quad , \quad (3.24)$$

a energia potencial do cristal é formada pela sobreposição de cada átomo.

Conforme mostra a Figura 3.4, o potencial no cristal é maior nas paredes do que em seu interior. Com um grande número de elétrons livres na banda de condução, os metais têm uma alta condutividade. Considerando que os elétrons estão confinados em um poço de potencial, sendo este potencial infinito em  $x = 0$  e  $x = L$ . Este potencial chamado de poço quadrado infinito é dado por:

$$V(x) = \begin{cases} \infty & \text{se } x \leq 0, x \geq L \\ 0 & \text{se } 0 < x < L \end{cases} \quad (3.25)$$

Podemos encontrar a energia dos elétrons resolvendo a equação de Schrödinger em uma dimensão

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} + V(x) \right] \psi(x) = \epsilon \psi(x) \quad , \quad (3.26)$$

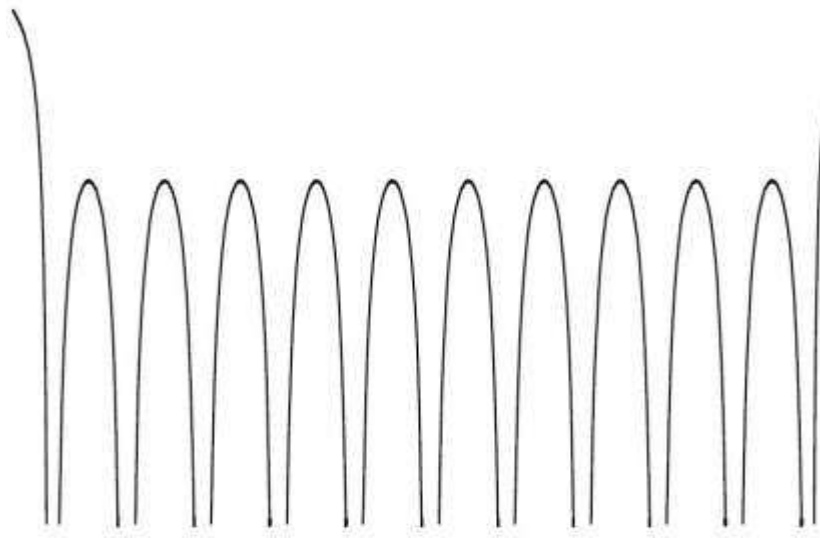


Figura 3.4: Potencial periódico no cristal em uma dimensão [12].

onde podemos obter as relações:

$$\psi(x) = A \sin(k_n x) = A \sin\left(\frac{\pi}{L} n x\right), \quad (3.27)$$

$$\varepsilon = \frac{\hbar^2}{2m} k_n^2 = \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\pi n}{L}\right)^2, \quad (3.28)$$

$$k_n = \frac{\pi}{L} n \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.29)$$

sendo  $\psi(x)$  a função de onda do elétron,  $\varepsilon$  a energia e  $k_n$  é o vetor de onda.

Com a utilização de condições de contorno periódicas e o teorema de Bloch as estruturas de bandas de energias podem ser melhor compreendidas.

### 3.2.1 Teorema de Bloch

A equação de Schrödinger independente do tempo pode ser expressa como

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}) \right] \psi = \varepsilon \psi, \quad (3.30)$$

onde  $V(\mathbf{r})$  é o potencial com a periodicidade da rede cristalina. Para um potencial periódico o teorema de Bloch afirma que a solução da equação de Schrödinger tem a seguinte forma espacial:

$$\psi_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) = \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) u_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}), \quad (3.31)$$

sendo  $u_k(\mathbf{r})$  a função periódica do cristal, isto é, para qualquer vetor  $\mathbf{R}$  da rede cristalina podemos escrever:

$$u_k(\mathbf{r} + \mathbf{R}) = u_k(\mathbf{r}) . \quad (3.32)$$

Qualquer que for o vetor da rede cristalina  $\mathbf{R}$ , a equação de Schrödinger para potenciais cristalinos tem a seguinte solução

$$\psi_k(\mathbf{r} + \mathbf{R}) = \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{R}) \psi_k(\mathbf{r}) . \quad (3.33)$$

### 3.3 Propriedades Ópticas

Algumas das propriedades ópticas dos materiais semicondutores são a cor, o brilho, a absorção, a reflexão e o índice de difração. Em um sólido podemos observar, com a aplicação de campos eletromagnéticos macroscópicos de potência elevada, fenômenos como absorção e reflexão.

Como sabemos são as equações de Maxwell que descrevem a teoria clássica de ondas eletromagnéticas, as quais são

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} , \quad (3.34)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} , \quad (3.35)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho , \quad (3.36)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 , \quad (3.37)$$

sendo,  $\mathbf{E}$  o campo elétrico,  $\mathbf{D}$  o deslocamento elétrico,  $\mathbf{B}$  a indução magnética,  $\mathbf{H}$  o campo magnético,  $\mathbf{J}$  a densidade de corrente e  $\rho$  a densidade de carga.

Cada material possui uma constante dielétrica  $k$ . Consideremos então um material que esta constante dielétrica seja complexa;

$$k = k_1 + ik_2 . \quad (3.38)$$

Então o deslocamento elétrico  $\mathbf{D}$  é:

$$\mathbf{D} = k_s \epsilon_0 \mathbf{E} \quad (3.39)$$

Na Eq. (3.3) aplicando o rotacional, temos:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t}(\nabla \times \mathbf{B}) = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t}(\nabla \times \mathbf{H}). \quad (3.40)$$

Substituindo a Eq. (3.34) em (3.39), então:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t}(\sigma \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}). \quad (3.41)$$

Assumindo que  $\sigma = 0$  e substituindo o deslocamento elétrico na Eq. (3.40), logo

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2}(k s_0 \mathbf{E}) = -\mu_0 k s_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}. \quad (3.42)$$

Devemos perceber que

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E}. \quad (3.43)$$

Porém, se  $\rho = 0$ , obtemos que

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0. \quad (3.44)$$

Portanto,

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 s_0 k \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}. \quad (3.45)$$

Tomando o campo eletromagnético como sendo uma onda plana podemos escrever como

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)]. \quad (3.46)$$

Usando o resultado encontrado na Eq. (3.44), temos

$$\nabla^2 \mathbf{E}_0 \exp[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)] = \mu_0 s_0 k \frac{\nabla^2}{\partial t^2} \exp[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)],$$

$$(\mathbf{E}_0 i \mathbf{k})^2 \exp[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)] = \mu_0 s_0 k (\mathbf{E}_0 i \omega)^2 \mathbf{E}_0 \exp[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)].$$

Obtemos

$$k^2 = \mu_0 s_0 k \omega^2$$

$$\left(\frac{\omega}{k}\right)^2 = \frac{1}{k \mu_0 s_0} \Rightarrow \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{1}{k \mu_0 s_0}}$$

$$\frac{\omega}{\bar{k}} = \frac{c}{\sqrt{\bar{k}}} . \quad (3.47)$$

Sendo  $c$  o valor da velocidade da luz no vácuo, o termo  $\sqrt{\bar{k}}$  é chamado de índice de refração e definido como

$$n = \sqrt{\bar{k}} . \quad (3.48)$$

Logo,

$$k = \frac{\omega}{c} n . \quad (3.49)$$

Introduzimos o índice de refração complexo como sendo

$$N = n + i\beta . \quad (3.50)$$

Neste caso, o vetor de onda  $k$  torna-se:

$$k = n \frac{\omega}{c} + i\beta \frac{\omega}{c} . \quad (3.51)$$

Com isto, vamos substituir o valor do vetor de onda complexo na Eq. (3.45), sendo  $r > 0$ ,

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \mathbf{E}_0 \exp \left[ i \left( n \frac{\omega}{c} + i\beta \frac{\omega}{c} \right) \mathbf{r} - \omega t \right] = \mathbf{E}_0 \exp \left[ i n \frac{\omega}{c} \mathbf{r} + i\beta \frac{\omega}{c} \mathbf{r} - \omega t \right] , \\ &= \mathbf{E}_0 \exp \left[ i n \frac{\omega}{c} \mathbf{r} - i\omega t - \beta \frac{\omega}{c} \mathbf{r} \right] = \mathbf{E}_0 \exp \left[ i\omega \left( \frac{n\mathbf{r}}{c} - t \right) \right] \exp \left[ -\frac{\beta\omega\mathbf{r}}{c} \right] , \end{aligned}$$

que pode ser escrito como

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp \left[ i\omega \left( \frac{n\mathbf{r}}{c} - t \right) \right] \exp \left[ -\frac{a\mathbf{r}}{2} \right] , \quad (3.52)$$

onde  $a = 2\frac{\beta\omega}{c}$  é o coeficiente de absorção. Ao passar por um determinado meio a luz diminui sua energia, este fenômeno é conhecido como absorção. Em um material semiconductor a absorção óptica pode ser alterada com a aplicação de um campo elétrico externo.



# Capítulo 4

## Células Solares

### 4.1 Desenvolvimento das Células Solares

Em 1839, Edmond Becquerel verificou pela primeira vez uma diferença de potencial produzido por placas metálicas de prata num eletrólito quando exposto ao Sol. Este fato observacional é conhecido como efeito fotovoltaico (PV). Apesar de já se ter conhecimento da existência do efeito fotovoltaico ou fotoelétrico [ver anexo A], o primeiro dispositivo sólido que quando exposto ao Sol produz uma corrente elétrica foi desenvolvido em 1877, por W.G. Adams e R.E. Day utilizando Selênio (Se). Este tipo de célula solar produzido com Selênio tinha uma baixa eficiência de conversão, bem inferior a 1%.

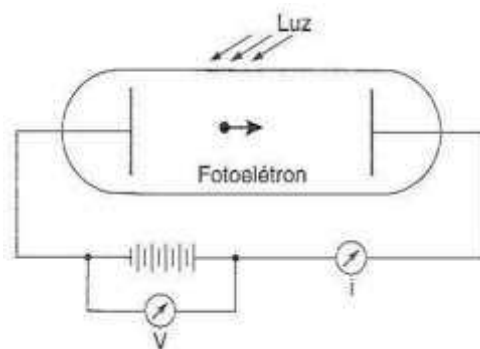


Figura 4.1: Efeito fotoelétrico [9].

Mesmo com a fabricação de dispositivos baseados no efeito fotoelétrico, este efeito só foi explicado em 1905 por Albert Einstein, quando propôs que a luz seria constituída por pacotes de energia (ou *quanta* de energia). Estes pacotes de energia introduzidos por Einstein, foi denominado de fótons em 1926 por G.N. Lewis. Como estar esquematizado

na Figura 4.1, o efeito fotoelétrico ou fotovoltaico ocorre devido a aplicação de radiação eletromagnética na superfície de um metal retirando elétrons.

Somente em 1954, que o engenheiro Daryl Chapin e seus colaboradores que trabalhavam no Bell Laboratory, nos Estados Unidos da América, publicaram um artigo sobre células solares em Silício, com eficiência de 4,5%, muito superior as células produzidas com Selênio, sendo registrada uma patente.

Células solares de Silício, formando um pequeno painel com cerca de  $100\text{ cm}^2$ , gerando uma potência de cerca de  $0,1\text{ W}$ , foi usado no satélite Vanguard I [Figura 4.2], da NASA, lançado em março de 1958.



Figura 4.2: Satélite Vanguard I [25].

## 4.2 Estrutura das Células Solares

Alguns tipos de materiais quando expostos ao Sol podem transmitir, refletir ou absorver a radiação solar. Com as devidas propriedades, materiais distintos podem ser usados para aplicações em tecnologias específicas. Porém, em nosso caso, apenas nos interessa materiais que quando expostos ao Sol consiga absorver radiação solar e com isso produzir corrente elétrica. Este tipo de efeito pode ser encontrado em materiais semicondutores. Os painéis solares são considerados ecologicamente corretos por converter a energia solar em energia elétrica sem emitir dióxido de carbono ( $CO_2$ ) em seu funcionamento. Na Figura 4.3, temos a estrutura esquemática de uma célula solar. Quando alguns semicondutores são atingidos por uma radiação solar, os fótons transmitem energia para os elétrons de valência o que possibilita que estes elétrons rompam as ligações covalentes

que os matêm unidos aos átomos, e alcancem a banda de condução.

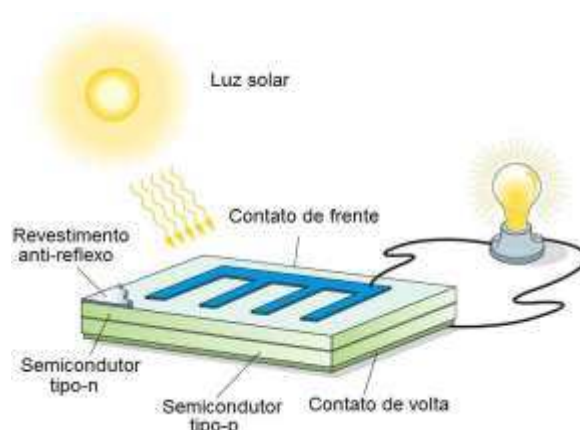


Figura 4.3: Dispositivo PV, converte a luz solar em energia elétrica de corrente DC [22].

O semicondutor mais usado em painéis solares para conversão de energia solar em energia elétrica é o Silício que tem quatro elétrons na camada de valência. Uma célula solar é constituída basicamente por duas camadas de Silício em que uma das camadas do Silício pode ser dopada com Fósforo que possui cinco elétrons na camada de valência, formando uma região do tipo-n e a outra camada dopada com Boro que tem três elétrons de valência, formando uma região tipo-p. O funcionamento das células PV é semelhante a uma bateria que contém duas regiões carregadas – e +. As células PV ao serem expostas ao Sol, os fótons atingem a camada do Silício, liberando elétrons de seus átomos, fazendo com que as duas camadas de Silício fiquem carregadas. A camada que foi enriquecida com Fósforo fica negativamente carregada, e a camada que foi enriquecida com boro fica positivamente carregada. Deste modo cria-se um campo elétrico na junção das camadas, minimizando as perdas ocasionadas pela recombinação das cargas. As principais perdas em células solares de Silício cristalino estão relacionadas a reflexão, recombinação e energia do fóton.

As células solares fabricadas com Silício podem ser constituídas de cristais monocristalino, policristalino ou amorfo.

#### 4.2.1 Cristais Monocristalinos (m-Si)

Este tipo de célula solar com cristais monocristalinos é o mais eficiente, e consequentemente, o mais caro. O processo para a construção deste tipo de célula é complexo e

de alto custo, necessitando de uma elevada quantidade de energia na sua fabricação, pois exige a utilização de materiais em estado muito puro e cristais com estruturas perfeitas. Na Figura 4.4, temos alguns módulos de células solares de m-Si.

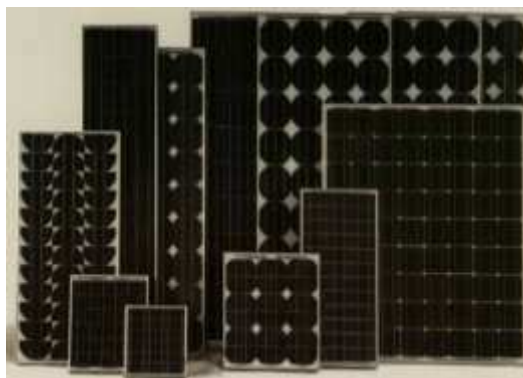


Figura 4.4: Módulos solares de silício monocristalino [3].

#### 4.2.2 Cristais Policristalinos (p-Si)

Células solares de cristais policristalinos possuem uma menor eficiência quando comparado com células solares de cristais monocristalinos. Este tipo de célula é mais barato por exigir um processo de construção menos rigoroso e conseqüentemente uma menor eficiência devido as imperfeições do cristal. Um exemplo dessa utilização é em residências, conforme mostrado na Figura 4.5.



Figura 4.5: Módulos solares de silício policristalino [3].

#### 4.2.3 Cristais Amorfos (a-Si)

Estas células solares de cristais amorfo, como as da Figura 4.6, são as que apresentam o menor custo, porém, em contra-partida, são as que possuem o menor rendimento.

Cristais amorfos apresentam uma grande desordem na estrutura cristalina.



Figura 4.6: Módulos solares de silício amorfo [3].

### 4.3 Materiais utilizados na fabricação das células solares

Além das células solares fabricadas com cristais monocristalinos, policristalinos e cristais amorfos, existem também células solares de filmes finos. Uma das vantagens das células de filmes finos é que este tipo de dispositivo não perde rendimento como acontece com as células de silício em dias nublados. Na Figura 4.7 temos um quadro com as tecnologias fotovoltaicas usadas na conversão de luz solar em energia elétrica.

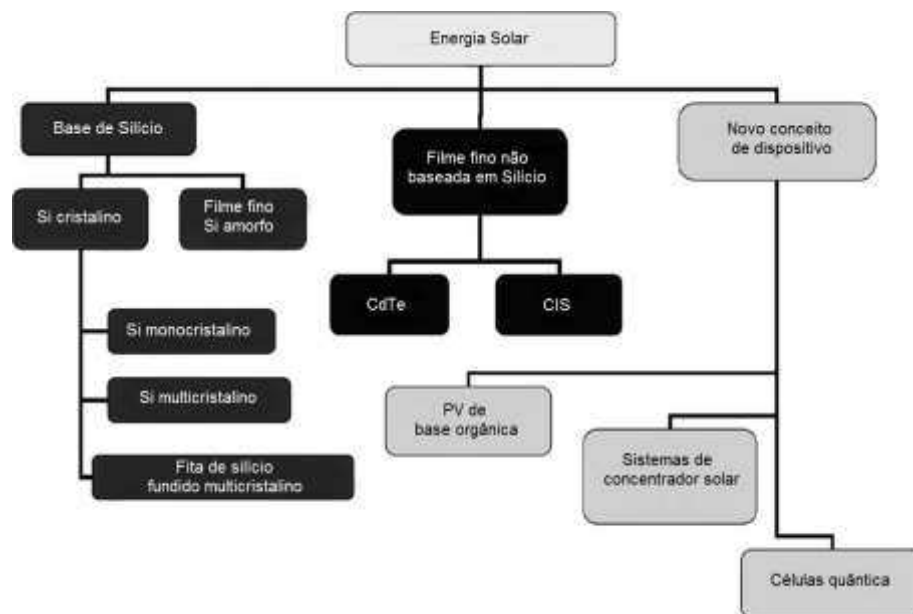


Figura 4.7: Tipos de tecnologias fotovoltaicas [23].

### 4.3.1 Células de filmes finos

Um dos materiais que podem ser usados para fabricação de células solares é o Telurieto de Cádmio (CdTe). Este tipo de célula é normalmente fabricado com uma junção n-i-p (material tipo n - material intrínseco de CdTe - material do tipo p). Em 1960, células PV de CdTe foram fabricadas; porém, devido à baixa capacidade de absorção da luz, seu uso foi interrompido. Células solares de alta absorção podem ser fabricadas com compostos semicondutores do grupo III-V, tais como, Arsenieto de Gálio (GaAs), Fosfato de Índio (InP), Diselenieto de Cobre e Índio (CIS) e Diselenieto de Cobre, Índio e Gálio (CIGS) [Figura 4.8].

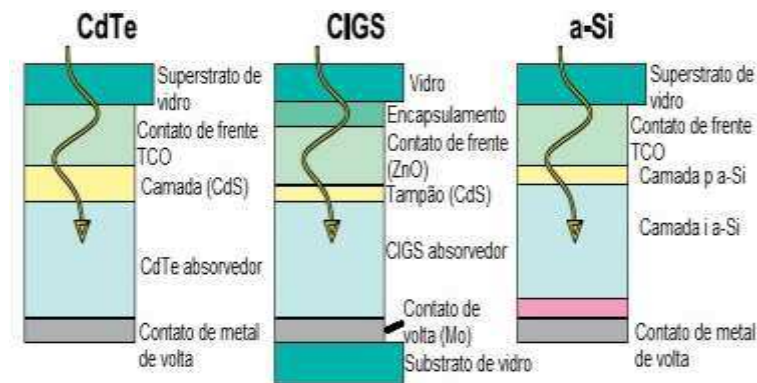


Figura 4.8: Esquema de filmes finos de CdTe, CIGS e a-Si [23].

Células solares de filmes finos podem ser fabricadas usando o Silício amorfo (a-Si), e possuem um grande potencial entre as células de filmes finos de Silício (TFSi). Um sistema promissor usado para fabricação das TFSi é o uso de Silício amorfo e Silício na forma microcristalina formando assim células híbridas com eficiência de 12% em laboratório.

Ao usar a tecnologia de filmes finos para produzir células solares de CIGS, obtêm-se resultados superiores que células de CdTe ou de TFSi, para conversão de luz em energia elétrica com uma eficiência de até 19%.

### 4.3.2 Células orgânicas

A utilização de células solares inorgânicas como Silício tem uma eficiência alta, mas por outro lado, os materiais usados em sua fabricação são caros além do alto consumo de energia para que este tipo de célula possa ser produzida. As células solares orgânicas

(OPV) [Figura 4.9] são fabricadas usando comumente o plástico e possuem um tempo de duração curto, se comparado com células inorgânicas, e uma baixa eficiência, porém baixo custo, pelo fato da matéria prima e tecnologia de produção serem baratas.

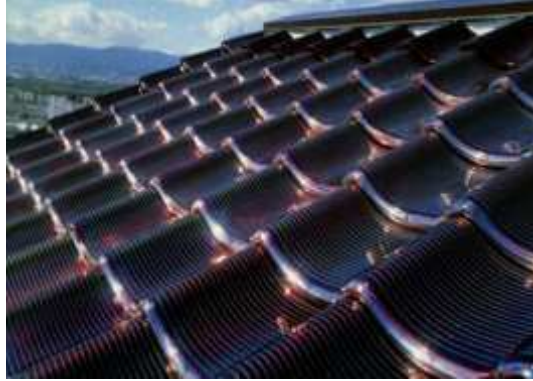


Figura 4.9: Módulos solares de células orgânicas [3].

Dentre algumas vantagens deste tipo de células estão: flexibilidade, transparência, fácil manuseio e adaptação ao espectro solar.

## Capítulo 5

# Utilização dos painéis solares

O elemento básico dos sistemas fotovoltaicos são as células; e estas por sua vez são usadas para montar painéis solares fotovoltaicos. A energia irradiada pelo Sol é convertida em energia elétrica na célula através do efeito fotovoltaico. Os painéis fotovoltaicos instalados para obtenção de energia elétrica geram apenas corrente contínua (DC). Cada célula gera uma tensão em torno de 0,5 V de potência, e se associadas em série, podem alcançar a tensão desejada.

Várias células quando associadas em série e em paralelo formam um painel solar. Um dos fatores importantes para utilização deste tipo de dispositivo é a confiabilidade. A redução na emissão de  $CO_2$  e a redução do consumo de energia da distribuidora é o fator mais importante para o uso do sistema PV.

O sistema fotovoltaico pode ser usado diretamente para recarregar baterias, que podem ser usadas em períodos nublados ou à noite. Caso queira usar o sistema fotovoltaico em aparelhos de TV, geladeira, entre outros que funcionem em corrente alternada, tem que ser usado um inversor.

A corrente DC gerada pelos painéis solares são conectados a um controlador de carga que por sua vez é conectado a uma bateria (ou várias baterias), e posteriormente conectado a um inversor que converte corrente contínua DC em corrente alternada AC e uma tensão de 220 V. Este sistema descrito é um sistema isolado, pois só gasta o que gera. Podemos usar o sistema conectado à rede elétrica sem a necessidade de usar baterias. Em um sistema fotovoltaico conectado à rede, se o proprietário consome mais do que gera, a potência adicional necessária é fornecida pela rede de transmissão, caso o sistema fotovoltaico gere mais energia do que é consumido, o adicional a mais é fornecida



a rede de distribuição, fazendo com que o relógio que mede o consumo de energia funcione ao contrário. A potência que o proprietário com seu sistema de geração de energia, fornece a rede é convertida em créditos que devem ser usados em até 36 meses [5].

Os sistemas PV são uma fonte de energia de forma limpa e com pouca manutenção, sendo necessárias pequenas áreas para instalação, e são uma fonte de energia inesgotável, renovável, silenciosa e sem poluir o meio ambiente, garantindo a sustentabilidade do planeta.

## 5.1 Perspectivas

No Brasil existem 281 empreendimentos de geração de energia renovável que devem ser construídas, sendo 2 centrais geradoras solar fotovoltaica e 279 centrais geradoras eólicas. O Nordeste Brasileiro contará com 2 centrais fotoelétricas instaladas no estado do Pernambuco, responsável pela geração de 0,41% do potencial que será instalado no Brasil. Das 279 centrais geradoras eólicas que devem ser instaladas no Brasil, 248 serão no Nordeste, gerando 46,75% da potência total que deverá ser instalada [2].

Até o ano de 2050, as energias renováveis serão capazes de suprir metade da demanda energética mundial. Em 2050, as fontes renováveis, no Brasil, serão capazes de fornecer 88% da eletricidade produzida. A geração de energia a partir de painéis fotovoltaicos produzirá 4% da matriz energética brasileira e a energia eólica 20% [26].

# Apêndice A

## Efeito fotoelétrico

O efeito fotoelétrico, como ilustrado na Figura A.1, consiste na emissão de elétrons de um metal quando sua superfície é iluminada por um raio luminoso.

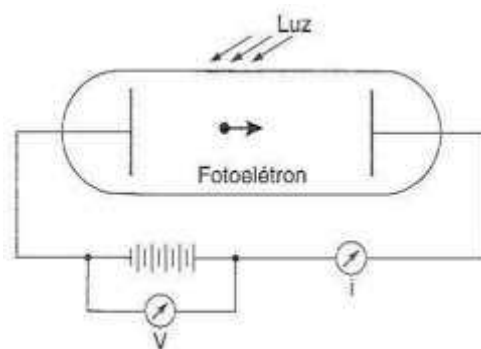


Figura A.1: Efeito fotoelétrico [9].

Para este fenômeno acontecer [Figura A.1] é preciso que a diferença de potencial  $V$  aplicada seja maior ou igual ao potencial de corte  $V_0$ . A energia cinética máxima  $K_m$  adquirida pelos elétrons, é dada por:

$$K_m = eV_0, \quad (\text{A.1})$$

sendo  $e$  a carga elementar.

Ao iluminarmos uma superfície com uma luz, a superfície está sendo atingida por fótons, cuja a energia é dada por:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad (\text{A.2})$$

onde  $h$  é a constante de Planck e  $\nu$  é a frequência do feixe luminoso.

No efeito fotoelétrico, a frequência da luz não pode ser menor que a frequência de corte  $\nu_0$ . Então o comprimento de onda de corte é:

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0} . \quad (\text{A.3})$$

O elétron só poderá escapar do alvo se tiver uma certa energia mínima  $\Phi$ , que depende do material de que é feito, sendo chamado de função de trabalho. Se,  $h\nu > \Phi$ , então o elétron pode escapar do alvo, mas, se  $h\nu < \Phi$  o elétron não pode escapar.

Einstein mostrou que a energia cinética máxima de um elétron é dada pela diferença entre a função trabalho e a energia que o elétron ganhou,

$$K_m = h\nu - \Phi , \quad (\text{A.4})$$

ou

$$h\nu = K_m + \Phi , \quad (\text{A.5})$$

esta é a equação do efeito fotoelétrico.

## Referências Bibliográficas

- [1] IEA, *Technology Roadmap Solar Photovoltaic Energy*. Edição 2014. Disponível em: <[http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy\\_2014edition.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy_2014edition.pdf)>. Acesso em: 16 de fevereiro de 2015.
- [2] ANEEL, *Capacidade de Geração do Brasil*. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 16 de fevereiro de 2015.
- [3] RÜTHER, R., *Edifícios Solares Fotovoltaicos: O potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil*. 1ª ed. Florianópolis: LABSOLAR, 2004.
- [4] IBACH, H.; LÜTH, H. *Solid-State Physics: An Introduction to Principles of Materials Science*. 4ª ed. New York. Springer. 2009.
- [5] ANEEL, *Informações Técnicas*. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=757>>. Acesso em: 18 de fevereiro de 2015.
- [6] IEA, *World Energy Outlook 2014*. Disponível em: <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WorldEnergyOutlook2014ExecutiveSummaryPortugueseversion.pdf>>. Acesso em: 22 de fevereiro de 2015.
- [7] BP, *BP Statistical Review of World Energy June 2014*. Disponível em: <<http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/Energy-economics/statistical-review-2014/BP-statistical-review-of-world-energy-2014-full-report.pdf>>. Acesso em: 24 de fevereiro de 2015.

- [8] GOVERNO, B. E. *Por que hidrelétricas (com reservatório) são a melhor opção para o Brasil?*. Disponível em: <<http://www.brasil-economia-governo.org.br/2012/07/10/por-que-hidreletricas-com-reservatorio-sao-a-melhor-opcao-para-o-brasil/>>. Acesso em: 26 de fevereiro de 2015.
- [9] NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de Física Básica: Ótica, Relatividade e Física quântica*. 1ª ed. Vol. 4. São Paulo: EDGARD BLÜCHER, 2010.
- [10] HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentos de Física: Óptica e Física moderna*. 8ª ed. vol. 4. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- [11] MELLO, H. A. de; BIASI, R. S. de. *Introdução à Física dos Semicondutores*. São Paulo: EDGARD BLÜCHER, 1975.
- [12] HAMAGUCHI, C. *Basic Semiconductor Physics*. 2ª ed. New York: SPRINGER, 2010.
- [13] IHN, T. *Semiconductor Nanostructures: Quantum States and Electronic Transport*. New York: OXFORD, 2010.
- [14] MARQUES, A. E. B.; JÚNIOR, S. C.; CRUZ, E. C. A. *Dispositivos Semicondutores: Diodos e Transistores*. 4ª ed. São Paulo: ÉRICA, 1998.
- [15] ADACHI, S. *Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors*. Gunma: WILEY, 2009.
- [16] TAYLOR, P.; HEINONEN, O. *A Quantum Approach to Condensed Matter Physics*. New York: CAMBRIDGE, 2003.
- [17] ASHCROFT, N. W.; MERMIN, N. D. *Solid State Physics*. Orlando: HARCOURT, 1976.
- [18] SALINAS, S. R. A. *Introdução à Física Estatística*. 2ª ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005.
- [19] YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. *Física IV: Ótica e Física Moderna*. 12ª ed. São Paulo: PEARSON, 2009.
- [20] IEA, *Electricity generation by fuel*. Disponível em: <<http://www.iea.org/stats/WebGraphs/WORLD2.pdf>>. Acesso em: 23 de Fevereiro de 2015.

- [21] KITTEL, C. *Introdução à Física do Estado Sólido*. 5ª ed. Rio de Janeiro: GUANABARA DOIS, 1978.
- [22] TABAK, J. *Solar and Geothermal Energy*. New York: 2009.
- [23] ŞAHİN, A. Ş. *Modeling and Optimization of Renewable Energy Systems*. Rijeka: 2012.
- [24] OLIVEIRA, I. S.; JESUS, V. L. B. de. *Introdução à Física do Estado Sólido*. 2ª ed. São Paulo: EDITORA LIVRARIA DA FÍSICA, 2011.
- [25] NASA. *Vanguard I*. Disponível em: <<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/image/spacecraft/vanguard1.jpg>>. Acesso em: 12 de Fevereiro de 2015.
- [26] GREENPEACE. *Revolução Energética - Perspectivas para uma energia global sustentável*. Disponível em: <[http://www.greenpeace.org/brasil/pt/Documentos/greenpeacebr\\_070202\\_energia\\_revolucao\\_energetica\\_brasil\\_port\\_v1/](http://www.greenpeace.org/brasil/pt/Documentos/greenpeacebr_070202_energia_revolucao_energetica_brasil_port_v1/)>. Acesso em: 01 de Março de 2015.