

## Princípios físicos de operação de células solares

### Physical principles of solar cell operation

#### RESUMO

Rafael Vargas Alves Ferreira  
[rafa\\_rafa2000@hotmail.com](mailto:rafa_rafa2000@hotmail.com)  
Universidade Tecnológica Federal  
do Paraná, Apucarana, Paraná,  
Brasil

Leonardo Dias de Souza  
[leonardod@utfpr.edu.br](mailto:leonardod@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal  
do Paraná, Apucarana, Paraná,  
Brasil

Com o aumento atual na demanda por energia elétrica há uma necessidade crescente do aumento da capacidade produtiva de energia. Paralelamente ao uso das formas já tradicionais de geração, as fontes de energia renovável estão cada vez mais ganhando mercado. Uma das formas renováveis de geração de energia é a energia solar fotovoltaica, que consiste basicamente em transformar a energia associada à radiação solar em energia elétrica. Neste trabalho desenvolvemos um estudo sobre os processos físicos envolvidos no funcionamento de uma célula solar. Sabendo que os semicondutores são materiais chave na fabricação destes dispositivos, estudamos o processo de dopagem e o funcionamento da junção semicondutora PN. Com o entendimento destes processos é possível entender como variar controladamente a condutividade de um semicondutor bem como realizar alterações no perfil de bandas do material, tornando-o viável para utilização em diversos dispositivos, como em células solares.

**PALAVRAS-CHAVE:** Célula Solar. Semicondutor. Energia Solar.

**Recebido:** 19 ago. 2020.

**Aprovado:** 01 out. 2020.

**Direito autoral:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



#### ABSTRACT

With the current increase in demand for electricity, there is an increasing need to expand the productive capacity of energy. In parallel with the use of already traditional forms of generation, renewable energy sources are increasingly gaining market share. One of the renewable forms of energy generation is solar photovoltaic energy, which basically consists of transforming the energy associated with solar radiation into electrical energy. In this work we study the physical processes involved in the functioning of a solar cell. Knowing that semiconductors are key materials in the manufacture of these devices, we studied the doping process and the operation of the PN semiconductor junction. With the understanding of these processes it is possible to understand how to control the conductivity of a semiconductor as well as to make changes in the material's band profile, making it viable for use in various devices, such as solar cells.

**KEYWORDS:** Solar Cell. Semiconductor. Solar Energy.



## INTRODUÇÃO

Com o constante avanço científico a indústria evoluiu rapidamente nos últimos anos. Para onde olharmos podemos ver uma variedade de dispositivos que foram projetados utilizando conhecimentos produzidos recentemente pela comunidade científica e que podem proporcionar para a comunidade em geral qualidade de vida, segurança, economia, etc. Com o aumento da demanda por energia elétrica há também uma necessidade crescente do aumento da capacidade produtiva de energia elétrica.

Paralelamente ao uso das formas já tradicionais de geração de energia, como a hidroelétrica e a termoelétrica, por exemplo, as fontes de energia renovável estão ganhando mercado e se tornando cada vez mais acessíveis aos consumidores (FADIGAS, 2004). A geração de energia através de fontes renováveis causa em grande parte dos casos pequenos impactos ambientais se comparado com as formas tradicionais de geração de energia. Uma das formas renováveis de geração de energia é a energia solar fotovoltaica, que consiste basicamente em transformar a energia associada à radiação solar em energia elétrica. Neste contexto podemos dizer os materiais chave para a criação de boa parte das células solares fotovoltaicas empregadas atualmente são os materiais semicondutores, que também compõe a base de diversos equipamentos e dispositivos eletrônicos.

Neste trabalho desenvolvemos um estudo dos princípios físicos envolvidos no funcionamento de células solares e analisamos os tipos de células solares mais utilizadas atualmente.

## MATERIAL E MÉTODOS

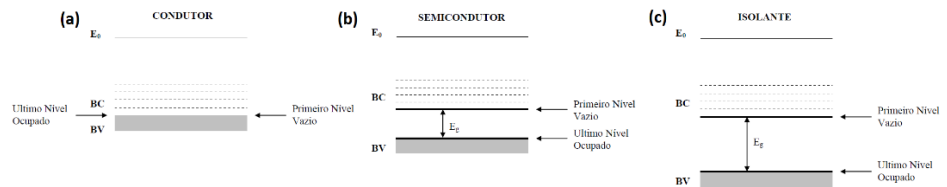
Para a compreensão dos princípios físicos envolvidos no funcionamento de um dispositivo baseado em semicondutores necessitamos discutir brevemente sobre a característica de um material conduzir ou não corrente elétrica. Para tal consideraremos um material sólido.

Os sólidos presentes na natureza podem ser classificados de acordo com sua capacidade de conduzir corrente elétrica. Deste ponto de vista temos 3 tipos de materiais: condutores, semicondutores e isolantes. Diferentemente dos condutores e isolantes, que tem sua capacidade de conduzir corrente bem definida, os semicondutores podem apresentar condutividade elétrica próxima a de um isolante como também próxima a de um condutor. Devido a essa característica estes materiais são importantes para diversas aplicações tecnológicas (SOUZA, 2005).

Um sólido cristalino é formado por um arranjo de átomos que possui uma estrutura cristalina em formato de rede, com átomos bem espaçados entre os nós formados nessa rede. A superposição da eletrosfera de átomos vizinhos cria uma estrutura eletrônica formando bandas de energia que podem ser ocupadas por elétrons e bandas de energia que não são acessíveis a elétrons. A banda permitida de menor energia é chamada de banda de valência (BV), e a banda permitida de maior energia é denominada de banda de condução (BC). O espaço energético onde os elétrons não podem se acomodar é denominado de *gap*. De acordo com a energia de *gap* do material podemos definir se o material é condutor, isolante ou semicondutor. Materiais isolante tem energia de *gap* por volta de 5,0 eV,

enquanto para um semicondutor a energia de *gap* está entre aproximadamente 0 eV e 5,0 eV, dependendo do material utilizado e se o mesmo está dopado. O silício puro a temperatura ambiente, por exemplo, possui energia de *gap* de 1,12 eV (IOFFE, 2020). A seguir apresentamos uma representação esquemática das bandas de energia para um condutor, semicondutor e isolante respectivamente.

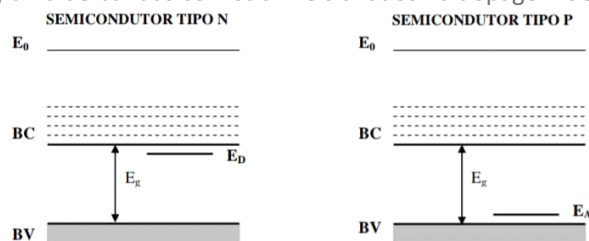
Figura 1 – Representação esquemática do diagrama de bandas de energia de um material (a) condutor, (b) semicondutor e (c) isolante.



Fonte: (SOUZA, 2005).

Para controlar a condutividade elétrica de um semicondutor realiza-se o processo de dopagem, que consiste em substituir um átomo da matriz por outro átomo diferente durante o processo de crescimento do semicondutor. Dependendo dos materiais utilizados na dopagem e de sua configuração eletrônica, essa dopagem pode criar cargas positivas (buracos) ou negativas (SOUZA, 2005). Quando cargas negativas são criadas é dito que o material foi dopado do tipo N, já quando cargas positivas são criadas é dito que o material foi dopado do tipo P. A dopagem tipo P cria um subnível aceitador próximo a banda de valência e a dopagem tipo N cria um subnível doador próximo a banda de condução.

Figura 2 - Diagrama de bandas com subníveis criados na dopagem de tipo N e P.



Fonte: (SOUZA, 2005).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

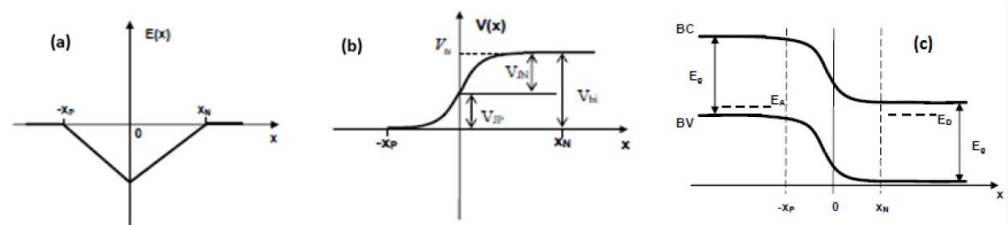
Quando um material semicondutor é exposto a uma radiação eletromagnética de energia igual ao *gap* do material semicondutor, um elétron da BV absorve o fóton de energia e é promovido para a BC do material, deixando um buraco na BV. Há assim o surgimento de um par *elétron-buraco*. O efeito contrário ao surgimento do par *elétron-buraco* é a recombinação dos mesmos, onde o elétron naturalmente decai da BV para a BC e se recombina com um buraco ali encontrado, emitindo neste processo uma radiação equivalente ao *gap* do material semicondutor. O processo de geração de pares *elétron-buraco* contribui para a criação de portadores de cargas livres para se mover no material, ao passo que a recombinação *elétron-buraco* contribui para a diminuição destes portadores livres. Uma vez que a existência de portadores de cargas livres para se movimentarem no material é necessária para haver uma corrente elétrica de saída, nas células solares é necessário diminuir a taxa em que o processo de recombinação ocorre. Para tal

é necessário promover uma separação espacial dos elétrons e dos buracos dentro do semiconductor. Uma forma usual de se obter a separação espacial de cargas é através de uma junção PN.

### JUNÇÃO PN

Quando um material é submetido à dopagem do tipo P e subsequentemente à dopagem do tipo N o resultado é a chamada junção PN. Na junção PN um dos lados do material tem falta de elétrons (lado P) e o outro lado tem excesso de elétrons (lado N). Naturalmente, devido ao gradiente de concentração existente há um processo de difusão de cargas através da junção dos materiais até que se possa atingir o equilíbrio (SOUZA, 2005; PASIN, 2019). Ao atingir o equilíbrio uma zona de carga espacial é criada, chamada de região de depleção, levando ao surgimento de um campo elétrico interno ao material e consequentemente a uma barreira de potencial que promove uma separação espacial dos elétrons e dos buracos dentro do semiconductor.

Figura 3 - (a) Representação do campo elétrico intrínseco, (b) da barreira de potencial e (c) da energia potencial (ou perfil de bandas) em uma junção PN.



Fonte: (SOUZA, 2005).

### EFEITO FOTOVOLTAICO

A energia fotovoltaica é obtida a partir da conversão direta da radiação luminosa em eletricidade, através do efeito fotovoltaico. Os fótons que compõem a radiação luminosa carregam consigo energia, que é correspondente a frequência da onda eletromagnética. A energia de um fóton é dada por

$$E = h\nu \quad (1)$$

sendo  $E$  é a energia do fóton, medido em elétron-volts (eV),  $h$  é a constante de Planck, dada em unidades de eV.s e  $\nu$  é a frequência da radiação eletromagnética, medida em Hz (FADIGA, 2004). Ao expor um material semiconductor como os da junção PN discutida acima a fótons que possuam energia maior que o *gap* do material semiconductor, um elétron da BV deste material semiconductor absorverá essa energia, fazendo com que ele seja promovido a um nível mais energético da BC, deixando na sua posição inicial uma lacuna que será ocupada por outro elétron, que por sua vez absorverá outro fóton de radiação, criando assim um circuito elétrico contínuo. Por consequência, ocorre a transformação da energia eletromagnética em tensão elétrica. Este processo é conhecido como efeito fotovoltaico e é um princípio chave de operação de células solares fotovoltaicas.

### CÉLULAS SOLARES

Atualmente há vários tipos de células solares, com a características diferentes, porém com funções em comum: gerar energia elétrica. O mercado de energia solar fotovoltaica tem ano a ano uma grande taxa de crescimento. No acumulado entre 2010 a 2019 a taxa de crescimento anual de instalações baseadas em energia solar

fotovoltaica foi de 35% (FRAUNHOFER, 2020). As células solares mais utilizadas atualmente são:

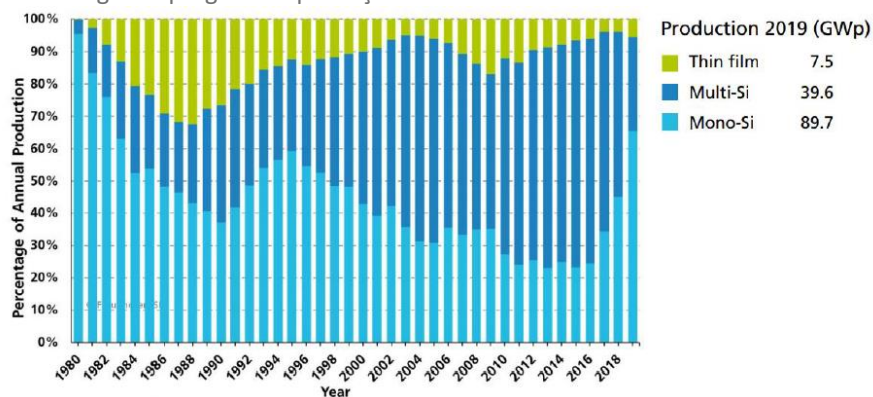
**Silício monocristalino:** Produzida através da extração do dióxido de silício, onde ele é purificado e solidificado. O silício é então fundido e depositado sobre um substrato, junto com os devidos dopantes tipo P e N, formando um único cristal. Faz parte da primeira geração de células solares e tem eficiência que pode chegar a 16% (FADIGA, 2004).

**Silício policristalino:** Produzida de modo similar ao processo da célula monocristalina. Porém ao invés de formar um grande cristal o silício é solidificado em formato de um bloco composto por cristais menores com características próprias, como tamanho, morfologia e concentração de impurezas. Ao longo dos anos essa tecnologia atingiu uma eficiência de aproximadamente 12%, com o custo de produção inferior ao monocristalino, consequentemente tornando mais viável sua comercialização (GREEN, 2016).

**Filmes finos:** Células solares baseadas em filmes finos são formadas depositando uma camada de material, como por exemplo CdTe com espessura da ordem de nanômetros ou micrômetros sobre um substrato (FRAUNHOFER, 2020). Seu baixo custo de produção a torna economicamente atrativa, contudo fatores como sua baixa eficiência se comparada com dispositivos de silício monocristalino e policristalino e processos de degradação geram algumas desvantagens no uso destes dispositivos (FADIGAS, 2004).

Estas três tecnologias são predominantes atualmente no cenário mundial de energia solar fotovoltaica, sendo responsáveis por praticamente 100% da geração de energia solar fotovoltaica. Em 2019, as células solares baseadas em silício foram responsáveis por 95% da produção total de energia solar fotovoltaica (FRAUNHOFER, 2020). Se levarmos em conta apenas células baseadas em silício monocristalino, a quantidade de energia solar fotovoltaica produzida por elas equivale a 66% do total global produzido em 2019. Na figura 4 apresentamos o percentual de produção de energia solar fotovoltaica, ao longo das últimas décadas, de acordo com a tecnologia utilizada na produção das células solares.

Figura 4 – Percentual anual da produção de energia solar fotovoltaica de acordo com a tecnologia empregada na produção das células solares.



Fonte: (FRAUNHOFER, 2020).

Na figura 4 as barras em azul claro representam o percentual anual de produção de energia gerada por dispositivos fotovoltaicos baseados em silício monocristalino (Mono-Si), enquanto as barras em azul escuro e verde representam

os dispositivos baseados em silício policristalino (Multi-Si) e em filmes finos (Thin Film), respectivamente. Analisando o gráfico acima podemos notar que os dispositivos baseados em semicondutores como o silício historicamente têm sido amplamente empregados no contexto da energia fotovoltaica, sendo ainda hoje uma tecnologia atual, tornando seu estudo e o entendimento dos princípios de funcionamento relevantes para o aprimoramento dos dispositivos fotovoltaicos.

### CONCLUSÕES

Quando olhamos a nossa volta podemos notar que as comodidades do dia a dia bem como o funcionamento de indústrias, etc, estão diretamente relacionados ao uso da energia elétrica, gerada em muitos casos a partir de recursos naturais limitados sazonalmente e/ou não renováveis. O uso de fontes de energia renovável como a energia solar fotovoltaica deve ser tratado com um assunto de grande relevância, visando o aumento da capacidade produtiva de forma sustentável. Para que essa tecnologia tenha uma utilização mais difundida é preciso diminuir os custos de produção e melhorar a eficiência das células solares existentes, através de estudos constantes buscando aprimoramento das células atuais.

No atual contexto em que nos encontramos, de isolamento e prevenção, foi possível desenvolver um estudo teórico sobre o assunto proposto. Testes em laboratório com dispositivos comerciais que estavam planejados para serem realizados a partir da metade do primeiro semestre de 2020 tiveram que ser suspensos e, portanto, não puderam ser apresentados neste trabalho.

### REFERÊNCIAS

FADIGAS, E. A. F. A. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos, Conversão e Viabilidade técnico-econômica**. Grupo de Energia - Escola Politécnica Universidade de São Paulo.

FRAUNHOFER ISE: Photovoltaics Report (2020) Updated: 23 June 2020, <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>. Acessado em agosto de 2020.

GREEN, M. A. **Australian Photovoltaics Research and Development**, American Chemical Society Energy Lett: 2016, 1, 516–520.

New Semiconductor Materials. Biology systems. Characteristics and Properties. <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/Si/bandstr.html#Temperature>. Acessado em 14/05/2020

PASIN, D. G. **Resposta Espectral e Caracterização Elétrica de Célula Solar de Tripla Junção**. 2019. Dissertação. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais: São José dos Campos.

SOUZA, L. D. **Nota técnica do Grupo de Óptica e Optoeletrônica** - Depto. de Física – UEL, NT : 004 /2005.