

CÉLULAS SOLARES DE SILÍCIO: PASSADO, PRESENTE E FUTURO

Jorge Oliveira Melo²⁹

RESUMO

O silício é o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre e o fato de apresentar um óxido, o dióxido de silício (Si_2O), com características únicas, faz dele o material da microeletrônica por excelência. Desde a criação da primeira célula solar de silício, diversos avanços foram implementados, tais como, o desenvolvimento de junções rasas, metalização fotolitograficamente definida, revestimentos anti-reflexo aprimorados e texturização de superfície. A terceira fase começou no início dos anos 1980 e resultou de melhorias na passivação de superfície, passivação por contato e captura de luz na célula. Um dos maiores desafios que o setor enfrenta é a redução de custos dos sistemas fotovoltaicos, entretanto o impulso proporcionado pela recente expansão da pesquisa, desenvolvimento e industrialização apontam para um futuro brilhante, principalmente para países como o Brasil com grandes regiões geográficas não eletrificadas e alta insolação ao longo do ano. Com relação ao Exército Brasileiro, a energia solar tem uma gama de benefícios: reduz despesas com a eletricidade, viabiliza ocupação de regiões inóspitas no norte do país, garante autonomia nas operações militares, principalmente aquelas que exigem alto grau de sigilo. O presente trabalho apresenta um resumo da evolução das células fotovoltaicas de silício. Estas ainda dominam o mercado mundial, pois apresentam alta eficiência comparada as atuais células solares de diferentes semicondutores e subcategorias.

Palavras-chave: células fotovoltaicas; silício; energia solar; evolução das células solares.

ABSTRACT

Silicon is the second most abundant element in the earth's crust, and the fact that it has an oxide, silicon dioxide (Si_2O), with unique characteristics makes it the material of microelectronics par excellence. Since the creation of the first silicon solar cell, several advances have been implemented, such as the development of shallow junctions, photolithographically defined metallization, improved anti-reflective coatings, and surface texturing. The third phase began in the early 1980s and resulted from improvements in surface passivation, contact passivation, and light capture in the cell. One of the biggest challenges facing the industry is the cost reduction of photovoltaic systems, however the momentum provided by the recent expansion of research, development and industrialization points to a

²⁹ Colégio Militar do Rio de Janeiro

bright future, especially for countries like Brazil with large non-electrified geographical regions and high insolation throughout the year. With regard to the Brazilian Army, solar energy has a range of benefits: it reduces electricity costs, enables the occupation of inhospitable regions in the north of the country, and guarantees autonomy in military operations, especially those requiring a high degree of secrecy. The present work presents a summary of the evolution of silicon photovoltaic cells. These still dominate the world market, as they have high efficiency compared to current solar cells of different semiconductors and subcategories.

Keywords: photovoltaic cells; silicon; solar energy; evolution of solar cells.

1. INTRODUÇÃO

Diante da necessidade de diversificação da matriz energética e de políticas ambientais cada vez mais restritivas, as pesquisas nas últimas décadas têm focado muito no desenvolvimento de fontes alternativas de energia menos poluentes, renováveis e que produzam menor impacto ambiental [BRITO, 2013]. A energia fotovoltaica é um *mercado em rápido crescimento e desde janeiro de 1993, a Progress in Photovoltaics publica seis listas mensais das maiores eficiências confirmadas para uma variedade de tecnologias de células e módulos fotovoltaicos.*

As células solares de silício cristalino (c-Si) têm desempenhado um papel importante por muitos anos nas indústrias fotovoltaicas devido às suas excelentes propriedades ópticas e alta eficiência de conversão de energia (PCE - power conversion efficiency), atualmente em 26,7% [GREEN, 2022].

Esta revisão apresenta a evolução das células fotovoltaicas de silício, que ainda concorrem com as atuais células solares de diferentes semicondutores e subcategorias.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Efeito fotovoltaico

O efeito fotovoltaico ocorre em materiais semicondutores, que conduzem eletricidade de forma mais efetiva que os isolantes e menos efetiva do que os condutores. Eles se caracterizam pela presença de faixas de energia, uma faixa “cheia” permitindo a presença de elétrons (banda de valência) e de outra “vazia” (banda de condução), conforme se observa

esquemáticamente na Figura 1. Entre essas duas faixas se encontra a banda proibida ou hiato energético. A largura da faixa proibida determina se o material é condutor, isolante ou semiconductor. Os materiais isolantes têm uma faixa proibida larga, da ordem de 6 eV, os semicondutores apresentam banda proibida média, da ordem de 1 eV.

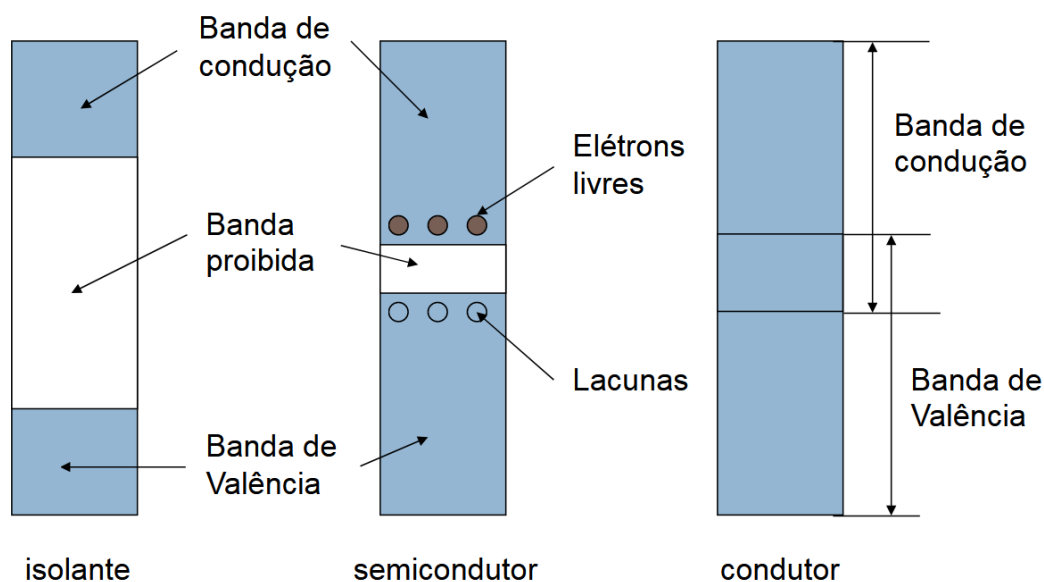


Figura 1 Esquema das bandas de energia (Fonte: autoria própria)

Fótons, na faixa da luz visível, com energia superior ao hiato de energia (gap) do material podem excitar elétrons da banda de valência para a banda de condução, produzindo, assim, uma corrente elétrica no interior da estrutura cristalina do semiconductor.

2.2 Semicondutores

São sólidos geralmente cristalinos de condutividade elétrica intermediária, variando entre 10^{-6} e 10^4 ($\Omega \cdot m$)⁻¹. Nesses materiais, a banda de valência está totalmente ocupada à baixa temperatura, com os quatro elétrons formando ligações covalentes, a cada excitação eletrônica para a banda de condução surge um buraco (lacuna) na banda de valência. Esses buracos funcionam como portadores de cargas positivas, contribuindo para a condutividade. Essa condutividade cresce rapidamente com a temperatura, no silício, quando dobra de 300 K para 600 K, o número de elétrons excitados aumenta por um fator de um bilhão. A

condutividade dos semicondutores provenientes de excitações térmicas é denominada condutividade intrínseca. Outra forma de reforçar a condutividade é adicionando impurezas, mesmo em concentrações muito pequenas, isto é, substituindo alguns átomos do semicondutor por átomos de outro elemento, tendo aproximadamente o mesmo tamanho, porém valência diferente. Esse procedimento é denominado de condutividade extrínseca e o processo de difusão substitucional de dopagem [EIBERG, 1986].

2.3 DOPAGEM Um material possui elétrons livres e, portanto, é mal condutor elétrico. Para alterar isso, acrescentam-se porcentagens de outros elementos (impurezas). Este processo denomina-se dopagem.

Um átomo de silício apresenta quatro elétrons em sua última camada, cada um dos quais está ligado covalentemente a um dos quatro átomos de silício adjacente. Supondo que um átomo de impureza com valência cinco, por exemplo o fósforo, seja adicionado, apenas quatro dos cinco elétrons de valência desse átomo de impureza podem participar da ligação, pois existe apenas quatro ligações possíveis com átomos vizinhos. O elétron adicional, que não forma ligações, fica fracamente preso à região em torno do átomo de impureza por uma atração eletrostática fraca, como mostra Figura 2. A energia de ligação desse elétron é relativamente pequena (da ordem de 0,01 eV); dessa forma, ele é removido com facilidade do átomo de impureza e se torna um elétron livre ou de condução.

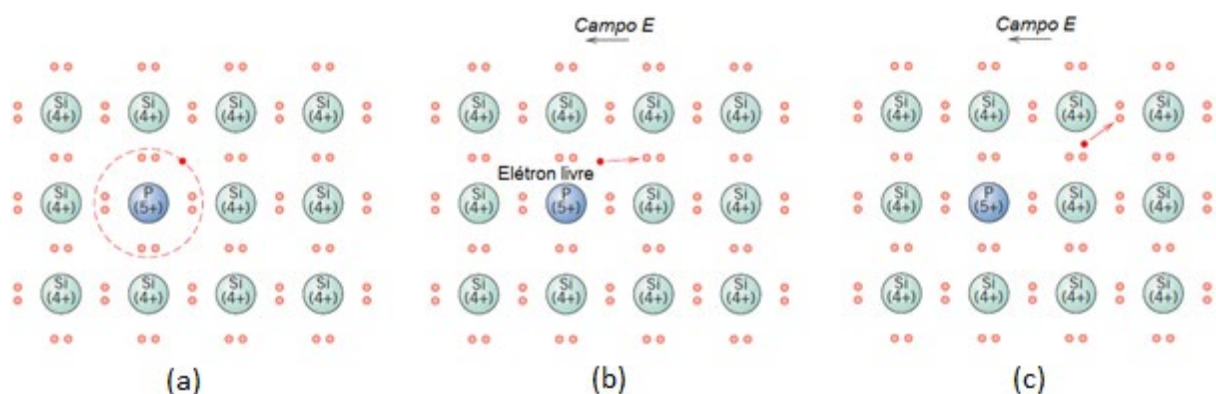


Figura 2 Modelo de semicondução extrínseca do tipo N. (a) Um átomo de fósforo, que possui cinco elétrons de valência, pode substituir um átomo de silício. (b) Excitação para formar um elétron livre. (c) O movimento desse elétron livre em resposta a um campo elétrico [CALLISTER, 2020].

Realizando o mesmo processo de dopagem, mas agora acrescentado boro ao invés de fósforo, obtém-se um material com características inversas, ou seja, falta de elétrons ou material com cargas positivas livres (silício tipo P).

3. A CÉLULA SOLAR FOTOVOLTAICA

3.1 Princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica

Conforme observado anteriormente, as células fotovoltaicas tradicionais de silício são constituídas de semicondutores dopados positiva e negativamente, formando as conhecidas junções P-N. Essas junções, conforme ilustrado na Figura 3, são separadas por uma região de depleção que surge devido à recombinação de elétrons e lacunas.

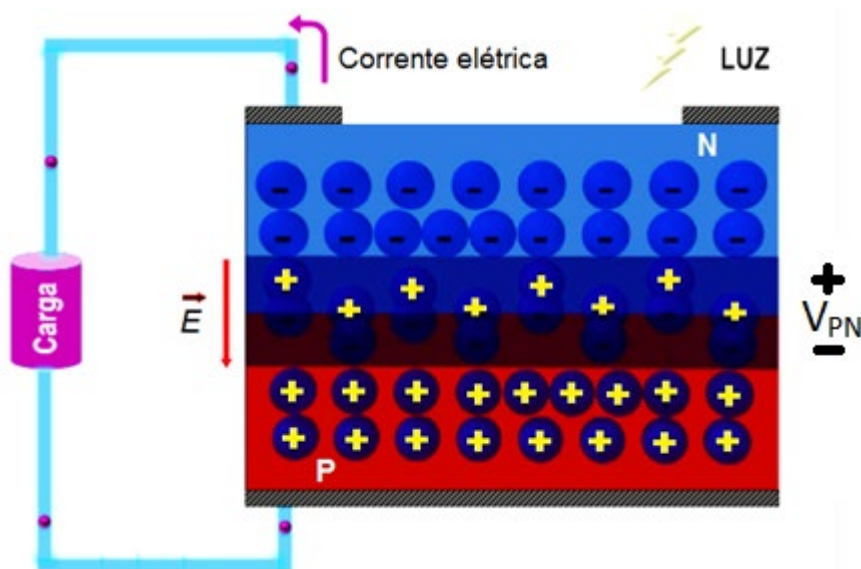


Figura 3 Princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica

(https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/16960/1/Semicondutores_Modelo%20matem%C3%A1tico%20da%20c%C3%A9lula%20fotovoltaica.pdf)

O resultado é que o acúmulo de cargas positivas na camada do tipo N e de cargas negativas na camada do tipo P dá origem a um campo elétrico e, consequentemente, a uma diferença de potencial (V_{PN}). É importante mencionar que essa tensão consiste numa verdadeira barreira impedindo a circulação de elétrons entre os dois materiais.

Uma vez em equilíbrio, só haverá deslocamento de elétrons da camada N para a camada P quando estes receberem energia suficiente de um meio externo. No caso das células

fotovoltaicas, essa energia é proveniente dos fótons presentes na luz solar, que ao excitar os elétrons faz com que estes passem da camada de valência para a camada de condução.

Assim, por meio de um circuito externo, conectando a camada negativa à positiva, surge um fluxo de elétrons (corrente elétrica) que se manterá enquanto a luz incidir na célula. Evidentemente, a taxa de elétrons gerada dependerá da quantidade de luz incidente e da capacidade de absorção do material semiconductor [HERSCH, 1982].

3.2 Estrutura da célula solar fotovoltaica

A Figura 4 mostra a composição interna de uma célula fotovoltaica típica, a partir da qual podemos definir as seguintes subdivisões [STANKIEWICZ, 2013]:

- Contato (eletrodo) frontal metálico (terminal negativo);
- Película antirreflexo para redução da reflexão da radiação incidente;
- Silício tipo N dopado com fósforo, com espessura de aproximadamente 300 nm constituindo a região negativa da célula;
- Silício tipo P dopado com boro, com espessura de aproximadamente 250 mm constituindo a região positiva da célula;
- Contato (eletrodo) metálico inferior (terminal positivo).

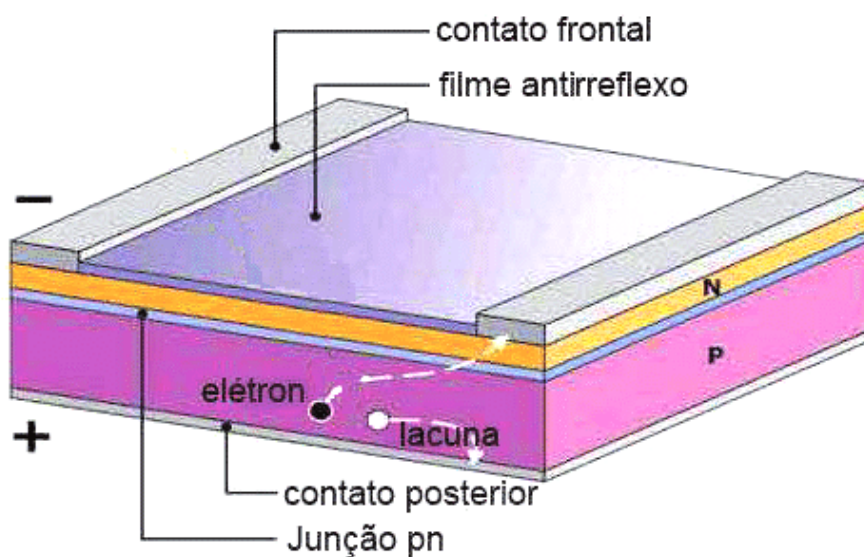


Figura 4 Diagrama de uma célula solar típica [PINHO e GALDINO, 2014]

Uma célula solar fotovoltaica é, em geral, uma junção entre dois semicondutores P-N cuja função é absorver os fótons que atingem sua superfície e transformá-los em corrente elétrica (FAHRENBRUCH e BUBE, 1983). Isso é possível desde que a energia do fóton ($h\nu$) seja igual ou maior que a diferença de energia entre as bandas de valência e condução (energia de banda proibida ou bandgap = E_g), o que resulta na fotogeração de um par elétron-buraco. O excesso de energia ($h\nu - E_g$) é perdido por termalização dos elétrons. Caso $h\nu < E_g$, o fóton não será absorvido, não contribuindo com a foto-corrente. Somente estas duas situações já limitam teoricamente a eficiência de conversão energia solar - energia elétrica em aproximadamente 44% (GREEN, 2002).

3.3 Tipos de células fotovoltaicas

- Células de silício cristalino (c-Si)
- Célula de silício monocristalino (m-Si)
- Célula de silício multicristalino ou policristalino (p-Si)
- Célula fotovoltaica de filme fino (ex: a-Si, μ c-Si)
- Célula fotovoltaica de heterojunção (HJT)
- Célula solar de silício amorfo (a-Si)
- Célula solar de silício nanocristalino ou microcristalino (μ c-Si)
- Célula fotovoltaica de seleneto de cobre índio e gálio (CIGS)
- Célula fotovoltaica de telureto de cádmio (CdTe)
- Célula solar de arseneto de gálio (GaAs)
- Célula fotovoltaica orgânica (OPV)

A evolução das células fotovoltaicas ao longo dos anos é classificada em gerações, onde as células baseadas em silício, destacadas em verde na Figura 5, encontram-se nas duas primeiras.

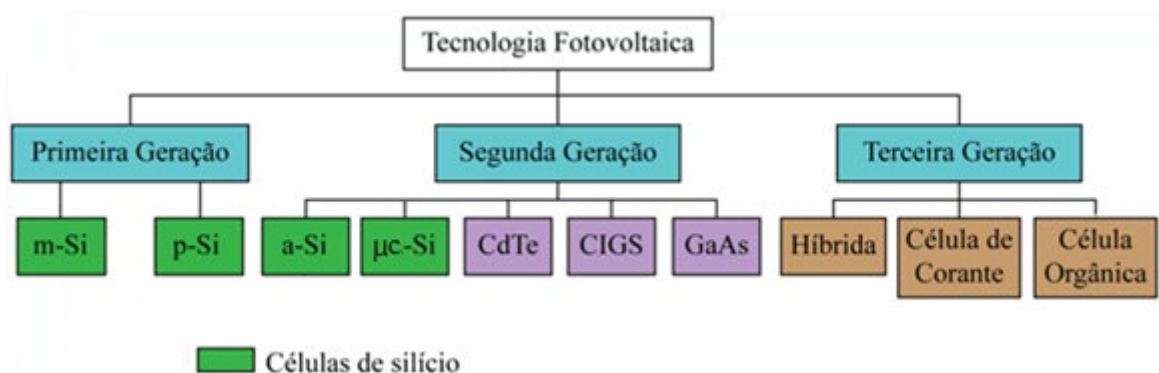


Figura 5 Tipos de células fotovoltaicas [adaptado BÜHLER, 2018]

Os dois tipos mais utilizados são os da primeira geração, e o mais antigo é o que ainda tem a maior eficiência. O silício monocristalino é composto de uma única fatia de silício, a malha é uniforme, portanto os elétrons têm muito espaço para fluir. Enquanto o silício multicristalino é composto de vários pedaços de silício, a malha não é uniforme, o movimento dos elétrons é dificultado por estruturas irregulares da malha. Isto explica porque o silício monocristalino é o que exhibe maior eficiência [PENG, 2022]. A tabela 1 fornece dados precisos do PCE das células fotovoltaicas de silício.

Tabela 1 Quadro das eficiências das células [adaptado GREEN, 2022]

Classificação	PCE (%)
Si (cristalino)	26,7±0,5
Si (multicristalino)	24,4±0,3
Si (amorfo)	10,2±0,3
Si (microcristalino)	11,9±0,2

4. TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO DO SILÍCIO

O silício não existe na natureza no estado elementar, mas sob a forma de silicatos e óxidos. Existem técnicas de produção de silício a partir de fontes gasosas e sólidas, as de maior destaque são Deposição Química à Vapor e Crescimento Czochralski, respectivamente.

Uma história consolidada de desenvolvimento de células de silício mostra três fases principais na evolução da eficiência. As primeiras melhorias importantes nas eficiências ocorreram no início de 1950 com o desenvolvimento de técnicas de difusão de junção, crescimento de cristal e o refinamento do projeto de células e contatos. Outra fase ocorreu na década de 1970 com o desenvolvimento de junções rasas, metalização fotolitograficamente definida, revestimentos antirreflexo aprimorados e texturização de superfície. A terceira fase começou no início dos anos 1980 e resultou de melhorias na passivação de superfície, passivação por contato e captura de luz na célula [GREEN, 2009].

Segundo Peng et al. as tendências para os próximos anos até 2029 são as tecnologias de emissão passivada principal e posterior (PER) e de heterojunção de silício.

4.1 Emissor passivado e traseiro

A tecnologia PERC (emissor passivo e contato traseiro) adiciona uma camada de passivação para evitar recombinação prematura indesejada e geralmente é feita de óxido de alumínio ou de silício, Figura 6. A camada de passivação também reflete a luz não absorvida de volta para a célula solar em uma tentativa de absorção extra, portanto, essa técnica reduz a recombinação de elétrons, melhora a absorção de luz e aumenta a refletividade interna [PENG, 2022].

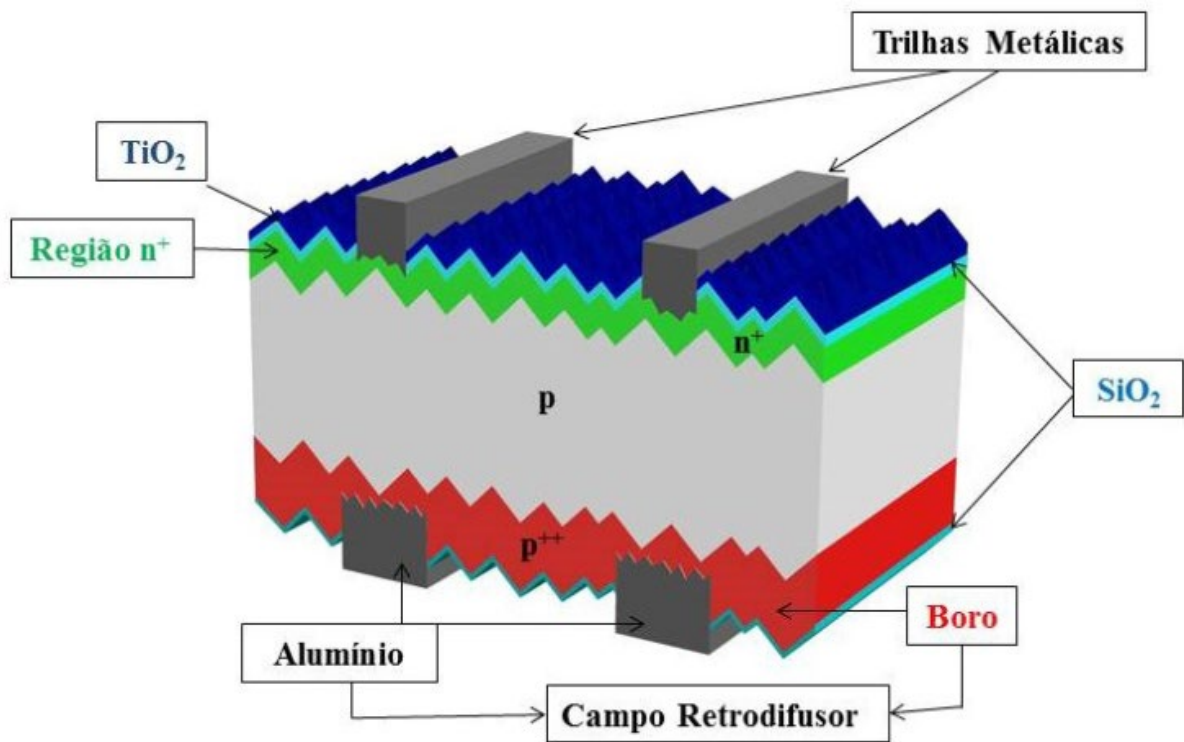


Figura 6 Estrutura da célula solar com material de passivação (ZANESCO, 2017)

4.2 Heterojunção

Heterojunção significa usar dois ou mais materiais diferentes para criar uma junção. O tipo de materiais, a taxa de mistura de materiais etc. são fatores contingentes da criação de uma heterojunção efetiva, pois ela melhora a reflexão e a absorção da luz solar [PENG, 2022].



Figura 7 Estrutura de wafers de silício de heterojunção

(<https://www.thesolarnerd.com/blog/what-is-heterojunction-solar-panel/>)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Desde que a primeira célula solar de silício foi relatada em 1941 [Ohl,1941], com eficiência inferior a 1%, houve melhorias substanciais no desempenho da célula solar de silício, culminando no valor de 26,7%.

Embora as medições de eficiência da célula solar historicamente dependessem bastante do laboratório, as melhorias nas abordagens de calibração e o aumento das comparações interlaboratoriais reduziram essas diferenças no início da década de 1990. O intercâmbio de células sugere que qualquer diferença sistemática entre as calibrações de células entre centros de teste reconhecidos é geralmente inferior a 1% ou mais, com erro de medição aleatório sendo aproximadamente da mesma magnitude.

6 CONCLUSÃO

Com esta descrição da evolução do cristal de silício para fins de uso no campo da energia solar, destacam-se a cooperação interdisciplinar entre pesquisadores de materiais, desenvolvedores de dispositivos, designers e tecnólogos, pois somente quando este material é adequadamente alterado e estruturado por meio de processos controlados e reproduzíveis que se torna valioso.

O rápido avanço nas eficiências de conversão de energia, durabilidade e redução de custos tem sido um desenvolvimento espetacular para células solares de silício fotovoltaico. Outras tecnologias foram otimizadas com esforço diligente ao longo de décadas para trazê-las relativamente perto do nível prático para o comercial. Ainda há espaço para prováveis melhorias associando química pouco explorada de materiais orgânicos e inorgânicos para aplicações em células fotovoltaicas. Dessa forma, espera-se que os fotovoltaicos se tornem uma fonte difundida e sustentada de produção de energia em grande escala para as gerações futuras.

7. REFERÊNCIAS

BRITO, M. A. G., *Inversores integrados monofásicos e trifásicos para aplicações fotovoltaicas: técnicas para obtenção de MPPT, detecção e proteção de ilhamento, sincronização e paralelismo com a rede de distribuição de energia elétrica*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2013.

CALLISTER, W. D. JR., RETHWISCH, D. G., *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 10 ed., pp.589-602, Rio de Janeiro, 2020.

EIBERG, R., RESNICK, R. *Física quântica*. 4 ed., 587-599, Rio de Janeiro.

FAHRENBRUCH, M. B., BUBE, R. H., *Fundamentals of solar cells and photovoltaic solar energy conversion*. New York, Academic Press, 1983.

GREEN M. A., et al., *Solar cell efficiency tables (Version 60)*. Prog Photovolt Res Appl., 30:687–701., 2022.

GREEN M. A., *The Path to 25% Silicon Solar Cell Efficiency: History of Silicon Cell Evolution*. Prog. Photovolt: Res. Appl. 17:183–189, 2009

GREEN M. A., *Third generation photovoltaics: solar cells for 2020 and beyond*. Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, Volume 14, Issues 1-2, 65-70, 2002.

HERSCH, P., ZWEIBEL, K., *Basic photovoltaic principles and methods*. Golden, CO: Technical Information Office Solar Energy Research Institute, 1982.

OHL R. S., *Light sensitive electric device*. US Patent 240252, filed 27 March 1941. Light-sensitive electric device including silicon. US Patent 2443542, filed 27, May 1941.

PENG, J., et al., *Evolution of silicon wafer dimensions*. Journal of Physics: Conference Series, 2221, 012025, 2022.

PINHO, J. T., GALDINO, M. A., *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos*. CEPEL - CRESESB, Rio de Janeiro, 2014.

STANKIEWICZ, A. L., *Estudo Comparativo de Técnicas de Rastreamento de Máxima Potência para Geração de Energia Solar Fotovoltaica*. Dissertação de Mestrado, Universidade Regional de Blumenau, 2013.

ZANESCO, I., et al., *Análise da passivação com SiO₂ na face posterior e frontal de células solares com campo retrodifusor seletivo*. Revista Matéria, ISSN 1517-7076 artigo e-11924, 2017.