INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E TERRITÓRIO/ILATIT

ENGENHARIA DE MATERIAIS

PROGRESSO NA FABRICAÇÃO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS DE FILMES FINOS DE PERVOSKITA DE ALTA EFICIÊNCIA, UM ESTUDO COMPARATIVO

Ricardo Durelian

Foz do Iguaçu

2024

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E TERRITÓRIO/ILATIT

ENGENHARIA DE MATERIAIS

Ricardo Durelian

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano De Tecnologia, Infraestrutura Território/ILATIT da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr Eduardo Gonçalves Reimbrecht

Foz do Iguaçu

2024

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

Ricardo Durelian

PROGRESSO NA FABRICAÇÃO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS DE FILMES FINOS DE PERVOSKITA DE ALTA EFICIÊNCIA, UM ESTUDO COMPARATIVO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano De Tecnologia, Infraestrutura Território/ILATIT da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr Eduardo Gonçalves Reimbrecht.

BANCA EXAMINADORA

_____

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Gonçalves Reimbrecht (UNILA)

_____

Prof. Dr. Rafael Drumond Mancosu (UNILA)

_____

Prof. Dr. José Ferreira Da Silva Junior (UNILA)

Foz do Iguaçu, _____de_____ de_____.

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

TERMO DE SUBMISSÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS

Nome completo do autor:

Curso:

	Tipo de Documento
(…..) graduação	(…..) artigo
(…..) especialização	(…..) trabalho de conclusão de curso
(…..) mestrado	(…..) monografia
(…..) doutorado	(…..) dissertação
	(…..) tese
	(…..) CD/DVD – obras audiovisuais
	(…..)

Título do trabalho acadêmico:

_____

_____

_____

Nome do orientador(a): _____

Data da Defesa: _____/_____/_____

Licença não-exclusiva de Distribuição

O referido autor(a):

a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que o detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.

b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana os direitos requeridos por esta licença, e que esse material

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade Federal da Integração Latino-Americana, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Na qualidade de titular dos direitos do conteúdo supracitado, o autor autoriza a Biblioteca Latino-Americana – BIUNILA a disponibilizar a obra gratuitamente e de acordo com a licença pública *Creative Commons* Licença 3.0 Unported.

Foz do Iguaçu, _____ de _____ de _____.

_____

Assinatura do Responsável

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço ao criador do universo que me deu a força para chegar até aqui.

Agradecimentos muito especial ao professor orientador Eduardo Gonçalves Reimbrecht, não só pela orientação neste trabalho, mas sobretudo pela sua paciência para comigo.

Aos colegas do curso, principalmente o Stevenson Pierre Louis.

Aos Professores Gislaine Bezerra Pinto Ferreira, José Ferreira Da Silva Junior, Priscila Lemes e Rafael Drumond Mancosu.

Agradecimentos muito especial à minha esposa Darlene Seide e minha mãe Edith Joseph e aos meus filhos Ana Louise Durelian Seide e o Caleb Durelian Seide que me dão a motivação para não desistir e continuar minha jornada nesta terra.

Ao supervisor da manutenção da Frimesa cooperativa central de Medianeira, Idivair Julião Vaz e à engenheira Ana Carolina Borges Conceição.

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

RESUMO

Na busca por reduzir emissões de CO2 e combater o efeito estufa. Entre as inovações tecnológicas, destacam-se os painéis solares de filmes finos de perovskita. Um material com estrutura cristalina cúbica capaz de acomodar diferentes átomos, desde que respeitem um fator de tolerância entre 0,88 e 1,1. Devido à sua capacidade de transportar tanto elétrons quanto lacunas, esses filmes são empregados como semicondutores dos tipos p e n, melhorando o fluxo eletrônico, a disponibilidade de corrente e a eficiência das células solares. Até 2013, a produção científica sobre células solares de perovskita era muito limitada. No entanto, em apenas uma década, foram alcançados avanços expressivos. A eficiência desse material evoluiu de 11,9% em 2013 para 26,7 ± 0,6% em 2024, considerando os resultados laboratoriais. Esse desempenho se aproxima do das células cristalinas de silício, líderes de mercado, que alcançam uma eficiência de 27,3 ± 0,4%. Assim, a perovskita surge como uma alternativa promissora para ampliar o uso da energia solar em escala global.

Palavras chaves: Filmes finos de perovskita; eficiência; painéis solares fotovoltaicos.

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

ABSTRACT

The use of energy is essential for daily activities, and renewable sources are becoming increasingly important to reduce CO2 emissions and mitigate the greenhouse effect. Among technological innovations, thin-film perovskite solar panels stand out. Perovskite is a material with a cubic crystalline structure capable of accommodating various atoms, as long as they comply with a tolerance factor between 0.88 and 1.1. Due to its ability to transport both electrons and holes, thin-film perovskites function as p-type and n-type semiconductors, improving electron flow, current availability, and the overall efficiency of solar cells. Until 2013, scientific research on perovskite solar cells was limited. However, over the following decade, significant progress was achieved. The efficiency of this material increased from 11.9% in 2013 to 26.7 ± 0.6% in 2024 in laboratory tests. This performance is now comparable to that of crystalline silicon solar cells, which have long dominated the market with an efficiency of 27.3 ± 0.4%. With these advancements, perovskite technology offers promising potential to accelerate the adoption of solar energy worldwide.

Keywords: Perovskite thin films; efficiency; photovoltaic solar panels.

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

LISTA DE SIGLAS E ABREVISTURAS

J_{ph}: Corrente escura injetada dos eletrodos do dispositivo por uma tensão polarizada.

J_{sc}: Corrente máxima de uma célula solar sob condição de curto-circuito.

CO_2: Dióxido de carbono

ETL: Camada de transporte de elétrons

Fill Factor (FF): Medida que avalia a eficiência das células solares.

GW: Gigawatts

Gt/ano: Gigatonelada por ano

HTL: Camada de transporte de lacunas ou vacâncias

J_{mpp}: Densidade de corrente no ponto energético mais elevado

OCDE: Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico.

PCE: Eficiência de conversão de energia, do inglês power conversion efficiency

Pin: Potência da luz incidente.

P_{out}: Potência máxima de saída

Renewables Global Status Report (REN21): Relatório que apresenta a situação global de um determinado tema.

Spin Coating: Palavra de origem inglesa que significa revestimento por rotação

TWh: Terawatts-hora

Vmpp: Tensão no ponto energético mais elevado da célula.

n-type semiconductor: Semicondutor do tipo n

p-type semiconductor: Semicondutor do tipo p

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

SUMÁRIO

RESUMO **7**

ABSTRACT **8**

SUMÁRIO **10**

INTRODUÇÃO **11**

1 OBJETIVOS **12**

1.1 OBJETIVO PRINCIPAL 12

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS 12

2 REVISÃO BLIOGRÁFICA **13**

2.1 ENERGIAS RENOVÁVEIS 13

2.2 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS 15

3.2.1 Difusão nas células fotovoltaicas *15*

2.2.2 Gerações de células fotovoltaicas *17*

3.2.1.1 Células solares da primeira Geração 17

3.2.1.2 Células solares da segunda geração 18

3.2.1.3 Células solares da terceira geração 18

2.3 ESTRUTURA DA PEROVSKITA 22

3.3.1 Fundamentos Da Estrutura Da Perovskita *22*

2.3.1 Parâmetros fotovoltaicos da estrutura da perovskita *25*

2.4 FILMES FINOS 27

2.4.1 Revestimento por rotação (spin coating) *28*

3 MATERIAIS E MÉTODOS **30**

4 RESULTADOS **31**

5 CONCLUSÕES **38**

6 REFERÊNCIAS BIBLIGRÁFICAS **39**

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

1 INTRODUÇÃO

Para produzir eletricidade, um gerador ou turbina converte energia mecânica em energia elétrica. Para chegar a este fim, podem ser usadas fontes como: petróleo, gás natural, fissão nuclear, carvão, biomassa e energia geotérmica, onde o calor produzido é utilizado para gerar vapor, que movimenta as pás da turbina. Quando se trata de energia eólica e hidrelétrica, para gerar tais energias, as pás das turbinas são movidas diretamente pelo vento e pela água, respectivamente [1]. Os painéis solares fotovoltaicos convertem a luz solar diretamente em eletricidade, usando semicondutores, como nos casos dos painéis fotovoltaicos de silício ou perovskita.

Segundo Guimarães et al. (2004), a energia fotovoltaica é obtida pela conversão direta da luz em eletricidade por meio da absorção luminosa. Nos materiais semicondutores, essa conversão gera uma diferença de potencial entre os extremos de sua estrutura. A célula solar é a unidade fundamental desse processo de conversão. O autor também destaca que o sol é a fonte primária de todas as formas de energia, sendo essencial para processos como a fotossíntese da cana-de-açúcar, que, posteriormente, é transformada em álcool pela indústria.

Com o passar dos anos, a forma de transformar a energia solar em energia elétrica tem mudado significativamente. Em vez de usar apenas semicondutores de silício para a produção de energia, passaram-se a utilizar outros tipos de materiais, como cádmio, telúrio, gálio e arsênio [2].

O uso mais recente, que vem revolucionando a produção de energia solar, é o de filmes finos de perovskita, devido à sua versatilidade, abundância na natureza e à variedade de métodos de fabricação disponíveis. A descoberta dessa característica da perovskita de produzir energia elétrica via células solares tem incentivado vários centros de pesquisa a desenvolverem uma rota viável para sua aplicação. Os filmes finos de perovskita, para esse fim, têm se mostrado cada vez mais promissores [3]. Neste trabalho, busca-se compreender um pouco mais sobre o tema dos filmes finos de perovskita para a produção de energia fotovoltaica. Sobretudo como este material tem evoluído na última década.

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO PRINCIPAL

O objetivo principal deste trabalho é apresentar as células fotovoltaicas de filmes finos de perovskita como materiais promissores na produção de energia fotovoltaica.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Apresentar os filmes finos de perovskita como materiais promissores no campo de produção de energia elétrica, via painéis solares.
- Comparar dados de parâmetros elétricos dos filmes finos de perovskita a partir de dados de 2013, 2014, 2015, 2016, 2022 e 2024.
- Mostrar a evolução tanto na eficiência quanto na tensão de circuito aberto dos filmes finos de perovskita para a produção de eletricidade. Trazendo referências bibliográficas, a partir das principais produções científicas e pesquisas feitas nesta área.
- Apresentar as técnicas de produção dos filmes finos de perovskita empregadas ao longo dessa evolução e como cada uma delas contribuiu para o aprimoramento da eficiência desse material.

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

3 REVISÃO BLIOGRÁFICA

3.1 ENERGIAS RENOVÁVEIS

Cada vez mais, têm surgido desafios quando o assunto é a produção e uso da energia, um dos temas mais abordados nos últimos anos é o tema da energia renovável. As energias renováveis são atualmente a fonte de energia que mais cresceu quando se trata do uso em edifícios, com um aumento médio de 4,1% ao ano entre 2009 e 2019 [4]. Segundo a revista Global Status Report 21, apenas em 2020 a China adicionou quase 117 GW à sua potência instalada. Com esse crescimento na instalação, a China quase igualou o crescimento da capacidade renovável instalada pelo mundo inteiro em 2013 (124,8 GW) [5].

O Brasil se encontra em uma posição privilegiada tanto pelo elevado patamar de utilização de fontes renováveis em sua matriz energética quanto pelo grande potencial de recursos energéticos disponíveis em seu território. A matriz energética brasileira, que engloba todas as fontes primárias e formas de consumo, é uma das mais renováveis do mundo, com 48,4% da oferta interna de energia proveniente de fontes renováveis em 2020 [6]. Enquanto as médias dos países da OCDE e do mundo foram respectivamente de apenas 11% no ano de 2017 [7] e 26% no ano de 2018 [8,9]. Esses números mostram que a matriz energética brasileira é quase 2 vezes mais renovável que a média mundial.

Devido ao grande potencial de recursos energéticos disponíveis em seu território, se considerar todas as fontes primárias e formas de consumo, a matriz elétrica do Brasil é uma das mais renováveis do mundo. O país dispõe de uma oferta interna de energia elétrica de fontes renováveis de mais de 65% de seu consumo. Se considerar as importações de energia elétrica que também são de fontes renováveis, a oferta interna de eletricidade no Brasil em 2020 chega a somar 84,8% [6].

Estima-se que em 2015, a geração de energia elétrica mundial por fontes renováveis representava 24% da geração total (20 204 TWh), com uma geração total de 16% por fontes hidrelétricas e somente 1% por painéis solares fotovoltaicos. A

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

previsão é de que a geração de energia elétrica passe de aproximadamente 20 204 TWh por ano em 2015 para mais de 41 508 TWh por ano em 2050. Como o crescimento acentuado de instalação de plantas de geração por fontes renováveis, estima-se que a produção de energia elétrica passará a representar 85% da geração mundial e que as fontes eólicas e solares por painéis fotovoltaicos alcancem respectivamente 36% e 22 % [8].

Ao alcançar essa meta, o setor de produção e distribuição de energia elétrica poderá reduzir as emissões de CO_2 de 12,4 Gt/ano para 1,9 Gt/ano (gigatonelada por ano). O setor do transporte global que em 2015 dependia de somente 4% de energias renováveis oriundas de fontes como biomassa (biodiesel, bioetanol) e de estação de recarga de carro elétrico abastecida por fontes como eólica e hidrelétrica, passará a contar com 58% da sua energia de locomoção dependendo de fontes renováveis como gás hidrogênio, biodiesel e elétrico com 8%, 22% e 28% respectivamente. Esta última, podendo depender de fontes como eólica e painéis solares fotovoltaicos. Assim reduzindo a emissão de CO_2 do setor de 7,7 Gt/ano para 3,1 Gt/ano [8].

Do mesmo modo, o setor da construção civil que em 2015 dependia de mais de 36% de energia elétrica de fontes renováveis passará a depender de mais de 77%, podendo, assim, reduzir as emissões de CO_2 de 2,8 Gt/ano para 0,8 Gt/ano. O consumo de energia elétrica por fontes renováveis do setor da indústria que representava pouco mais de 14% poderá ultrapassar 63% em 2050. Essa redução do uso dos métodos convencionais para a produção energia como o uso de carvão, derivados do petróleo e gás natural, poderá reduzir as emissões de CO_2 de 9,5 Gt/ano para 5,1 Gt/ano. Estima-se que com as medidas existentes hoje como controle de crédito carbono e instalação de medidas de filtragem dos poluentes industriais haveria um aumento de 120 % na emissão de CO_2 e que ao aumentar drasticamente a produção de energia por fontes renováveis as emissões em 2050 poderão representar somente 20 a 40 % dos níveis de 2015 [8].

Segundo a Renewables Global Status Report, (REN21, 2021) [4] a distribuição de energia solar por painéis fotovoltaicos no Brasil representa 2% do consumo mundial de energia desta categoria. No Brasil, o consumo desta categoria representa somente 1,7 % da energia produzida no país e pode vir a ultrapassar os 9% da produção total do país em 2040, passando de uma capacidade instalada de

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

7,76 GW em 2021 para 55 GW em 2040 [10,11].

3.2 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

A tecnologia fotovoltaica é a fonte de energia renovável mais eficiente para atender às futuras demandas energéticas e tem atraído a atenção de pesquisadores em todo o mundo. Atualmente, a tecnologia fotovoltaica de silício domina o mercado. No entanto, a tecnologia fotovoltaica de silício por si só não consegue atender às demandas energéticas do futuro, e isso tem incentivado os pesquisadores em todo o mundo a encontrar uma tecnologia fotovoltaica alternativa e eficiente, atraindo o interesse dos pesquisadores para as células solares de perovskita [12].

3.2.1 Difusão nas células fotovoltaicas

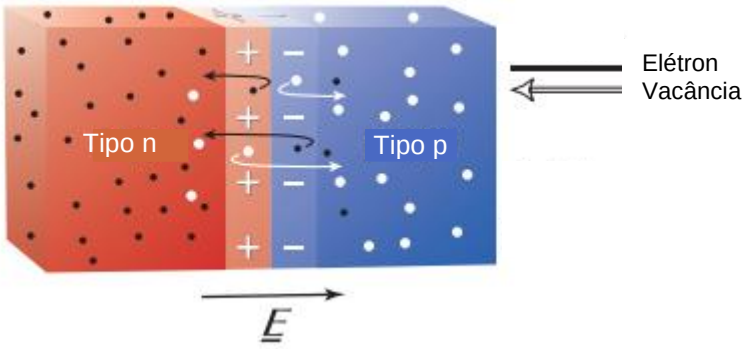
A maioria das células solares são essencialmente junções tipo p-n de grande área. Quando a luz incide sobre eles, eles podem gerar corrente e tensão. A razão pela qual isso pode acontecer é o campo elétrico embutido na junção do material do tipo p e do tipo n. Primeiro considere o que acontece se uma célula solar de silício (que é uma junção p-n) tiver um fio de baixa resistência conectado externamente entre o contato p e n. No escuro, uma célula solar não produzirá corrente. Se, no entanto, a luz incidir sobre a célula solar, a corrente fluirá através do fio, do lado tipo p para o lado tipo n (corrente convencional) [13].

Para que possa haver fluxo de corrente em um cristal semicondutor de célula solar teria que haver elétrons e buracos móveis dependendo do tipo de dopagem. Como elétrons e buracos têm carga elétrica, eles são naturalmente afetados por campos elétricos. Este tipo de movimento é chamado de fluxo difusivo (figura 1) e é importante na compreensão das junções p-n e das células solares [13, 14]. Onde, os elétrons circulam em direção ao dopante do tipo n, e as vacâncias (buracos) em direção ao tipo p. A soma do fluxo contínuo destes dois elementos gera o fluxo de corrente E, onde, os elétrons carregados negativamente vão fluir para o

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

polo positivo e as vacâncias carregadas negativamente se deslocarão para o pole negativo [15].

Figura 1. Difusão de elétrons e vacâncias (lacunas) na estrutura de dois materiais dopados, do tipo n e do tipo p (figura modificada).



Fonte: (SPROUL, A. 2023)

Assim como um perfume borrifado em uma sala se espalha pelo ar, os elétrons presentes na estrutura dos materiais tendem a se mover. No entanto, a energia necessária para permitir esse movimento eletrônico é bastante elevada na maioria das redes atômicas. Para facilitar esse processo de difusão de elétrons, materiais como células solares são dopados de maneira intencional, permitindo um fluxo controlado de elétrons e, consequentemente, gerando uma diferença de potencial [13].

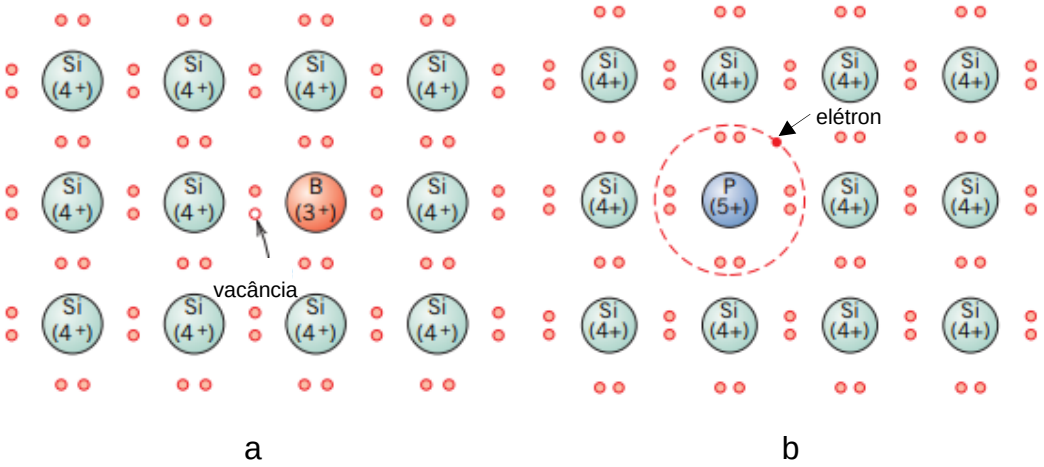
Quando a luz solar incide sobre a superfície de uma célula solar, a energia contida nela é capaz de romper as ligações em aproximadamente 1 a cada 100 milhões de átomos de silício. Embora essa energia não seja suficiente para derreter a célula, é mais do que suficiente para gerar um campo elétrico, desde que haja um número suficiente de lacunas para transportar esses átomos. Ao agrupar milhares de células solares, a produção de eletricidade se torna significativa [13].

Um exemplo clássico de elementos dopantes na aplicação de células solares é a de boro e o fósforo. Ao material base, o silício, pode ser adicionado átomos tanto do grupo 13, da família do boro, quanto do grupo 15, da família do nitrogênio. Na dopagem das células solares, os mais usados são respectivamente o boro, o gálio e o índio do grupo 13, estes átomos, quando inseridos na rede atômica do silício, eles deixam a rede com uma deficiência de elétrons, ou seja, com vacâncias formando a

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

dopagem do tipo p. O fósforo, arsênio e antimônio do grupo 15, são usados para deixar a rede do silício com um excesso de elétrons, o que deixa o material com uma facilidade de ceder elétrons, formando, portanto, a dopagem de tipo n [13].

Figura 2: Dopagem do silício com átomos de boro (a) e átomos e fósforo (b) formando as dopagens do tipo p e n, respectivamente.



Fonte: (SPROUL, A. 2023)

3.2.2 Gerações de células fotovoltaicas

As células solares podem ser divididas em três gerações, as denominadas, primeira geração, segunda geração e terceira geração.

3.2.1.1 Células solares da primeira Geração

A primeira geração de células fotovoltaicas é basicamente células feitas de camadas sobrepostas com espessura variando de algumas centenas de µm. As células solares de primeira geração são produzidas em pastilhas de silício. Essas células solares dominam o mercado, tendo uma participação global de 90% [12].

As células solares à base de silício dividem-se em dois tipos principais: monocristalinas e policristalinas. As monocristalinas são fabricadas a partir de silício monocristalino por meio do processo Czochralski, que envolve a fusão do silício em um forno de alta temperatura, utilizando cadinho e aquecedores de grafite [16]. Para assegurar a pureza do material, a fusão ocorre em um ambiente controlado com gás

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

inerte, como argônio. Esse processo demanda grande quantidade de energia, alcançando temperaturas de até 1000°C [17].

As células solares monocristalinas são uma tecnologia muito mais consolidada e alcançaram um PCE do inglês power conversion energy, eficiência de conversão de energia de 26,6% [12,16]. As células solares policristalinas são compostas por vários cristais de silício diferentes. Os custos de fabricação e processamento são inferiores aos das células monocristalinas, consequentemente, as células policristalinas são menos eficientes.

3.2.1.2 Células solares da segunda geração

As células solares de segunda geração também são compostas por finas películas, alguns exemplos comuns incluem telureto de cádmio (CdTe), disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e arseneto de gálio (GaAs). As células de películas finas são mais viáveis economicamente, pois a eficiência energética pela quantidade de material é maior. Essas células geralmente têm uma espessura de cerca de 1 µm, em comparação com cerca de 350 µm para células de camada múltipla de silício, o que confere as células de segunda geração uma certa flexibilidade, o que significa que podem ser utilizadas até em superfícies curvas. A maior eficiência registrada neste grupo de materiais é do GaAs, atingindo um PCE de 29,1% [12,16].

Um dos grandes problemas dessa classe de material, é a dificuldade de produção devido ao alto custo (GaAs), ou por serem elementos químicos raros (In,Te) ou de alta toxicidade (Cd). Devido a sua alta eficiência, o CdTe é amplamente utilizado na produção de painéis fotovoltaico, e chega a ocupar 95% dos painéis de filmes finos, e 5,1 % de todos os painéis fotovoltaicos existentes em 2013 [12,18].

3.2.1.3 Células solares da terceira geração

As células solares da terceira geração são definidas como aquelas capazes de se alcançar alta eficiência de conversão de energia, mantendo um baixo custo de produção. A sua implementação com tecnologias de filmes finos poderá ter um

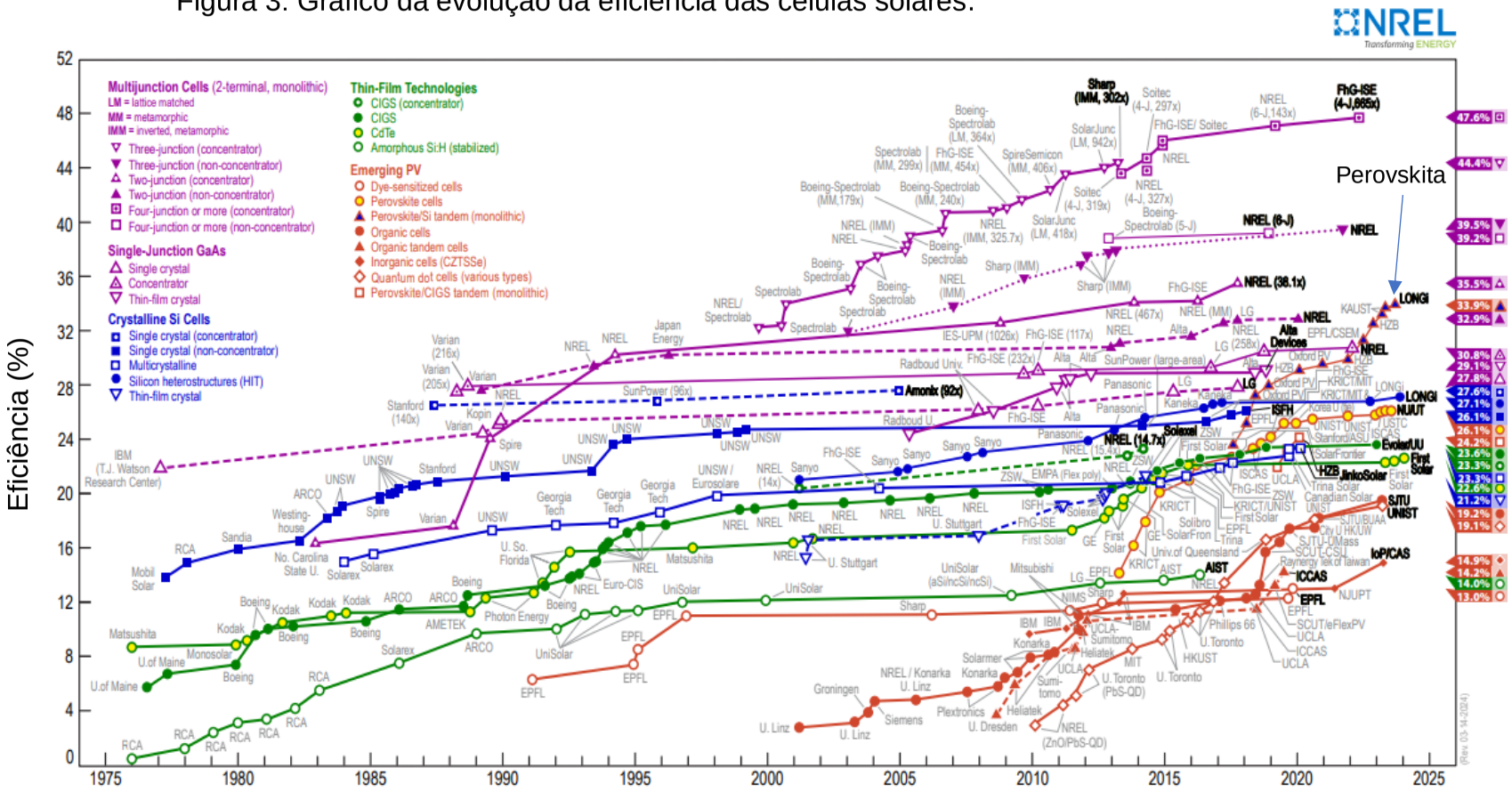
Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

enorme impacto econômico, tornando a energia solar uma das opções mais acessíveis e baratas para a produção futura de energia.

As células solares da terceira geração ainda estão em desenvolvimento, mas já alcançaram resultados promissores e estão melhorando rapidamente. O grande diferencial desses materiais é o processo de fabricação de baixo consumo de energia e materiais de baixo custo, o que os torna uma alternativa muito atraente. Das células solares de terceira geração, as células solares de perovskita são as mais promissoras. Na última década, os dispositivos solares baseados em perovskita viram o PCE saltar de 3,5% para valores acima de 32% (figura 3), o que supera o valor limite teórico das células de silício que é de 27,3% [2,12,19, 27].

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

Figura 3: Gráfico da evolução da eficiência das células solares.

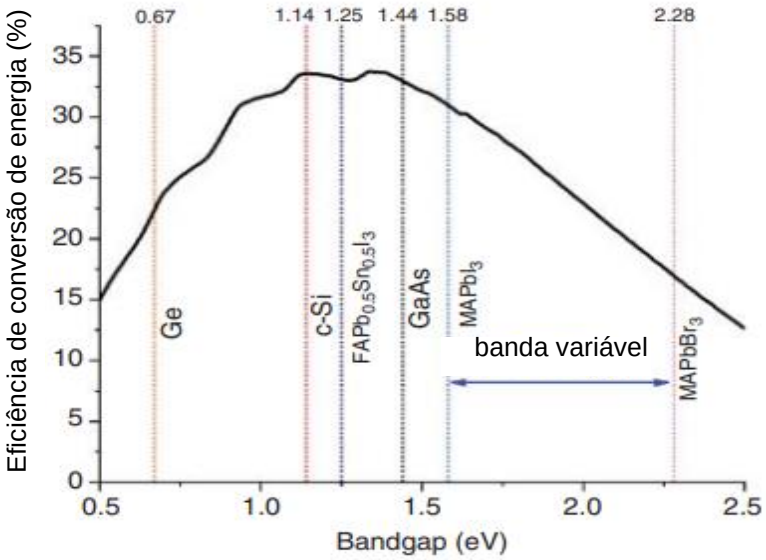


Fonte: NREL, 2019 [20]

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

As tecnologias de filme fino da terceira geração se destacam por apresentarem uma banda de condução ajustável, tornando-se uma alternativa mais eficiente para a captação de luz. Essa inovação é considerada um possível marco na evolução da tecnologia fotovoltaica. No caso das perovskitas, com estrutura ABX3, a banda de condução pode ser ajustada modificando-se o cátion orgânico (A), o metal (B) ou o haleto (X) (figura 4) [2, 19, 21]. Por exemplo, ao comparar o iodeto de chumbo de metilamônio ($MAPbI_3$) com o brometo de chumbo de metilamônio ($MAPbBr_3$), observa-se que a substituição do iodo pelo bromo eleva a banda de energia. Isso implica que os elétrons precisarão superar uma barreira energética maior para se deslocarem pelo material, o que reduz a eficiência na conversão de energia em células solares produzidas com esse composto ao serem expostas à luz. A perovskita composta por formamidínio de iodo estanho-chumbo ($FAPb_{0,5}Sn_{0,5}I_3$) demonstra eficiência e valores de banda de energia que são bastante semelhantes aos do silício cristalino [21].

Figura 4: Eficiência dos materiais e banda variável para as células da terceira geração.



Fonte: (AHMAD, S. 2022)

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

3.3 ESTRUTURA DA PEROVSKITA

3.3.1 Fundamentos Da Estrutura Da Perovskita

Logo após sua descoberta, na década 30 do século 19 [22], pairava uma dúvida sobre a estrutura da perovskita. Acreditava-se que podia ser monoclínico, cúbico ou ortorrômbico. Após a descoberta do raios-x, a discussão prévia foi reaberta, assumiu-se que pertencia ao grupo espacial cúbico centrossimétrico. Após sintetizar novos óxidos do tipo ABX_3, todos com empacotamento atômico semelhante à perovskita, como esperado na época, alguns dos novos compostos obtidos não tinham uma estrutura cúbica. Porém, o grande foco não era a simetria da estrutura, mas sim, a incrível versatilidade que a estrutura desse material apresentava em aceitar troca iônica. Além da regra ABX_3, para se encaixar na estrutura da célula unitária da perovskita, o átomo tem que respeitar a regra do fator de tolerância, onde o fator de tolerância é representado pela fórmula a seguir [22].

$$t = \frac{(rA+rX)}{\sqrt{2}(rB+rX)} \qquad (1)$$

Onde rA, rB e rX são os raios dos sítios iônicos A, B e X. Geralmente o valor desse fator (t) está entre 0,8 e 1,1 para fases de estruturas de perovskita [21, 22].

Graças a esses estudos, agora se compreende que a troca iônica, quando feita de maneira cuidadosa, preserva a estrutura básica da perovskita. A nomenclatura dessa estrutura não é determinada pelos íons que a constituem, mas sim pela configuração eletrônica resultante do posicionamento espacial desses íons. Contudo, a simetria da estrutura pode ser afetada, apresentando pequenas distorções, se o fator de tolerância t não for respeitado [22].

Antes da descoberta da difração de raios-X na década de 1950, era impossível visualizar as distorções na estrutura da perovskita. Essa situação mudou com a identificação de uma distorção do tipo rômbico centrossimétrico na estrutura do $CaTiO_3$. Os estudos realizados na metade do século 20 foram cruciais para a compreensão das duas principais características dessa estrutura [22].

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

Em primeiro lugar, destaca-se a versatilidade dessa estrutura, que permite acomodar grandes quantidades de íons diferentes, inclusive simultaneamente, em diversas posições cristalográficas. Atualmente, é comum encontrar perovskitas com mais de quatro íons distintos ocupando posições espaciais na estrutura tridimensional. Um exemplo bem conhecido dessa característica é a estrutura $(La_{0,80}Nd_{0,05}Sr_{0,10}Ca_{0,05})(Cr_{0,90}Ni_{0,10})O_3$ [23].

Em segundo lugar, a mudança iônica trouxe não somente variedade cristalográfica, mas, também importância prática, podendo apresentar várias propriedades distintas uma das outras, veja a tabela 1 a seguir.

Tabela 1. Tabela de propriedades mostrando a versatilidade da perovskita.

PROPRIEDADE	COMPOSTO
Ferromagnética	$BaTiO_3$, $PbTiO_3$
Piezoelétrica	$Pb(Zr,Ti)\ O_3$, $(Bi,Na)TiO_3$
Condutividade elétrica	ReO_3, $SrFeO_3$, $LaCoO_3$, $LaNiO_3$ $LaCrO_3$
Supercondutividade	$La0.9Sr0.1CuO_3$, $Yba2CuO_3$,
Ion condutivo	$La(Ca)AlO_3$, $CaTiO_3$ $La(Sr)Ga(Mg)O_3$, $BaZrO_3$, $SrZrO_3$
Magnética	$LaMnO_3$, $LaFeO_3$, La_2NiMnO_6,
Catalítica	$LaCoO_3$, $LaMnO_3$, $BaCuO_3$
Eletrodo	$La_{0.6}Sr_{0.4}CoO_3$, $La_{0.8}Ca_{0.2}MnO_3$,

Fonte: (PAN, L. 2016, traduzido [24])

Entender a dinâmica da introdução das variedades de íons em uma estrutura perovskita e o grau de distorção que cada um provoca na estrutura ajuda a entender as características fundamentais dessa estrutura.

Após a descoberta da perovskita pela mineralogista Lev Perovskite, foi o Vitor Goldschmidt que em 1926 que descreveu esta estrutura. A perovskita pode ser dividida em dois tipos, os tipos inorgânicos e haletos. Esta segunda classe é dividida em perovskita haleto alcalino e perovskita haleto organometálico, todas do tipo ABX_3, onde A, B e X podem variar [24]. Veja a tabela 2 abaixo.

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

Tabela 2: Tipos de estrutura de perovskita e sua composição.

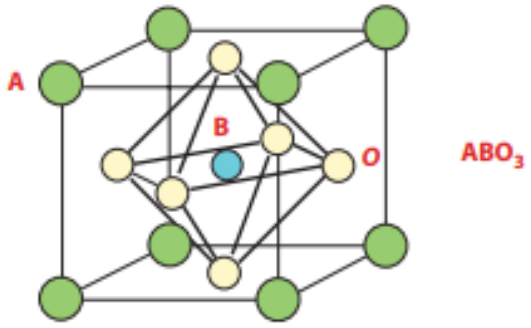
Tipos de estrutura de perovskita	A	B	X
Óxido inorgânico	Íons divalentes Pb^{2+}, Sn^{2+}, Ca^{2+}, Mg^{2+} etc	Íons metálicos tetravalentes Ti^{4+}, Sn^{4+} etc	O
Haleto alcalino	Íons monovalentes Na^{+}, Li^{+}, etc	Íons divalentes Pb^{2+}, Sn^{2+}, Ca^{2+}, Mg^{2+} etc	Halógeno Cl^{-}, Br^{-}, I^{-}
Haleto organometálico	Cátions orgânicos_ metilamônio (CH_3NH_3) Formamidínio ($HC(NH_2)_2$)	Íons divalentes Pb^{2+}, Sn^{2+}, Ca^{2+}, Mg^{2+} etc	Halógeno Cl^{-}, Br^{-}, I^{-}

Fonte: (AHMAD, S. 2022, traduzido)

A perovskita apresenta uma estrutura cúbica, conforme mostrado na Figura 5. Nesse arranjo, o íon A ocupa os vértices da célula unitária, o íon B está situado no centro, e o íon X localiza-se no centro da face. Um pequeno defeito na rede pode diminuir a simetria do cristal. Além disso, o mineral perovskita exibe distorções, as quais impactam várias propriedades físicas, incluindo seu comportamento eletrônico, magnético e dielétrico são afetadas [24].

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

Figura 5: Estrutura cristalina da célula unitária da perovskita, ABO_3, com O sendo o terceiro elemento ou X dependendo do autor. [24]



Fonte: (AHMAD, S. 2022)

3.3.1 Parâmetros fotovoltaicos da estrutura da perovskita

As caracterizações J – V das células solares são de crucial importância para avaliar a propriedade de conversão de fótons em eletricidade do sistema de materiais e do dispositivo. Normalmente, a curva J – V de uma célula solar é medida sob iluminação com uma intensidade incidente de P_{in} = 1000 W/m^2 a 25 °C. Para células solares convencionais, a corrente total medida sob iluminação (J_i) consiste na corrente fotogerada devido à absorção de fótons (J_{ph}) e na corrente escura injetada dos eletrodos do dispositivo (J_d) por uma tensão polarizada (V), e ambos de J_{ph} e J_d estão em sinais opostos [25].

A relação entre essas correntes é a seguinte:

$$J_i (V) = J_{ph} (V) + J_d (V) \quad (2)$$

A corrente de curto-circuito (J_{sc}) é a corrente máxima de uma célula solar sob condição de curto-circuito, ou seja, $J_{sc} = J_i (V = 0) \approx J_{ph}(V = 0)$ e esta mede o número coletado de portadores de carga por eletrodos. No estado de curto-circuito, estes dois, J_{sc} e J_{ph}, como mostrados anteriormente, apresentam o valor nulo de corrente.

O PCE, do inglês Power Conversion Efficiency, eficiência de conversão de energia, é a relação entre a potência máxima de saída (P_{out}) e a potência da luz

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

incidente (P_{in}), e é calculada a partir do V_{oc}, J_{sc} e fill factor (FF) medidos da seguinte forma:

$$PCE = \frac{Pout}{Pin} = \frac{Voc \times Jsc \times FF}{Pin} \quad (3)$$

E,

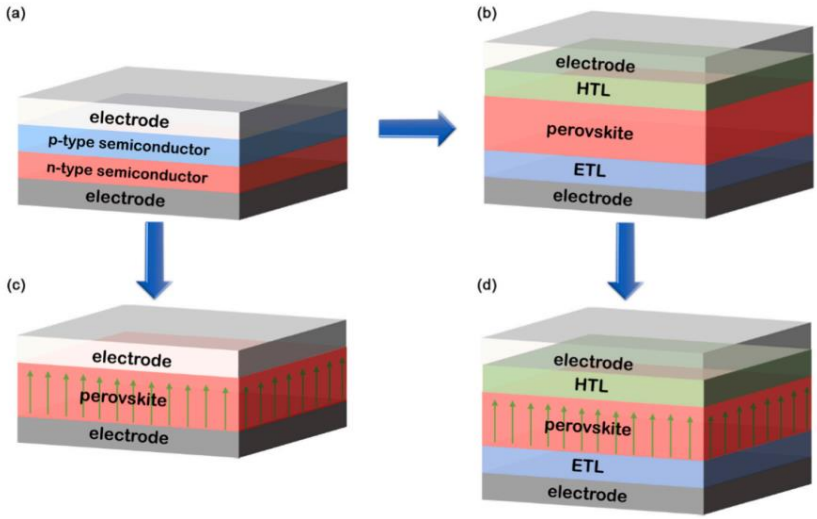
$$FF = \frac{Vmpp \times Jmpp}{Voc \times Jsc} \quad (4)$$

Onde V_{mpp} e J_{mpp} são a tensão e a densidade de corrente no ponto energético mais elevado. Além disso, V_{oc} é a tensão máxima polarizada através do dispositivo na qual as contribuições opostas de J_{ph} e J_d se equilibram, resultando em nenhum fluxo de corrente (Ji = 0) através do dispositivo sob iluminação e $V_{oc} = V(J_i = 0)$ [25].

Além disso, tem-se as camadas ETL, camada transportadora de elétrons do inglês (electron transport layer) e a HTL camada transportadora de lacunas (hole transport layer) (figura 6). Nesta figura tem-se uma clara visão do da diferença entre uma célula comum de silício que é formada basicamente dos eletrodos (electrode em inglês) e uma célula de perovskita (perovskite em inglês). Onde na célula convencional a zona de difusão é somente a zona de contato entre os semicondutores tipo p (p-type semiconductor) e o tipo n (n-type semiconductor) [25].

Figura 6: Imagem (a) mostra uma estrutura convencional de painéis de sílicio, e (b), (c) e (d) a introdução da perovskita.

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06



Fonte: (LI, H. 2021)

Ao incluir a perovskita, em vez de haver somente 2 semicondutores, passou-se a ter um material intermediário comportando-se perfeitamente como uma zona de grande fluxo de elétron e buraco de forma ordenada e em grande escala. Onde o material do tipo p passou a ser chamado de zona de transporte de buraco ou lacunas (HTL), e o material do tipo n de zona de transporte de elétron (ETL) [25].

3.4 FILMES FINOS

Para preparar o filme de perovskita híbrida, geralmente, existem quatro métodos, o primeiro método, o processamento por solução, que envolve diretamente o revestimento por rotação muito conhecido com spin coating [12]. O segundo método, deposição de vapor a vácuo, conhecido como vacum vapor deposition (VVD), o terceiro método é a técnica de deposição em duas etapas, two-step deposition (TSD) [26, 27] e o quarto método, o método de padronização de filme fino. O revestimento por rotação em uma etapa é o método mais amplamente utilizado para preparar as células solares, mas é difícil controlar as propriedades do filme, incluindo espessura, uniformidade e morfologia. Além disso, para a parte orgânica, quanto mais longas forem as cadeias orgânicas, mais difícil será encontrar um bom solvente [27].

Para a parte inorgânica, as técnicas de solvente sempre encontram alguns problemas, devido à solubilidade, à forte coordenação do solvente ou à estabilidade do estado de valência do metal. Na deposição de revestimento giratório de uma etapa,

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

o solvente também precisa dissolver tanto a parte orgânica quanto a inorgânica. A evaporação a vácuo é considerada uma boa técnica para o crescimento de filmes finos orientados de perovskitas em camadas com um controle preciso das propriedades do filme [27].

3.4.1 Revestimento por rotação (spin coating)

A fabricação do filme de perovskita é crucial para a cristalinidade e a performance da célula, demandando um controle meticuloso das condições climáticas, dos reagentes utilizados, do método de deposição, da temperatura e do tempo de secagem, bem como dos aditivos utilizados [12].

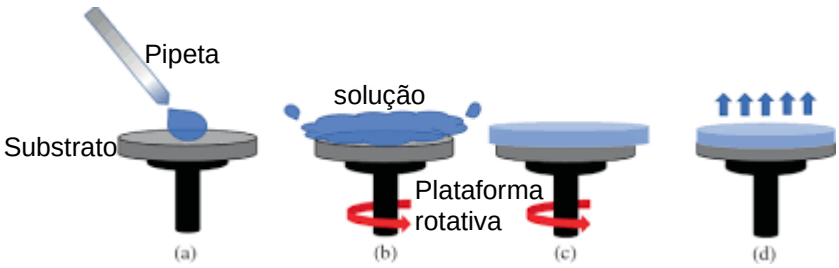
O processamento por solução que depende essencialmente do revestimento por rotação é o mais comum e econômico, podendo ser realizado por meio de duas abordagens: O método de uma etapa e o de duas etapas sequenciais.

- No método de uma etapa, uma solução pré-misturada é aplicada diretamente sobre o substrato posicionado em uma plataforma giratória. O movimento de rotação da plataforma exerce uma força tangencial à solução, fazendo com que ela se espalhe sobre o substrato, resultando em uma camada muito fina. Por essa razão, esse processo é conhecido como revestimento por rotação, ou "spin coating".

- No método de duas etapas, primeiro é depositado a solução de perovskita sobre um substrato e depois ele é mergulhado em uma solução específica, o que melhora sua integração na camada porosa do substrato, somente após esta etapa que é aplica o “spin coating”.

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

Figura 7: Diferentes etapas no processo de revestimento por rotação (spin coating)



Fonte: (ALAMI, A. H. et al. 2023)

Embora o método de duas etapas tenha produzido células com maior eficiência de conversão de energia (PCE), o método de uma etapa é preferido por sua simplicidade e maior controle sobre a cristalinidade e a morfologia do filme. Assim, ele apresenta um grande potencial para melhorar a eficiência dessas células no futuro [27].

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A biblioteca on-line Wiley, do seu nome original Wiley online library, foi a principal ferramenta usada para se conseguir os dados dos parâmetros de controle de teste das células solares de filmes finos de perovskita de acordo com a norma ASTM G-173-03. Esta é uma norma internacional que define o espectro luminoso adotado mundialmente como padrão para ensaios de dispositivos fotovoltaicos.

Os parâmetros levantados foram a eficiência (em %) da célula de filmes finos de perovskita, a área total em centímetro quadrado (cm^2), a tensão máxima polarizada (V_{oc}), o fill factor (em %) e o centro de pesquisa que realizou o teste junto com o ano do teste.

Foram usados os textos dos anos a seguir, 2013, 2014, 2015, 2016, 2022 e 2024. Onde foi feita uma comparação entre a célula de silício cristalino da primeira geração, o arseneto de gálio (GaAs) e o CIGS (cobre-índio-Gálio-Selênio) células da segunda geração e a célula foco deste estudo, que é a célula de filmes finos de perovskita da terceira geração.

Os dados dos parâmetros levantados foram apresentados em uma tabela para cada um destes anos citados anteriormente. Na sequência, foi apresentada outra tabela em que aparece a evolução de todas as células solares ao longo desses 11 anos.

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

5 RESULTADOS

Na última década as células de primeira e segunda geração tem evoluído muito pouco, o que traz a necessidade de inovação no setor de produção de energia por painel solar fotovoltaico. Os resultados da busca bibliográfica mostram que as estruturas de perovskita combinadas com a camada de transporte de elétrons e de lacunas certas tem trazido resultados muito interessantes.

Logo após a descoberta da propriedade da estrutura perovskita ser usada como material semicondutor para a aplicação em painéis fotovoltaicas, começaram-se as pesquisas para se conseguir a melhor combinação para uma maior eficiência. Porém, nos primeiros anos de pesquisa, o valor da eficiência não passou dos 11,9 %. Enquanto células de silício cristalino ultrapassava 25% e as de GaAs os 28% de eficiência conforme mostrado na tabela 3 abaixo.

Tabela 3: Eficiências confirmadas de células solares sob o espectro estipulado pela ASTM G-173-03 global, (1000 W/m2) a 25 °C. (Texto de 2013 modificado, [28])

Classificação	Eficiência (%)	Área (cm²)	Voc (V)	J_{sc} (mA/cm²)	Fill Factor (%)	Local do teste (data)
Silício cristalino	25,0 ±0,5	4,0	0,706	42,7	82,8	Sandia (03/1999)
GaAs (filmes finos)	28,8 ±0,9	0,9927	1,122	29,68	86,5	NREL (05/2012)
CIGS	19,8 ±0,6	0,9974	0,716	34,91	79,2	NREL (11/2013)
Perovskita (filmes finos)	11,9 ±0,4	1,005	0,744	22,47	71,2	AIST (09/2012)

Fonte: (GREEN, M. A ; et al. 2013)

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

Como mostrado na tabela a seguir, houve avanços pouco significativos nas outras células da terceira geração, porém, não foi apresentado progresso nas células de filmes finos de perovskita, conforme mostrado na tabela 4, a seguir.

Tabela 4: Eficiências confirmadas de células solares sob o espectro estipulado pela ASTM G-173-03 global, (1000 W/m2) a 25 °C. (Texto de 2014, modificado [29])

Classificação	Eficiência (%)	Área (cm²)	Voc (V)	J_{sc} (mA/cm²)	Fill Factor (%)	Local do teste (data)
Silício cristalino	25,6 ±0,5	143,70	0,740	41,8	82,7	AIST (02/2014)
GaAs (filmes finos)	28,8 ±0,9	0,9927	1,122	29,68	86,5	NREL (05/2012)
CIGS	20,5 ±0,6	0,9882	0,752	35,3	77,2	NREL (03/2014)
Perovskita (filmes finos)	11,9 ±0,4	1,005	0,744	22,47	71,2	AIST (09/2012)

Fonte: (GREEN, M. A ; et al. 2014)

A maioria das eficiências de conversão relatadas para células solares de perovskita foi obtida com células pequenas (cerca de 0,1 cm²), resultando em erros de medição significativos. Um exemplo foi uma eficiência de 20,1% registrada anteriormente, mas a precisão foi comprometida pelo tamanho reduzido da célula (0,0955 cm²), e o método de medição não foi detalhado. Para promover avanços consistentes na pesquisa, é essencial que essas eficiências sejam verificadas por centros de teste públicos internacionais, garantindo dados mais confiáveis.

Um grupo de pesquisa conseguiu aumentar a eficiência e a reprodutibilidade das células solares de perovskita ao controlar a morfologia da camada ativa por meio de um novo método de fabricação. Como o material convencional de transporte de carga é hidrofílico, a eficiência das células se deteriorava rapidamente. Para resolver isso, o grupo desenvolveu um material hidrofóbico com alta mobilidade de carga, melhorando a estabilidade das células. Com esses avanços, expandiram o tamanho da célula para mais de 1 cm² e alcançaram 15% de eficiência (tabela 5), certificada por um centro de teste internacional pela

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

primeira vez no mundo. O objetivo agora é continuar aprimorando a eficiência das células, desenvolvendo novos materiais de transporte de carga e controlando melhor as interfaces internas.

Tabela 5: Eficiências confirmadas de células solares sob o espectro estipulado pela ASTM G-173-03 global, (1000 W/m2) a 25 °C. (Texto de 2015 modificado, [30])

Classificação	Eficiência (%)	Área (cm²)	Voc (V)	J_{sc} (mA/cm²)	Fill Factor (%)	Local do teste (data)
Silício cristalino	25,6 ±0,5	143,70	0,740	41,8	82,7	AIST (02/2014)
GaAs (filmes finos)	28,8 ±0,9	0,9927	1,122	29,68	86,5	NREL (05/2012)
CIGS	21,0 ±0,6	0,9927	0,757	35,70	77,6	FhG-ISE (04/2014)
Perovskita (filmes finos)	15,6 ±0,6	1,020	1,074	19,29	75,1	Newport (11/2014)

Fonte : (GREEN, M. A ; et al. 2015)

A perovskita de iodeto de chumbo com formamidínio (FAPbI3) possui uma bandgap que permite maior absorção do espectro solar em comparação com a perovskita de iodeto de chumbo com metilamônio ($MAPbI_3$). Como as propriedades optoeletrônicas desses filmes estão diretamente relacionadas à sua qualidade, a deposição de filmes densos e uniformes é essencial para a fabricação de células solares de alto desempenho [31].

O estudo feito até a data da publicação deste texto (tabela 6) mostra que uma técnica para depositar filmes de FAPbI3 de alta qualidade, baseada na cristalização por troca intramolecular direta de moléculas de dimetilsulfóxido (DMSO), intercaladas no PbI_2, por iodeto de formamidínio. Esse método produz filmes com orientação cristalográfica preferencial (111), microestruturas densas e grãos grandes, além de superfícies planas e sem resíduos de PbI2. Com essa abordagem, foram fabricadas células solares baseadas em FAPbI3, atingindo uma eficiência máxima de conversão de energia superior a 20% [31].

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

Tabela 6: Eficiências confirmadas de células solares sob o espectro estipulado pela ASTM G-173-03 global, (1000 W/m2) a 25 °C. (Texto de maio 2016, modificado, [32])

Classificação	Eficiência (%)	Área (cm²)	Voc (V)	J_{sc} (mA/cm²)	Fill Factor (%)	Local do teste (data)
Silício cristalino	25,6 ±0,5	143,70	0,740	41,8	82,7	AIST (02/2014)
GaAs (filmes finos)	28,8 ±0,9	0,9927	1,122	29,68	86,5	NREL (05/2012)
CIGS	21,0 ±0,6	0,9927	0,757	35,70	77,6	FhG-ISE (04/2014)
Perovskita (filmes finos)	19,7 ±0,6	0,9917	1,104	24,67	72,3	Newport (03/2016)

Fonte : (GREEN, M. A ; et al. 2016)

Até a data da publicação do texto encontrado na tabela 7, a eficiência máxima certificada das células de filmes finos de perovskita era de 19,9% é inferior à de suas versões rígidas (25,7%), principalmente devido a defeitos nas interfaces dos contatos seletivos de carga. O estudo responsável por desenvolver essa tecnologia mostra uma mistura de moléculas seletivas de buracos, essa mistura foi usada para formar uma camada auto-organizada, conectando a perovskita a um filme de monocristais de óxido de níquel (NiO) processado a baixa temperatura. Essas células feitas a partir de filmes finos mostraram grande durabilidade, mantendo seu desempenho inicial após 10.000 ciclos de flexão [33].

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

Tabela 7: Eficiências confirmadas de células solares sob o espectro estipulado pela ASTM G-173-03 global, (1000 W/m2) a 25 °C. (Texto de outubro 2022, modificado, [34])

Classificação	Eficiência (%)	Área (cm²)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm²)	Fill Factor (%)	Local do teste (data)
Silício cristalino	26,80 ±0,4	274,40	0,7514	41,45	86,1	ISFH (10/2022)
GaAs (filmes finos)	29,10 ±0,6	0,9980	1,1272	29,78	86,7	FhG-ISE (10/2018)
CIGS	23,35 ±0,5	0,9927	0,757	35,70	77,6	FhG-ISE (04/2014)
Perovskita (filmes finos)	25,70 ±0,5	0,0959	1,179	25,80	84,6	NPVM (05/2022)

Fonte : (GREEN, M. A ; et al. 2022)

Registros de pesquisa indicam que já foi alcançada uma eficiência de cerca de 26% nessas células filmes finos de perovskita (tabela 8). No entanto, a comercialização dessas células é limitada pela toxicidade do chumbo (Pb), pela instabilidade dos cátions orgânicos e pela volatilidade estrutural. Diversos materiais inorgânicos, incluindo camadas de transporte de lacunas (HTL) inorgânicas, foram propostos e desenvolvidos recentemente para reduzir a presença de componentes orgânicos na estrutura do dispositivo. Uma das alternativas para se alcançar uma eficiência acima de 26% é aplicação de filmes finos de MoO_3 como camada de transporte de lacuna. Está aplicação se faz pelo método revestimento por rotação [35].

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

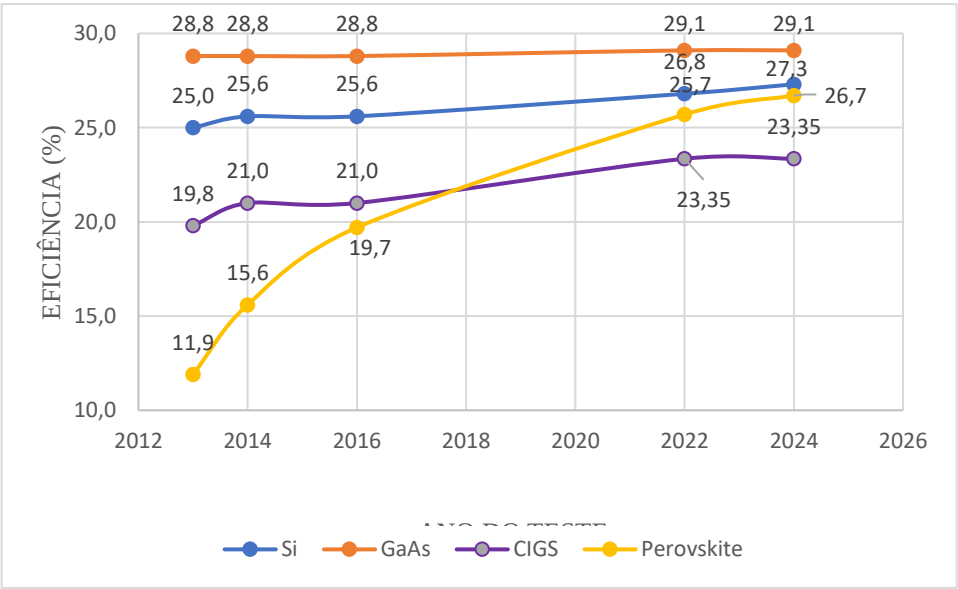
Tabela 8: Eficiências confirmadas de células solares sob o espectro estipulado pela ASTM G-173-03 global, (1000 W/m2) a 25 °C. (Texto de julho 2024, modificado, [36])

Classificação	Eficiência (%)	Área (cm²)	Voc (V)	Jsc (mA/cm²)	Fill Factor (%)	Local do teste (data)
Silício cristalino	27,3 ±0,4	243,1	0,7434	42,60	86,2	ISFH (12/2023)
GaAs (filmes finos)	29,10 ±0,6	0,9980	1,1272	29,78	86,7	FhG-ISE (10/2018)
CIGS	23,35 ±0,5	1,043	0,734	39,58	80,4	AIST (11/2018)
Perovskita (filmes finos)	26,7 ±0,6	0,0519	1,193	26,49	84,5	NPVM (05/2024)

Fonte : (GREEN, M. A ; et al. 2024)

A figura 8 mostra de forma mais clara a evolução da eficiência das células da terceira geração abordas nas tabelas anteriores.

Figura 8: Gráfico da evolução da eficiência das células fotovoltaicas de Si, GaAs, CIGS, e filmes finos de perovskita.



Fontes: ([28], [29], [30], [32], [34], [36])

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

O gráfico mostra um progresso muito rápido dos filmes finos de perovskita na produção de painéis fotovoltaicos, passando de 11,9% em 2013 para 26,7 % em 2024.

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

6 CONCLUSÕES

A fabricação de painéis solares de filmes finos de perovskita é uma das inovações mais promissoras na área de energia renovável, proporcionando uma opção viável e sustentável em relação às tecnologias convencionais de células solares. A produção desses painéis requer a síntese de materiais com características fotovoltaicas exclusivas, que podem ser obtidos a partir de componentes disponíveis e de custo reduzido. No entanto, mesmo com os benefícios em eficiência e custo e flexibilidade, ainda há obstáculos a serem vencidos, como a estabilidade a longo prazo e a toxicidade de alguns materiais empregados, como o chumbo (Pb).

Concluindo, embora a eficiência das células de filmes finos de perovskita não tenha ultrapassado a eficiência das células de Si, GaAs e CIGS, se considerar a tendencia do rápido progresso nesta classe de materiais, pode-se dizer que é uma classe com muito potencial de crescimento. O progresso na tecnologia de fabricação de painéis solares de perovskita de filmes tinos tem potencial para não só revolucionar o setor de energia solar, mas também ter um impacto significativo na mudança global para fontes de energia mais limpas e sustentáveis. Portanto, os painéis de filmes finos de perovskita podem ter um papel fundamental na construção de um futuro energético mais sustentável e de fácil acesso.

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

7 REFERÊNCIAS BIBLIGRÁFICAS

[1] **JEFFREY, H. et al.** *Electricity Generation Baseline Report*. National Renewable Energy Laboratory (NREL), janeiro 2017.

[2] **GUIMARÃES, A. C.** *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos*. Rio de Janeiro: CEPEL, 2004.

[3] Xu, Z; et al. Advancing perovskite solar cell commercialization: Bridging materials, vacuum deposition, and AI-assisted automation. *Nano Express Materials*, v. 3, p100-103, dezembro de 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2023.100103.

[4] **REN21.** *Renewables 2021 Global Status Report*. Paris: Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2021.

[5] **REN21.** *Renewables 2014 Global Status Report*. Paris: Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2014.

[6] **BRASIL. Ministério de Minas e Energia; Empresa de Pesquisa Energética.** *Balanço Energético Nacional - Brazilian Energy Balance*. Brasília: MME/EPE, 2021.

[7] REN21. **Renewables 2020 Global Status Report**. Paris: Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2020.

[8] **IRENA.** *Global Energy Transformation: A Road Map to 2050*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2018.

[9] **IRENA.** *Global Energy Transformation: A Road Map to 2050*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2019.

[10] **ABSOLAR; ANEEL.** *Solar Photovoltaic Energy in Brazil: ABSOLAR's Infographic*. 28. ed. Fevereiro 2010.

[11] **INTERNATIONAL ENERGY AGENCY.** *World Energy Outlook*. Paris, Abril 2018.

[12] ROY, P. et al. **PEROVSKITE SOLAR CELLS: A REVIEW OF THE RECENT ADVANCES.** MDPI, 12,1089, 24, 2022.

[13] SPROUL, A ; **UNDERSTANDING THE P-N JUNCTION.** Resource for the Secondary Science Teacher, UNSW. Disponível em:

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

https://www.unsw.edu.au/content/dam/pdfs/unsw-adobe-websites/science/faculty/2023-08-UNSW_Understanding_the_p-n_Junction.pdf. Acesso em 27 de maio de 2024.

[14] WÜRFEL, P. **SOLAR CELL OPERATIONAL PRINCIPLES,** Wiley-WCH , 2005 Disponível em https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/Solar-Cells-R4-CH4_Solar_cell_operational_principles.pdf. Acesso em: 29 de maio de 2024.

[15] **CHEN, J.** et al. Hole (donor) and electron (acceptor) transporting organic semiconductors for bulk-heterojunction solar cells. *EnergyChem*, [S. l.]: Elsevier. Disponível em: www.journals.elsevier.com/energychem. Acesso em: 13 out. 2024.

[16] **WANG, Z.** et al. Crystal surface heat transfer during the growth of 300mm monocrystalline silicon by the Czochralski process. *National Engineering Research Center of Vacuum Metallurgy, Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology*, Kunming, China. Disponível em: www.kmust.edu.cn. Acesso em: 02 junho 2024.

[17] **K. KIDA**; **T. TAISHI**. Effective thermal conductivity of poly-silicon chunks and its size dependence in a melting process of silicon Czochralski crystal growth: Part 1. Temperature measurements. *Journal of Crystal Growth*, v. 636, 15 jun. 2024, p. 127704. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2024.127704.

[18] **ARUN, M.** Types of solar cells and its applications. *International Journal of Scientific Development and Research (IJSDR)*, v. 4, n. 2, p. 260, fev. 2019. ISSN 2455-2631.

[19] **SHAH, N.; SHAH, A. A.; LEUNG, P. K.; KHAN, S.; SUN, K.; ZHU, X.; LIAO, Q.** A review of third generation solar cells. *Processes*, [s.l.], v. 9, n. 1, p. 1-20, jan. 2021. DOI: 10.3390/pr9010001.

[20] **NREL.** *Best Research-Cell Efficiencies*. [s.l.], 2019. Disponível em: https://www.nrel.gov/. Acesso em: 20 de junho de 2024.

[21] **AHMAD, S.; KAZIM, S.; GRÄTZEL, M.** *Perovskite Solar Cells: Materials, Processes, and Devices*. Weinheim: Wiley-VCH, 2022. ISBN 978-3-527-34715-5.

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

[22] **CLABEL HUAMAÑAN, J. L.; GARCIA RIVERA, V. A.** *Perovskite Ceramics: Recent Advances and Emerging Applications*. Amsterdam: Elsevier, 2023. ISBN 978-0-323-90586-2.

[23] ORTEGA-SAN-MARTÍN, L. et al. Combustion synthesis and characterization of Ln1−xMxCr0.9Ni0.1O3 (Ln = La and/or Nd; M = Sr and/or Ca; x ≤ 0.25) perovskites for SOFCs anodes. *Ceramics International*, v. 44, n. 2, p. 1801-1810, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.10.182.

[24] **PAN, L.; ZHU, G.** *Perovskite Materials: Synthesis, Characterisation, Properties, and Applications*. [s.l.]: ExLi4EvA, 2016. ISBN 978-953-51-2245-7.

[25] **LI, H. et al.** Photoferroelectric perovskite solar cells: Principles, advances and insights. *Energy & Environmental Science*, [s.l.], v. 14, n. 3, p. 1580-1601, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1039/D0EE02446C. Acesso em 1 de julho 2024.

[26] **ALAMI, A. H.** et al. Third-Generation Photovoltaic Cell Manufacturing Processes. In: *PV Technology and Manufacturing*. [S. l.]: SpringerLink, 2023. p. 155-174. Disponível em: https://link.springer.com. Acesso em: 1 de julho 2024.

[27] **BI, D.** et al. Using a two-step deposition technique to prepare perovskite ($CH_3NH_3PbI_3$) for thin film solar cells based on ZrO_2 and TiO_2 mesostructures. *RSC Advances*, issue 41, 2013.

[28] **GREEN, M. A.** et al. Solar cell efficiency tables (version 43). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 22, p. 1–9, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1002/pip.2456. Acesso em 5 julho 2024.

[29] **GREEN, M. A.** et al. Solar cell efficiency tables (Version 45). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 23, p. 1–9, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1002/pip.2573. Acesso em 10 julho 2024.

[30] **GREEN, M. A.** et al. Solar cell efficiency tables (version 47). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 24, p. 3–11, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1002/pip.2728. Acesso em 10 julho 2024.

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06

[31] **YANG, Woon Seok** *et al.* High-performance photovoltaic perovskite layers fabricated through intramolecular exchange. *Science*, v. 348, n. 6240, p. 1234-1237, 21 maio 2015. DOI: 10.1126/science.aaa9272.

[32] **GREEN, M. A.** et al. Solar cell efficiency tables (version 48). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 24, p. 905–913, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1002/pip.2756. Acesso em 12 julho 2024.

[33] LI, L ; et al. Flexible all-perovskite tandem solar cells approaching 25% efficiency with molecule-bridged hole-selective contact. Nature Energy, [S.l.], v. 5, n. 5, p. 401-409, 2022. DOI: 10.1038/s41560-022-01045-2. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s41560-022-01045-2. Acesso em: 12 julho 2024.

[34] **GREEN, M. A.; et al.** Solar cell efficiency tables (Version 60). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, [s.l.], v. 30, n. 7, p. 649-659, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1002/pip.3595. Acesso em 13 de julho 2024.

[35] **ISLAM, M. A.** et al. Spin-coated high mobility MoO_3 thin film for designing highly efficient lead-free perovskite solar cells. *Ceramics International*, v. 50, n. 13, p. 23847-23854, 2024. DOI: 10.1016/j.ceramint.2024.04.111.

[36] **GREEN, M. A.; et al.** Solar cell efficiency tables (Version 64). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, [s.l.], v. 32, n. 7, p. 649-659, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1002/pip.3831. Acesso em 5 de agosto de 2024.

Versão Final Homologada
24/10/2024 14:06