

Desenvolvimento de Métodos Sustentáveis para a Reciclagem de Células Solares de Perovskita Utilizando Solventes Verdes

Palavras-Chave: células solares de perovskita; solventes verdes; reciclagem; química verde; energia solar.

Vitor Hugo Soares do Nascimento, IQ-UNICAMP

Prof^a. Dr^a. Ana Flávia Nogueira, IQ-UNICAMP

INTRODUÇÃO:

As células solares de perovskita (PSCs, do inglês *perovskite solar cells*) têm emergido como uma tecnologia de ponta na geração de energia solar, destacando-se por seu custo de produção relativamente baixo e alta eficiência de conversão energética, que pode chegar a até 26,1%¹. Em um mundo que corre contra o tempo para frear as mudanças climáticas e atingir o sétimo dos objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU, as PSCs são uma promessa interessante.

Uma PSC do tipo p-i-n é composta por várias camadas dispostas em sequência vertical, incluindo um substrato de vidro recoberto com uma camada de óxido condutor transparente (TCO, do inglês *transparent conductive oxide*), uma camada fotoativa de perovskita, uma camada transportadora de buracos (HTL, do inglês *hole transport layer*) feita de uma monocamada auto-organizada (SAM, do inglês *self-assembly monolayer*) e uma camada transportadora de elétrons (ETL, do inglês *electron transport layer*) composta de PCBM/BCP. O circuito é concluído com uma camada metálica inerte, como prata ou ouro.

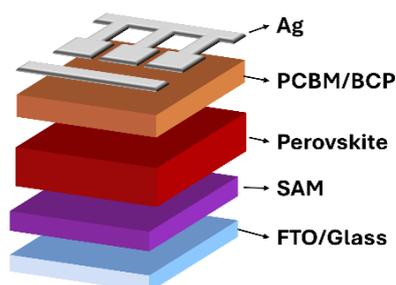


Figura 1: Esquema geral de uma PSC.

Apesar das vantagens, as PSCs apresentam desafios significativos, especialmente em relação à durabilidade que somado aos impactos ambientais de seus componentes, em particular o chumbo, constituem uma grande barreira para o avanço da tecnologia². O descarte inadequado das PSCs pode resultar em contaminação ambiental e riscos à saúde humana³. A reciclagem dessas células com solventes verdes surge como uma solução para o impasse atual, permitindo a recuperação de materiais valiosos, garantindo uma economia circular e reduzindo o impacto ambiental.

METODOLOGIA:

1. Iniciamos o projeto com uma pesquisa na literatura de solventes verdes com propriedades semelhantes às dos usados usualmente (DMF e DMSO), identificando nesse processo a gama-butirolactona (GBL).
2. Testes iniciais em filmes de perovskita mostraram que o GBL pode solubilizar o cristal em partículas intermediárias, evidenciado pelo efeito Tyndall e por análise em UV-Vis, um sinal positivo para a etapa futura de montagem da célula reciclada.
3. Depois, ao trabalhar com a célula completa na etapa de delaminação, foi possível remover a camada do eletrodo (prata ou ouro, usualmente) com remoção física utilizando fitas, devido à pequena espessura dessa camada (aproximadamente 70 nm).
4. O ETL, camada que possui afinidade com solventes de baixa polaridade, pode ser dissolvido em clorobenzeno (CB) sem remover a perovskita.
5. Depois, replicando o processo de solubilização em GBL, removemos a camada fotoativa, deixando apenas o HTL, o TCO e o substrato.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Foram analisados diversos solventes em termos de capacidade de dissolução e reuso, além de analisarmos a toxicidade e a capacidade de formar novos filmes (levando em conta a viscosidade e a temperatura de ebulição). A gama-butirolactona (GBL) se mostrou um candidato promissor e prosseguimos nos testes, usando células feitas por outros integrantes do grupo de pesquisa (LNES). Os outros solventes como DMSO foram eficazes em solubilizar os filmes de perovskita, mas não apresentaram cor em sua solução, indicando que a estrutura da perovskita é completamente dissociada (Cs^+ , FA^+ , Pb^{2+} e I^-). Por outro lado, o GBL formou uma solução amarelada e dispersão quando alvejada com um laser (efeito *Tyndall*), indicando que estruturas maiores estão presentes em suspensão espalhando a luz incidida, diferentemente dos íons dissociados no caso do DMSO (Figura 2a). Os espectros de UV-Vis (Figura 2b) também suportam essa observação, onde nota-se que para DMSO não há nenhuma banda de absorção, porém com a GBL observamos pelo menos duas bandas na região do UV, provavelmente associadas à núcleos de PbI_x .

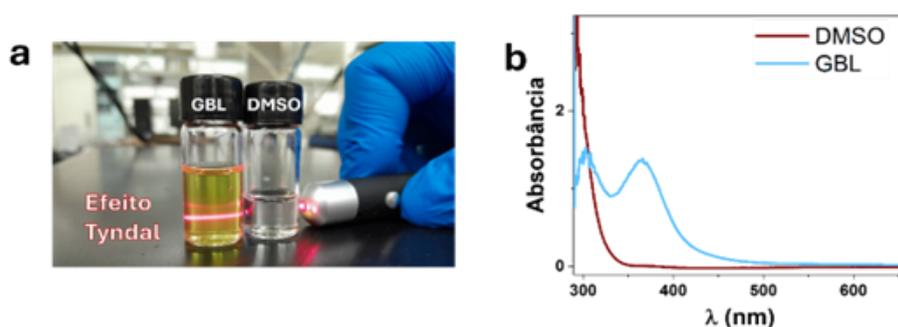


Figura 2: Soluções resultantes dos filmes de perovskita (a) e os respectivos espectros UV-Vis (b) utilizando DMSO ou GBL.

Depois, começamos os testes no âmbito da delaminação ortogonal das diversas camadas das células solares. Inicialmente, começamos removendo o eletrodo por meio de remoção com fitas adesivas, restando as demais camadas. Logo após, a ETL foi dissolvida em clorobenzeno, por sua afinidade com compostos de baixa polaridade. Então, a perovskita exposta pode ser solubilizada em GBL, havendo uma chance dessa solução conter uma quantidade de SAM.

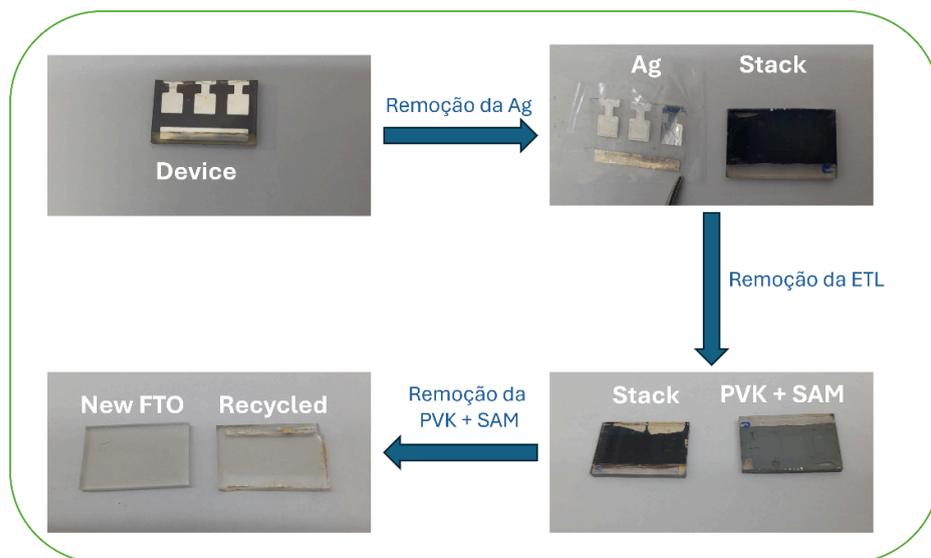


Figura 3: Esquema de delaminação dos dispositivos e separação de componentes.

Ao fim do processo os componentes foram separados com efetividade, sendo a camada de transporte de elétrons (ETL) dissolvida em clorobenzeno, enquanto a perovskita e a camada de transporte de buracos (HTL) foram solubilizadas em GBL. Acreditamos que a GBL, devido à sua capacidade de formar intermediários, apresenta uma grande vantagem para a reciclagem de filmes de perovskita por não haver a necessidade de precipitar os sais, facilitando o processo. Além disso, a transmitância do FTO reciclado foi próxima à do FTO novo, mostrando que a reciclagem foi eficaz.

CONCLUSÃO:

Por mais que o desenvolvimento de células solares de perovskita enfrente problemas como baixa estabilidade, resíduos gerados e a toxicidade destes em sua trajetória, a reciclagem das suas diferentes camadas pode ser uma eficaz alternativa para diminuir os impactos da tecnologia.

O projeto de reciclagem de células solares de perovskita apresentou resultados promissores. Conseguimos identificar solventes verdes capazes de dissolver efetivamente as diferentes camadas das PSCs, com destaque para a γ -butirolactona, que demonstrou um comportamento interessante ao formar intermediários de PVK em suspensão, possivelmente facilitando a montagem de dispositivos reciclados. Além disso, a recuperação do vidro condutor também foi alcançada, sem perder as propriedades originais de transmitância e condutividade, o que valida o método desenvolvido e garante uma importante relevância no

âmbito econômico da tecnologia, visto que o substrato junto do TCO constituem mais de 50% do custo de uma PSC³.

Em resumo, os métodos sustentáveis de reciclagem estabelecidos por este projeto têm o potencial de ser implementados em larga escala, beneficiando tanto o meio ambiente quanto a indústria de energia solar. O sucesso do projeto reforça a importância de continuar investindo em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias sustentáveis, visando um futuro mais verde, onde nossa matriz energética será livre de emissões de carbono.

BIBLIOGRAFIA

- 1) NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. Interactive Best Research-Cell Efficiency Chart. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/pv/interactive-cell-efficiency.html>>.
- 2) Yaoguang Rong et al. ,Challenges for commercializing perovskite solar cells. Science361,eaat8235(2018).DOI:10.1126/science.aat8235
- 3) Torrence, Christa E., et al. "Environmental and Health Risks of Perovskite Solar Modules: Case for Better Test Standards and Risk Mitigation Solutions." IScience, vol. 0, no. 0, 16 Dec. 2022, [www.cell.com/iscience/fulltext/S2589-0042\(22\)02080-6](http://www.cell.com/iscience/fulltext/S2589-0042(22)02080-6), <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.105807>.
- 4) Cai, Molang, et al. "Cost-Performance Analysis of Perovskite Solar Modules." Advanced Science, vol. 4, no. 1, 15 Sept. 2016, p. 1600269, <https://doi.org/10.1002/advs.201600269>.