

# Aumento da eficiência de células solares usando materiais vítreos luminescentes como cobertura

Guilherme R. da S. Mattos<sup>a</sup>, Olga C. Vilela<sup>b</sup>, Luis A. Gómez Malagón<sup>c</sup>, Luciana R. P. Kassab<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

<sup>b</sup>Universidade Federal de Pernambuco

<sup>c</sup>Instituto de Inovação Tecnológica da Universidade de Pernambuco

<sup>d</sup>Faculdade de Tecnologia de São Paulo - Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza

## I. INTRODUÇÃO

Novos materiais vítreos têm contribuído significativamente para o desenvolvimento de instrumentos e dispositivos fundamentais para o avanço de diversas áreas da ciência e da engenharia. As descobertas da nanotecnologia também têm desempenhado papel importante em relação às fontes de energia renováveis. Devido à ausência de uma combinação perfeita entre o espectro solar e a capacidade de absorção das células fotovoltaicas (Figura 1), diversos estudos têm sido propostos com o objetivo de reduzir as perdas de eficiência decorrentes deste efeito. Uma abordagem promissora consiste no uso de materiais luminescentes nos quais fótons de alta energia são convertidos em fótons de menor energia (processo de conversão descendente de luz). Esse mecanismo pode resultar no aumento da eficiência das células solares quando materiais, como o vidro

dopado com íons de terras-raras (TRs), são empregados como cobertura sobre o dispositivo fotovoltaico [1–3].

Um fator importante no aumento da luminescência de íons de TRs é a escolha adequada da matriz hospedeira, que deve ter alta transmitância e baixa energia de fônons para reduzir processos por decaimento não radiativo. Dentre os materiais amplamente explorados na literatura para hospedar tanto íons de TRs quanto nanopartículas (NPs) de Au e Ag, destacam-se os vidros germanato e telurito. Estes vidros exibem características favoráveis, como baixa energia de fônon ( $\sim 700 \text{ cm}^{-1}$ ), ampla janela de transmissão (350–5000 nm), alto índice de refração (1,8–2,3), além de boa estabilidade química, térmica e mecânica, bem como excelente solubilidade de íons de TRs [1–3].

Devido a estas características, esses materiais têm se tornado candidatos promissores para serem usados como camada de cobertura

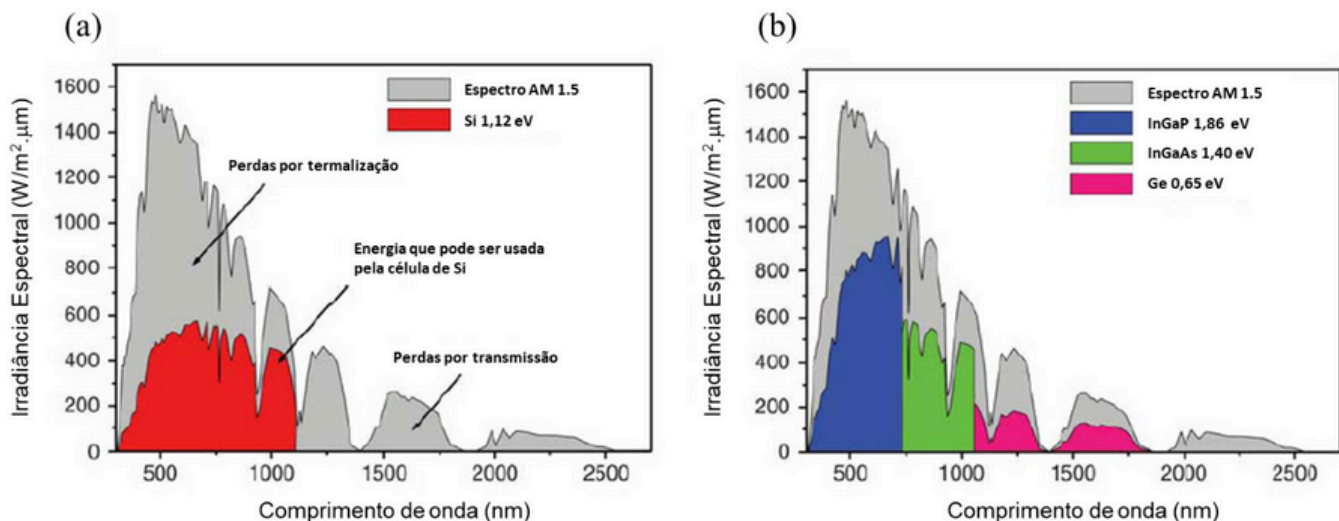


Fig. 1. Espectro solar AM1.5 e exemplos de resposta espectral da (a) célula solar de Si e da (b) célula solar de multijunção [4].

ra em células solares. Além disso, a combinação de íons de TRs com os efeitos plasmônicos de NPs metálicas, como o Au e Ag, pode aumentar significativamente a luminescência abrindo novas perspectivas para o desenvolvimento de sistemas fotovoltaicos ainda mais eficientes.

## **Materiais e Métodos**

A preparação de amostras de vidros com características especiais exige o desenvolvimento de uma metodologia adequada. Mostraremos aqui os resultados de vidros germanato e teluritos, produzidos usando a conhecida técnica de fusão seguida de resfriamento rápido, com as seguintes composições (em % de peso): 40,0GeO<sub>2</sub>- 60,0PbO (GP) [1] e 38,6GeO<sub>2</sub> - 57,6PbO-3,8Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (GPA) [2], e vidros telurito com composição de 33,34 TeO<sub>2</sub>-33,33GeO<sub>2</sub>- 33,33PbO (TGP) [3]. Para a introdução dos íons de Eu<sup>3+</sup>, optou-se pelo uso do Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, enquanto que, para incorporar as NPs de Au e Ag, foram utilizados os reagentes Au<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e AgNO<sub>3</sub>, respectivamente. Assim sendo, os vidros GP foram dopados com 1,0% de Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 0,1% de Au<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, os vidros GPA com 1,0% de Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 0,5% de AgNO<sub>3</sub>, e, por fim, os vidros TGP com 1,0/5,0% de Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 0,5% de AgNO<sub>3</sub>. Os reagentes foram pesados em balança analítica e colocados em um cadinho de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (amostras GP) ou de Pt pura (amostras GPA e TGP). Em seguida, o cadinho contendo os reagentes foi colocado em forno tipo mufla e mantido durante o tempo necessário para a fusão e homogeneização dos reagentes: GP e GPA à 1200°C por 1h e TGP à 1050°C por 1h. O material fundido foi vertido rapidamente em um molde de latão previamente aquecido e então levado ao forno tipo mufla para ser submetido a tratamento térmico: GP e GPA à 420°C por 2 h e TGP à 380°C por 2h. Este tratamento térmico deve ser realizado para minimizar tensões internas na amostra, garantindo que

o vidro fique menos frágil e menos susceptível a trincas. As amostras foram submetidas ao processo de corte e polimento até alcançarem as dimensões aproximadas de 10,00 mm de comprimento, 4,00 mm de largura e 2,50 mm de espessura. Por fim, foram realizados tratamentos térmicos adicionais (12 h) somente para as amostras TGP preparadas com AgNO<sub>3</sub>. Cabe ressaltar que para todas as amostras preparadas com AgNO<sub>3</sub> e Au<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a nucleação das NPs metálicas se deu por redução térmica durante o tratamento térmico. Um microscópio eletrônico de transmissão (MET) de 200 kV foi usado para corroborar a nucleação das NPs metálicas de Au e Ag. As medidas de luminescência foram realizadas com arranjo experimental adequado (laser de diodo CW operando a 405 nm, filtros, monocromador e detector). Foram feitas caracterizações elétricas com dois tipos de dispositivos fotovoltaicos: para o grupo de amostras GP e TGP foi usada uma célula solar de Si policristalino e para os vidros GPA foi utilizada uma célula solar de multijunção (InGaP-InGaAs-Ge). A eficiência das células solares, com e sem a cobertura vítrea, foi determinada a partir dos resultados de corrente em função da tensão (I-V) obtidas usando simulador solar (LCS-100 Newport) com irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup> (AM1.5). Entre a célula solar e o vidro foi aplicada uma camada de óleo de imersão para microscopia ótica (índice de refração n=1,51) a fim de melhorar o acoplamento ótico do sistema. Este procedimento foi utilizado para reduzir as perdas por reflexão na interface entre a célula solar e o vidro. A Figura 2 apresenta a metodologia usada com a amostra vítrea posicionada sobre a célula solar. Todas as medidas foram realizadas à temperatura ambiente (25°C).

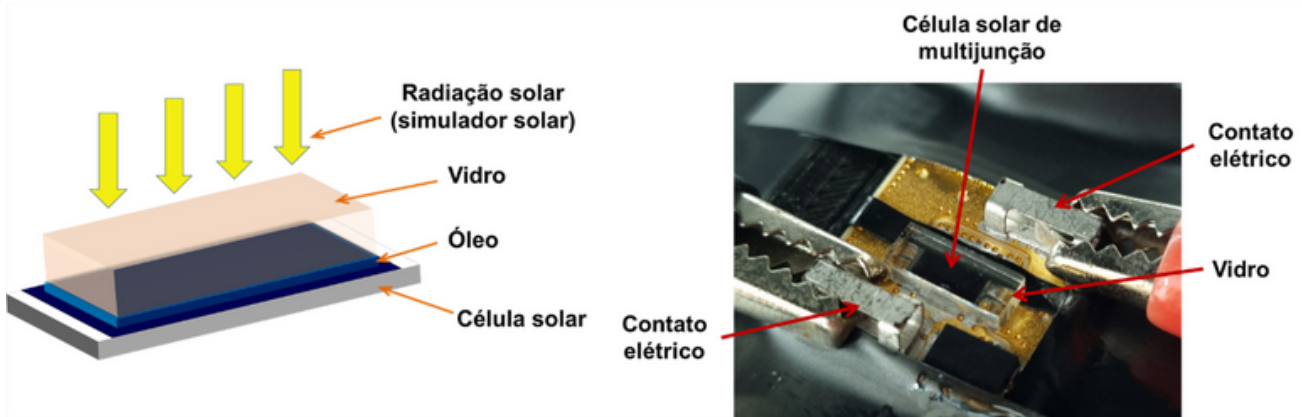


Figura 2 - Posicionamento da amostra vítrea sobre a célula solar.

## Resultados

No grupo de vidros GP, o maior aumento de eficiência ( $\Delta\eta$ ) da célula solar de Si foi de 18,4%, o que ocorreu usando como cobertura a amostra dopada com 1,0% de  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  e 0,1% de  $\text{Au}_2\text{O}_3$  (em % de peso). Este  $\Delta\eta$  foi atribuído principalmente ao maior aumento de luminescência, sobretudo da transição  $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_2$  (~70%), que foi assistido pelos efeitos plasmônicos das NPs de Au, como pode ser visto na Figura 3a.

A Figura 3b mostra o comportamento da luminescência das amostras de TGP e a influência do aumento da concentração de  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  e das NPs de Ag. Os melhores resulta-

dos de  $\Delta\eta$  para a célula solar de Si foram verificados para os vidros TGP com 1,0% de  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  e 0,5% de  $\text{AgNO}_3$  (2h de tratamento térmico) e com 5,0% de  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  e 0,5% de  $\text{AgNO}_3$  (14h de tratamento térmico), com aumentos de 11,4% e 11,8%, respectivamente. Como a eficiência das células solares depende da quantidade de fótons que chega ao dispositivo fotovoltaico, a transmitância da camada de cobertura também desempenha um papel importante e explica o  $\Delta\eta$  semelhante obtido para as células solares cobertas por ambos os sistemas vítreos: a amostra com 1,0% de  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  e 0,5% de  $\text{AgNO}_3$  apresentou maior transmitância em

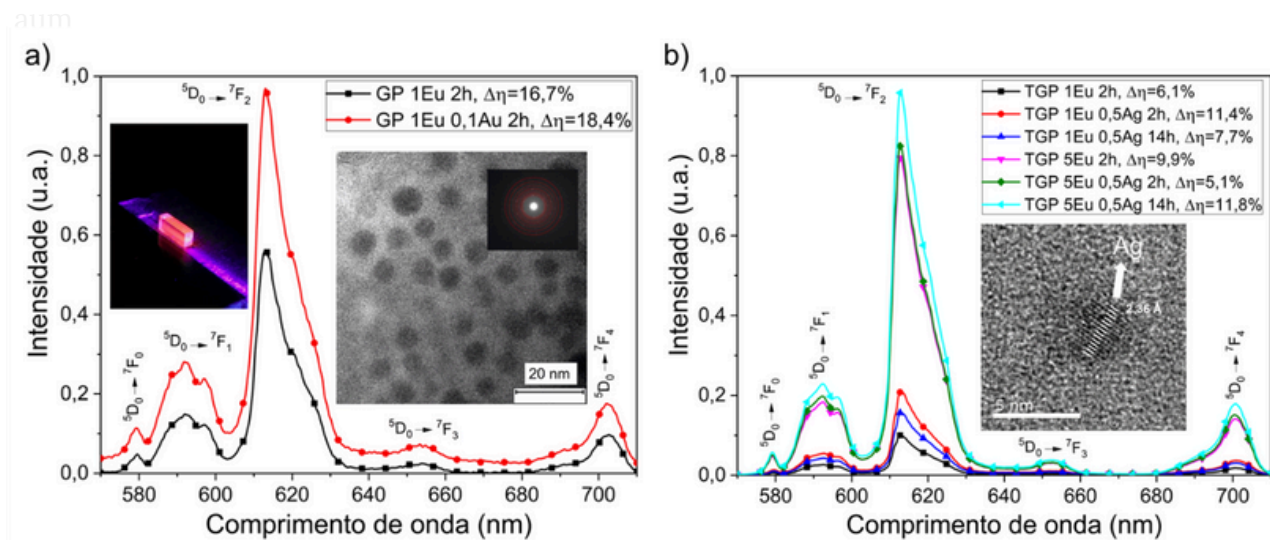


Figura 3 – a) Espectros de emissão (excitação em 405 nm) das amostras de vidro GP; o *inset* mostra uma imagem da amostra emitindo luz e uma imagem de MET das NPs de Au, presentes na amostra GP com 1,0% de  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  e 0,1% de  $\text{Au}_2\text{O}_3$ , e seu padrão de difração de elétrons. b) Espectros de emissão (excitação em 405 nm) das amostras de vidro TGP; o *inset* mostra uma imagem de MET da amostra TGP com 5,0% de  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  e 0,5% de  $\text{AgNO}_3$  14h, onde é possível visualizar uma das NPs de Ag e sua distância interplanar característica.

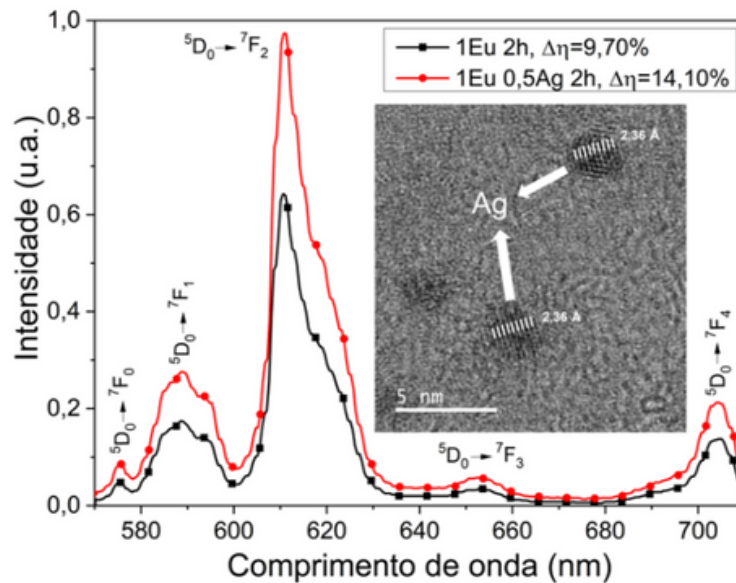


Figura 4 - Espectros de emissão (excitação em 405 nm) das amostras de vidro GPA; o inset apresenta uma imagem de MET da amostra GPA com 1,0% de  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  e 0,5% de  $\text{AgNO}_3$ , onde é possível visualizar as NPs de Ag e sua distância interplanar característica.

comparação com aquela com 5,0% de  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  e 0,5% de  $\text{AgNO}_3$ , que apresentou luminescência significativamente maior. Em relação aos vidros GPA produzidos, também houve aumento de emissão para a amostra com 1,0% de  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  e 0,5% de  $\text{AgNO}_3$  quando comparada à amostra com 1,0% de  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  (Figura 4). Novamente, o maior aumento de eficiência da célula solar de multijunção (11,8%) foi obtido usando como cobertura a amostra com NPs.

## Conclusão

Foram demonstrados resultados de aumento de eficiência de uma célula solar de Si e de uma célula solar de multijunção, usando diferentes matrizes vítreas, dopadas com íons de  $\text{Eu}^{3+}$  com e sem NPs metálicas de Au e Ag, como camada de cobertura. Os efeitos plasmônicos das NPs metálicas desempenharam um papel importante no aumento da luminescência dos íons da TR, resultando em um impacto positivo nos processos de conversão descendente.

Além disso, a transmitância dos vidros produzidos foi considerada como outro fator relevante. Os resultados desta prova de conceito demonstram uma rota promissora para aprimorar o desempenho de dispositivos fotovoltaicos, a partir de diferentes mecanismos, que incluem o processo de conversão descendente e o aumento da luminescência assistida por plasmons. Cabe ainda destacar que a metodologia utilizada pode ser estendida a diferentes hospedeiros, íons de TRs e NPs.

Agradecimentos: INCT de Fotônica / CNPq (465.763/2014) e Laboratório Nacional de Nanotecnologia (LNNano/CNPEM) pela realização das análises de MET.

## Referências

- [1] GUNJI, R. M. *et al.* Germanate glass layer containing  $\text{Eu}^{3+}$  ions and gold nanoparticles for enhanced silicon solar cell performance. *Journal of Luminescence*, v. 226, p. 117497, 2020.

[2] MATTOS, G. R. S. et al. *Enhancement of multijunction solar cell efficiency using a cover layer of  $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$  and  $\text{Eu}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$  doped  $\text{GeO}_2\text{-PbO-Al}_2\text{O}_3$  glasses as spectral converter of solar radiation.* *Optical Materials*, v. 132, p. 112833, 2022.

[3] MATTOS, G. R. S. et al. *Performance improvement of Si solar cell via down-conversion and plasmonic processes using  $\text{Eu}^{3+}$  doped  $\text{TeO}_2\text{-GeO}_2\text{-PbO}$  glasses with silver nanoparticles as cover layer.* *Journal of Luminescence*, v. 238, p. 118271, 2021.

[4] ROMÁN, J. M. *State-of-the-art of III-V solar cell fabrication technologies, device designs and applications.* *Advanced Photovoltaic Cell Design*, 2004.

#### **NOTA DO EDITOR**

As referências [2] e [3] foram reconhecidas recentemente pela editora Elsevier como associadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas (ONU): “Ajudando a enfrentar alguns dos maiores desafios do mundo” (“*United Nations Sustainable Development Goals-SDG 7, helping to tackle some of the world's greatest*”)