

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS
Instituto de Física

Lucas Clezar de Oliveira

**Efeito de matriz vítrea dopada com samário e itérbio na eficiência de uma célula
solar**

Porto Alegre – RS
Julho de 2018

Lucas Clezar de Oliveira

Efeito de matriz vítrea dopada com terra rara na eficiência de uma célula solar

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Física.

Orientadora: Naira Maria Balzaretto

Porto Alegre – RS

Julho de 2018

RESUMO

Foi dopado um vidro de PbO-GeO₂ (41PbO-51GeO₂) com samário com uma concentração de 1% e feitas medidas ópticas (absorção e fotoluminescência). Os íons de samário são capazes de converter fótons de comprimentos de onda da faixa do UV/azul para vermelho/infravermelho (conversão descendente), o que pode ser usado para aumentar a eficiência de células solares de silício. Então este vidro foi usado como máscara para uma célula solar de silício policristalino e foi verificado aumento na sua eficiência em 28%.

Após isso foram fabricados outros vidros iguais a este (também dopados com samário) e dopados com 0,2 e 0,5% de itérbio, pois o samário e o itérbio interagem melhorando o processo de conversão descendente. Ao usar estes vidros como máscara para a mesma célula solar, verificou-se que o vidro com a concentração de 0,2% de itérbio chegou a melhorar a eficiência em 40%, já o vidro com concentração de 0,5% apresentou ganho semelhante ao de apenas samário, possivelmente devido às interações entre os íons de itérbio.

Palavras chave: vidro de germanato e chumbo, células solares de silício, eficiência, conversão descendente.

ABSTRACT

A glass of PbO-GeO₂ (41PbO-51GeO₂) was doped with samarium with a concentration of 1% and optical measurements (absorption and photoluminescence) were done. The samarium ions are capable of converting UV/blue wavelength to red/infrared (down conversion), that can be used to increase silicon solar cell efficiency. The glass was used as a mask to a polycrystalline silicon solar cell and an increase of 28% in efficiency was verified.

Then other glasses with equal composition (also doped with samarium) were doped with 0.2 and 0.5% of ytterbium, because samarium and ytterbium can interact to enhance the down conversion process. Using these glasses as a mask to the same solar cell, an increase in efficiency of 40% was verified for the 0.2% concentration glass, but the glass with 0.5% concentration of ytterbium appeared to have almost the same gain as the glass doped with only samarium, probably because of the interactions between the ytterbium ions.

Keywords: lead-germanate glasses, silicon solar cells, efficiency, down conversion.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	2
2. Conceitos e motivação.....	3
2.1. Vidros.....	3
2.2. Células solares.....	4
2.3. Terras-raras.....	7
3. Estado da arte.....	10
4. Materiais e métodos.....	12
4.1. Preparação dos vidros.....	12
4.2. Técnicas de caracterização para a matriz.....	13
4.3. Caracterização da célula solar e verificação do efeito dos vidros dopados na eficiência.....	14
5. Resultados e discussão.....	16
5.1. Difração de raios X.....	16
5.2. Espectros de absorção e emissão.....	16
5.3. Efeito dos vidros na eficiência.....	18
6. Conclusão.....	20
7. Referências.....	21

1 Introdução

Neste trabalho foi feito um estudo sobre uma matriz vítrea de óxido de germânio e chumbo dopada com elementos terras raras, o samário e o itérbio, com o objetivo de caracterizá-la quanto às suas propriedades ópticas e avaliar o efeito sobre a eficiência de uma célula solar.

O vidro utilizado no trabalho foi fabricado no Instituto de Física da Universidade e foi escolhido por apresentar características compatíveis com a aplicação desejada em células solares. Já a célula na qual o estudo sobre o efeito do vidro foi efetuado foi adquirida comercialmente e é de silício policristalino.

Primeiro será apresentada uma motivação para o trabalho, na qual serão introduzidos brevemente os conceitos necessários sobre vidros, elementos terras-raras e a eficiência de células solares. Depois será discutido o estado da arte nas pesquisas sobre o aumento da eficiência de células solares. Logo após, serão expostos os métodos que foram utilizados na caracterização da célula e da matriz vítrea e na medição da alteração da eficiência da célula solar.

2 Conceitos e motivação

2.1. Vidros

Vidros são definidos como sólidos amorfos capazes de sofrer transição vítrea ao atingirem uma certa temperatura T_g (temperatura de transição vítrea). Essa transição é reversível, ou seja, acontece tanto no aquecimento quanto no resfriamento. A temperatura em que ocorre transição vítrea depende do material e pode ocorrer em uma faixa de temperaturas, seu valor exato depende da velocidade de resfriamento.

A figura 1 ilustra o processo para fazer um vidro: é aquecido um material capaz de, em princípio, formar vidro, mas que não está num estado vítreo (seguindo a linha preta na figura até atingir a temperatura de fusão). Esse material, que agora está no estado líquido, precisa ser resfriado. Se o resfriamento for rápido o suficiente, o líquido passará a ser um líquido super-resfriado (um líquido abaixo de sua temperatura de fusão), não dando tempo para o material relaxar e cristalizar. À medida que a temperatura vai diminuindo, a viscosidade do material aumenta, aumentando o tempo de relaxação (tempo necessário para que o material cristalize). Por fim, a T_g é atingida e a estrutura do líquido super-resfriado é praticamente congelada em seu estado amorfo. Se o resfriamento for lento o suficiente, o material cristalizará.

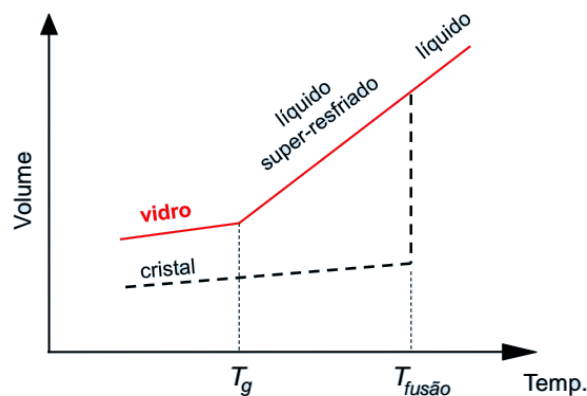


Figura 1: Gráfico de temperatura vs volume. Se o resfriamento for lento o líquido irá cristalizar.

[1]

A maior parte dos vidros usados hoje em dia é feita de sílica, pois esta é muito abundante na natureza. Mas existem outros tipos de vidros como os boratos, fosfatos, teluretos, germanatos, calcogenetos e fluoretos. Vidros de óxidos de metais pesados estão sendo

estudados e apresentam propriedades interessantes para aplicações na indústria. Entre essas propriedades estão a baixa energia de fônons causada pela presença dos metais pesados (o que torna útil para aplicações no visível) e transparência no infravermelho.

Em particular, o sistema vítreo PbO-GeO_2 dopado com íons de elementos terras-raras, que é o vidro utilizado neste trabalho (dopado com samário e itérbio), vem sendo estudado [1] e apresenta boa estabilidade térmica e química e energia de fônons menor que a de vidros silicatos. A baixa energia de fônons é importante para que ocorra menos transições não radiativas entre os níveis de energia do íon dopante, sendo isso importante para a eficiência quântica do processo de conversão descendente discutido mais adiante. Além disso, permite que o espectro de absorção e emissão dos terras raras tenham intensidades elevadas.

2.2 Células solares

Células solares são dispositivos capazes de transformar a energia da luz em energia elétrica. Comumente são feitas de silício, podendo ser de silício policristalino, monocristalino ou amorfo. Essas células são formadas basicamente por uma junção entre o silício dopado de duas maneiras diferentes, uma região do tipo p e uma do tipo n, formando uma junção pn. Perto da junção os elétrons do lado n passam para o lado p e as lacunas do lado p passam para o lado n por difusão, deixando íons descobertos nos seus respectivos lados. Essa região onde há íons descobertos é chamada de zona de depleção. No equilíbrio a corrente de difusão é equilibrada por uma corrente de deriva reversa causada pelo campo elétrico que se estabelece na zona de depleção por causa dos íons descobertos, fazendo com que elétrons no lado p (ou lacunas no lado n) próximas da zona de depleção voltem para o lado n (lado p para lacunas). Quando um fóton com energia maior que o band gap do silício atinge a célula, um dos elétrons da banda de valência do silício é promovido para a banda de condução, gerando um par elétron-lacuna. Se esse par conseguir chegar na região de depleção antes de ocorrer recombinação, o campo elétrico na junção vai separar as duas cargas e dizemos que as cargas foram coletadas. A coleta de cargas vai gerando uma diferença de potencial entre as regiões p e n, até que se atinge um equilíbrio, no qual o potencial é chamado de “potencial de circuito aberto” e que depende da intensidade da luz incidente.[2] A figura abaixo mostra um esquema dessa situação:

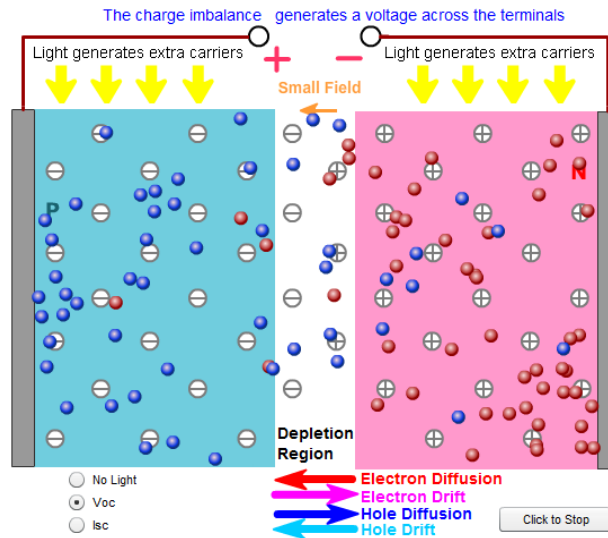


Figura 2: Potencial de circuito aberto causado pela geração de elétrons (bolinhas vermelhas) e lacunas (bolinhas azuis). [3]

A razão entre a energia elétrica extraída da célula e a energia da luz incidente é chamada de eficiência da célula solar, que depende de muitos fatores, entre eles estão o bloqueio da luz incidente pelos contatos metálicos em sua superfície, a reflexão na superfície e a temperatura. A eficiência também é diminuída pelo fato de muitos fótons terem energias menores que o band gap, não gerando pares elétron-lacuna. Já outros fótons têm energias muito maiores que o band gap, ocorrendo a transição do elétron para a banda de condução e sobrando energia, que é termalizada. [3]

Para calcular a eficiência usa-se a seguinte fórmula:

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}} \quad [3]$$

Para isso precisa-se saber a potência da luz incidente (P_{in}), o fill factor (FF) da célula e mede-se a corrente de curto circuito (I_{sc}) e a tensão de circuito aberto (V_{oc}). A corrente de curto circuito é a corrente de elétrons e lacunas quando o circuito é fechado, deixando livre a passagem destes últimos. O fill factor é uma medida do quão “quadrada” é a forma da curva I vs V da célula [3]:

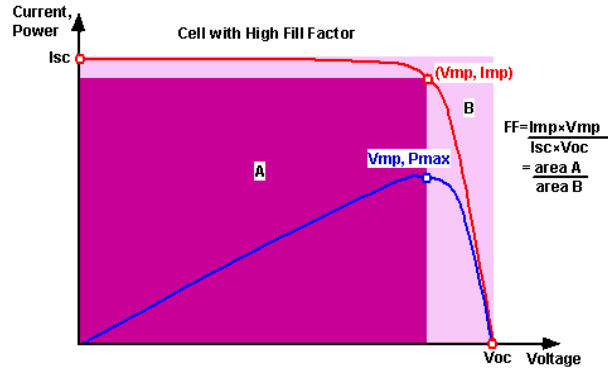


Figura 3: Gráfico da corrente por voltagem em vermelho e da potência por voltagem em azul. V_{mp} e I_{mp} são a tensão e corrente para a máxima potência.

Cabe ainda discutir sobre a resposta espectral de uma célula solar, ou seja, a razão entre a corrente gerada pela célula e a potência da luz incidida [3]. A figura 4 mostra a resposta espectral para diversos comprimentos de onda para uma célula de silício:

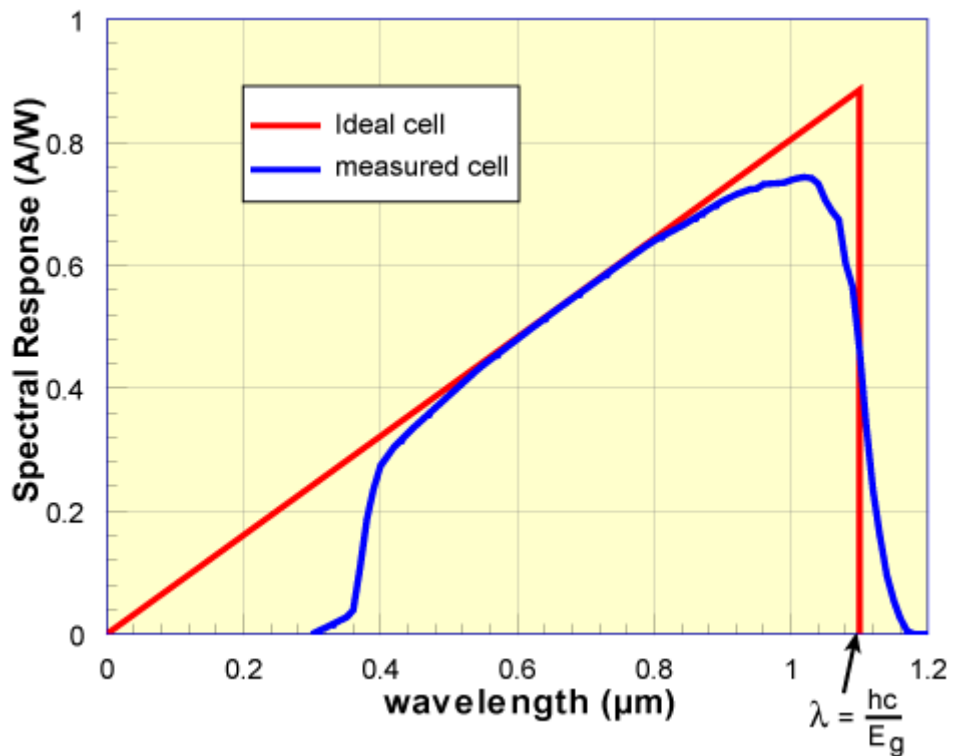


Figura 4: Resposta espectral para diversos comprimentos de onda. [3]

A curva em azul é para uma célula coberta com um vidro, por isso o corte para baixos comprimentos de onda, que é absorvido pelo vidro. O corte para altos comprimentos de onda é causado pelo fato de fótons com energias menores que o bandgap do silício não serem absorvidos. Já a curva vermelha apresenta essa forma pois quanto menor o comprimento de

onda, menor a proporção da energia do fóton aproveitada, porque a maior parte da energia se transforma em calor. [3]

2.3 Terras-raras

Os elementos terras-raras são os lantanídeos (elementos de número atômico 57 ao 71) e mais o escândio e o ítrio. O escândio e o ítrio são considerados terras-raras por se encontrarem no mesmo minério de outros terras-raras e por suas propriedades químicas [4].

Os lantanídeos apresentam uma estrutura eletrônica do tipo $4f^n 5s^2 5p^6 (0 < n < 14)$, em que os elétrons da camada 4f são blindados pelos elétrons das camadas exteriores. Transições eletrônicas entre os níveis 4f ocorrem, apesar de proibidas pelas regras de seleção de Laporte, e são responsáveis por emissões e absorções com frequências quase monocromáticas, características de cada íon. A ocorrência dessas transições pode ser explicada pela interação com o campo cristalino (ou campo ligante no caso de vidros), através de um modelo proposto por Judd e Ofelt, que afirma que os estados 4f não são puros e não valem as mesmas regras de seleção de um íon livre [4].

Em um íon livre, os níveis de energia 4f perdem sua degenerescência devido à interação Coulombiana e ao acoplamento spin-órbita. Quando os íons estão imersos em um campo cristalino (ou ligante), os estados se desdobram em mais subníveis, devido ao campo elétrico externo. Como em um lantanídeo os elétrons 4f estão blindados, o campo externo interage fracamente e pode ser tratado como uma perturbação. Expandindo o potencial do campo em harmônicos esféricos, alguns componentes dessa expansão fazem a mistura entre estados de paridades opostas do íon, fazendo com que as transições por mecanismos de dipolo elétrico sejam permitidas, pois só são permitidas transições entre estados de paridades diferentes [4].

Com essas transições sendo permitidas, o samário Sm^{3+} , que é um dos íons terra-rara usado neste trabalho, é capaz de absorver luz no UV/azul e emitir na região do vermelho, sendo esta uma região dentro da faixa de frequências em que a célula solar de silício tem boa resposta espectral. Além disso, quando um fóton de alta frequência é absorvido pelo íon, ele emite dois ou mais fótons de frequências menores. Isso pode ocorrer das seguintes formas: um íon absorve um fóton de alta energia e passa para um estado excitado, esse íon pode ir liberando fótons e decaindo para estados intermediários antes de finalmente decair para o estado fundamental; um íon, após absorver o fóton de alta energia pode decair para um estado intermediário e o fóton

emitido ser absorvido por um outro íon, os dois voltam para o estado fundamental liberando fótons de energias menores; um íon excitado cai para o estado fundamental liberando toda a sua energia que é absorvida por outros dois íons, estes dois íons liberam fótons com energias menores[7].

Outro terra-rara usado no trabalho é o itérbio (íons Yb^{3+}), com o propósito de interagir com o samário, recebendo energia deste e emitindo fótons na faixa de 970 nm. Este processo de transferência de energia acontece pois o samário emite na região entre 850-1250 nm, na qual o itérbio absorve.

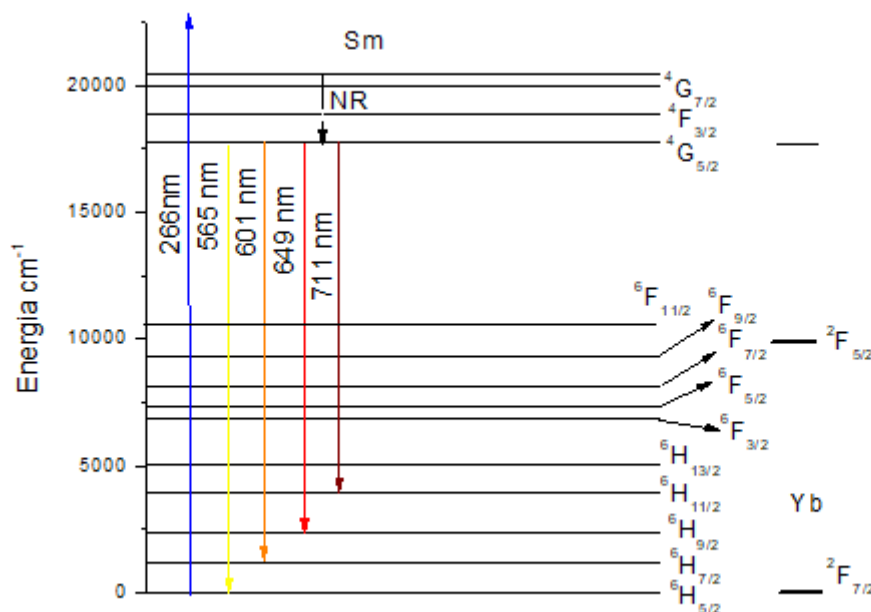


Figura 5: Diagrama de energia do samário e do itérbio.

A figura 5 mostra um diagrama de energia do samário e do itérbio. Ao excitar o samário com radiação UV de 266 nm, o nível $4G_{5/2}$ fica populado. Os elétrons que decaem para os níveis mais baixos liberam fótons que podem ter comprimento de onda menores do que 950 nm, que é o necessário para excitar os elétrons do íon de itérbio do nível $2F_{7/2}$ (estado fundamental) para o nível $2F_{5/2}$. Os elétrons neste estado, por sua vez, decaem para o estado fundamental liberando fótons de comprimento de onda de 970 nm.

Um mecanismo capaz de transformar um fóton de energias muito maiores (mais que duas vezes o band gap do silício) em dois ou mais fótons com energias um pouco menores (mas ainda maiores que o band gap), pode aumentar a eficiência das células solares, diminuindo a energia desperdiçada com calor. Esse processo é chamado de “conversão descendente”

(downconversion). Existe também a “conversão ascendente”, na qual fótons de energias menores são transformados em um de energia maior. [4]

Aqui entra a importância da baixa energia de fônons da matriz vítrea, pois como os fônons são de energias muito baixas comparados às transições radiativas, precisam-se de muitos fônons em um processo de decaimento multi-fônons, tornando muito improvável uma transição não radiativa e diminuindo drasticamente a perda de eficiência quântica do processo de conversão.

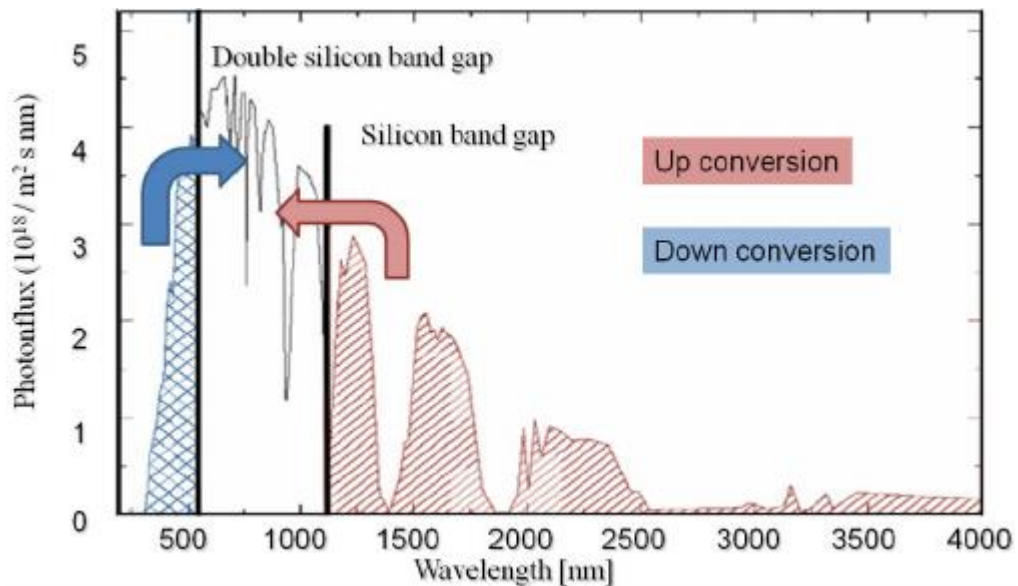


Figura 6: Imagem mostrando o espectro solar e as regiões onde podem ser usadas up e down conversion para criar fótons na região entre 1 e 2 band gaps do silício. [6]

Por usar o samário e itérbio como codopantes, espera-se que fótons na faixa do UV/azul sejam convertidos em fótons no vermelho/infravermelho, ocorrendo então o processo de downconversion.

3 Estado da arte

As tecnologias de células solares podem ser divididas em três gerações. A primeira geração, que atualmente domina o mercado, contém células feitas de silício. As células solares comerciais de silício apresentam eficiências entre 10 e 20% [9], sendo a célula de silício policristalino a mais popular. A segunda geração contém células de filmes finos como CdTe e silício amorfo. Pesquisas estão sendo feitas para o desenvolvimento de células com mais alta eficiência e com custos favoráveis para uso comercial. Esta nova geração de células solares inclui:

-Células de perovskita: chama-se de perovskita um material que apresenta a mesma estrutura cristalina do titanato de cálcio. Com essa tecnologia de terceira geração, usando perovskita como meio ativo, já conseguiu-se obter uma eficiência de mais de 20% em 2017 [10], sendo uma tecnologia de rápido desenvolvimento.

-Células de pontos quânticos: utilizando pontos quânticos como meio ativo, é possível alterar as propriedades ópticas da célula apenas alterando o tamanho desses pontos, ao contrário de células que utilizam materiais bulk como meio ativo em que a única maneira de alterar é mudando de material. Chegam a atingir 8% de eficiência. [11]

-Células orgânicas: construídas a partir de filmes finos de materiais orgânicos semicondutores, estas células apresentam a possibilidade de serem fabricadas por um processo de impressão em rolos. Mas atualmente sua eficiência ainda é baixa, cerca de 8%. [12]

O processo de conversão ascendente e descendente utilizando materiais dopados com íons terras-raras, como neste trabalho, vem sendo estudado, pois apresenta uma alternativa para o aumento da eficiência da tecnologia de primeira geração. Estudos mostram que usando conversão ascendente é possível aumentar a eficiência de uma célula em quase 2%, ainda longe do limite teórico de 10%. [5] Conversão descendente também vem sendo estudada, um vidro borato dopado com íons de samário teoricamente consegue aumentar a eficiência de uma célula de telureto de cádmio em até 3%. [8]

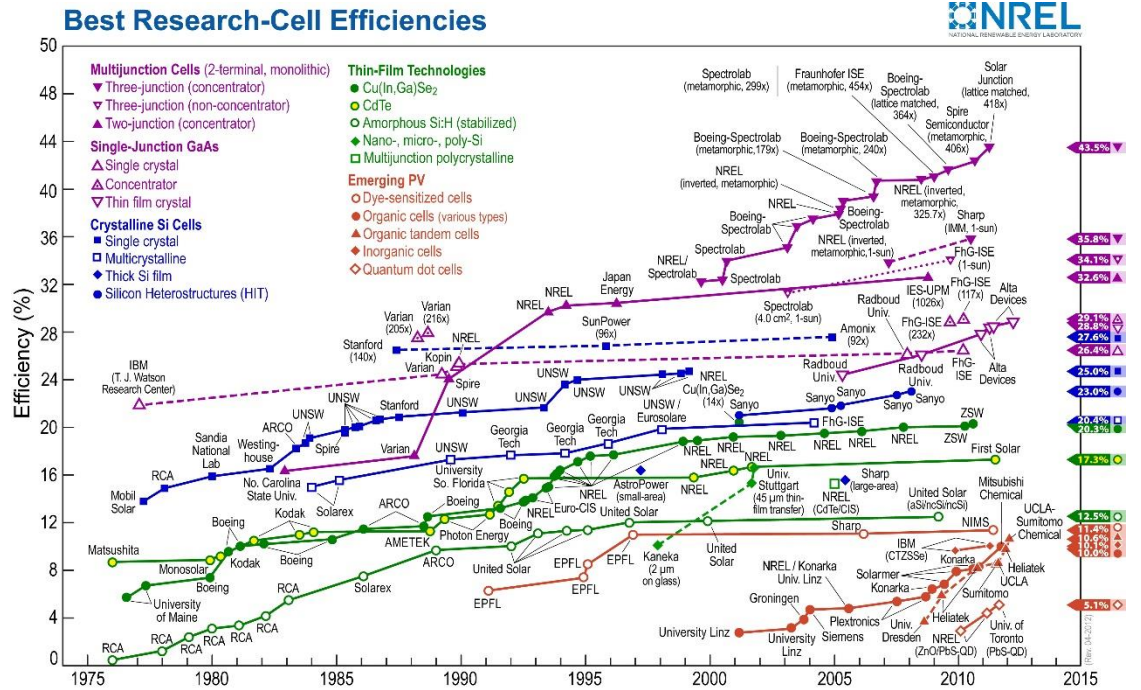


Figura 7: Evolução da eficiência de células solares de diversas tecnologias. [13]

4 Materiais e métodos

4.1 Preparação dos vidros

Foi preparada uma matriz vítrea de óxido de germânio e óxido de chumbo dopada com íons de samário (usando óxido de samário). Esse vidro foi produzido no próprio Instituto de Física através do seguinte processo:

1- Primeiro foram pesadas as quantidades certas dos materiais (em pó) para que se alcançasse uma proporção de 59:41:1 para óxido de germânio, óxido de chumbo e óxido de samário, respectivamente, utilizando-se uma balança de precisão. Essa proporção foi utilizada pois otimiza a emissão dos íons de samário. O óxido de germânio sendo usado como formador e o óxido de chumbo sendo usado como modificador.

2- Os pós foram colocados em um cadinho de platina e misturados.

3- O cadinho foi colocado em um forno e aquecido até 300°C, permanecendo assim por uma hora. Depois foi aquecido até 1000°C, permanecendo por uma hora. Finalmente foi aquecido até 1200°C, sendo mantido a temperatura por duas horas. Todos os passos tiveram taxas de aquecimento de 10°C/min.

4- Após isso, o material do cadinho foi vertido em um molde pré-aquecido à 350°C (para evitar choque térmico) e colocado em um outro forno a 350°C por duas horas.

5- O forno foi desligado e o vidro foi lentamente trazido de volta para a temperatura ambiente.

Usando esses mesmos procedimentos, foram preparados vidros dopados com itérbio (utilizando óxido de itérbio) juntamente com samário (mantendo-se a concentração de samário usada anteriormente), com concentrações de 0,2% e 0,5% de itérbio. Ao final do processo, foram cortados os vidros de forma que ficassem com uma espessura de cerca de 2mm e quadrado com aproximadamente 5mm de lado.



Figura 8: Balança de precisão e forno usados na preparação dos vidros.

4.2 Técnicas de caracterização para a matriz

Após a produção do vidro, foi feita a sua caracterização através das seguintes técnicas:

-Difração de raios X: Ao incidir raios X sobre um material cristalino, pode-se considerar (simplificadamente) que o material é composto por diversos planos de átomos que funcionam como espelhos. Se a reflexão do feixe incidente por dois espelhos sucessivos sofrer interferência construtiva, isto é, a diferença de caminho entre os dois feixes refletidos for um número inteiro de comprimentos de onda, temos um pico de difração. Isso pode ser representado pela seguinte equação:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad [14]$$

Onde n é um número inteiro, d é a distância entre os planos sucessivos, λ o comprimento de onda do raio X incidente e θ o ângulo incidente. Em um difratômetro, usa-se um comprimento de onda constante e varia-se o ângulo.

Usando difração de raios X na amostra, pode-se verificar que esta está amorfa se não aparecer nenhum pico. Foi utilizado um difratômetro Siemens D500 com um tubo de cobre e com comprimento de onda $1,54056 \text{ \AA}$.

-Espectroscopia de luminescência: São incididos fótons de energias maiores que a energia do bandgap do material a ser analisado. Com isso, elétrons da banda de valência são excitados para a banda de condução e lacunas passam para a banda de valência. Os elétrons que foram excitados migram para o fundo da banda de condução liberando fônons, assim como as lacunas migram para o topo da banda de valência. Quando um elétron decair, ele vai liberar um fóton de energia maior ou igual ao do bandgap do material.

Neste trabalho os fótons incididos no vidro vão promover transições entre os níveis 4f dos íons terras-raras presos na matriz vítrea, isso vai ser usado para obter informações sobre os níveis de energia. Para isso será utilizada uma excitação de 266 nm e medida a emissão na faixa de 295-850 nm.

-Espectroscopia de absorção: Incide-se luz sobre a amostra e mede-se a absorbância em função do comprimento de onda da luz incidente. Fótons cuja frequência seja compatível com a diferença de energia entre as transições entre os níveis de energia serão absorvidos, dando mais informações sobre os níveis de energia da matriz, complementando os dados obtidos na espectroscopia de luminescência. As medidas foram feitas num espectrofotômetro Carry 5000 numa faixa de 350-2000 nm e temperatura ambiente.

4.3 Caracterização da célula solar e verificação do efeito dos vidros dopados na eficiência

Ao contrário do vidro, a célula solar que foi utilizada no trabalho foi adquirida comercialmente. Após a caracterização da matriz vítrea, foi caracterizada a célula.



Figura 9: Painel solar comprado para a realização das medidas.

Para a realização das medidas, foi utilizada uma lâmpada de xenônio com uma potência de 160 W a uma distância de 40 cm e uma fonte de tensão ligada a um computador. Colocou-se uma máscara de papelão com uma abertura com dimensões semelhantes às dos vidros (5 mm x 5 mm) para que a luz só chegasse na célula passando através dos vidros. Todas as fontes de luz da sala foram apagadas, deixando apenas a lâmpada de xenônio. Primeiro foram feitas

medidas sem os vidros para caracterizar a célula por si só, após isso foram colocados os vidros um de cada vez e medida sua curva I-V.

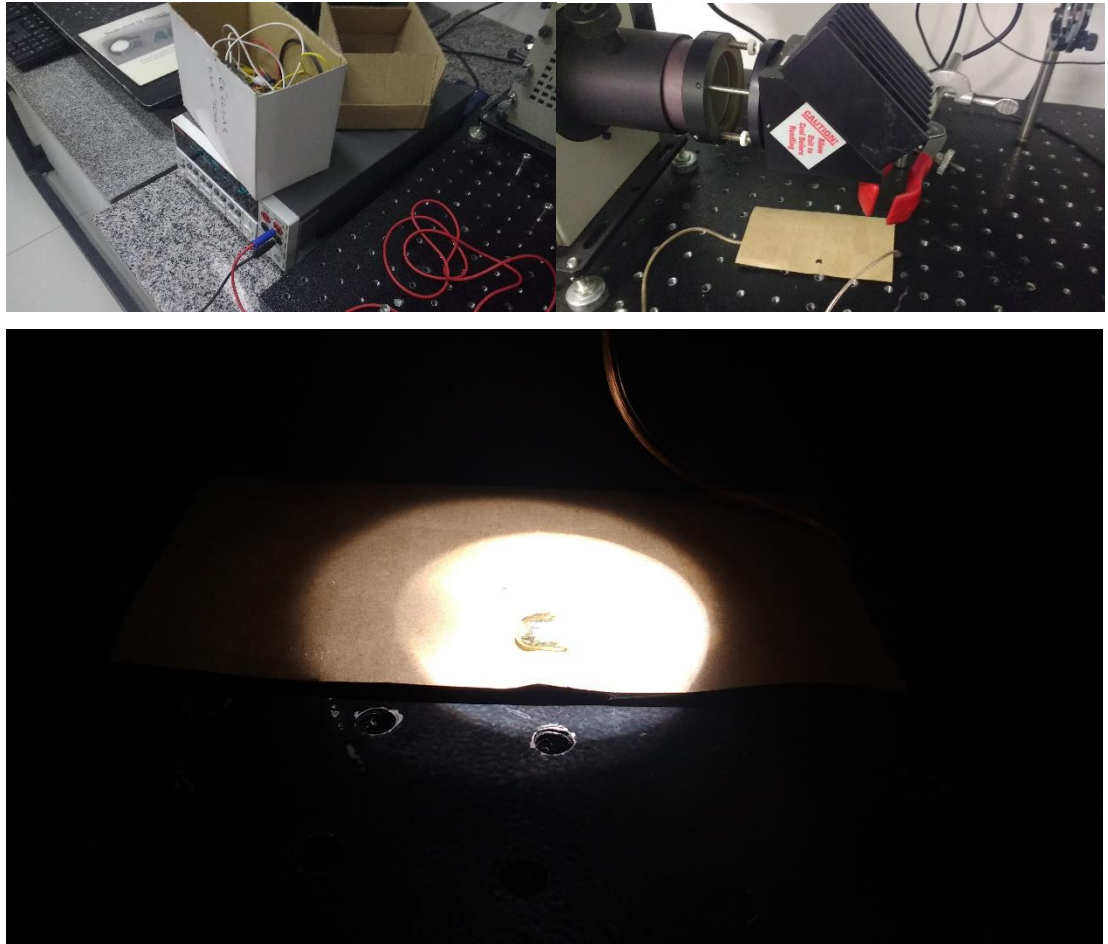


Figura: 10: Fonte de tensão, lâmpada e a luz incidindo na amostra.

5 Resultados e discussão

5.1 Difração de raios X

As medidas de difração apresentaram um padrão amorfo, como mostra a imagem a seguir, para todos os vidros, como esperado.

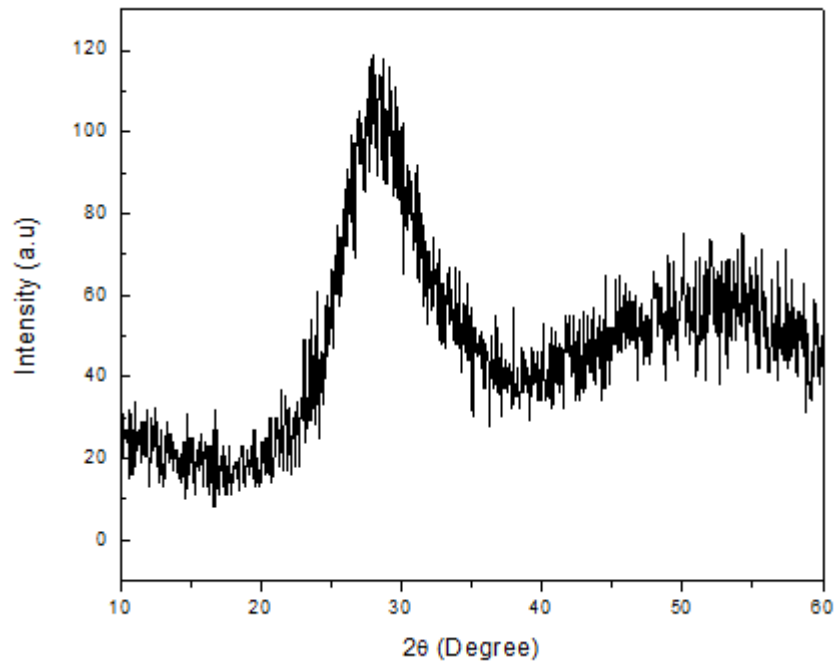


Figura 11: Difratoograma dos vidros, apresentando o halo típico de uma substância amorfa.

5.2 Espectros de absorção e emissão

Os resultados das medidas de absorção mostram que a diferença entre o vidro dopado somente com samário e os codopados com itérbio foi na banda de 970 nm causado pelo itérbio. O que está de acordo com o esperado, pois esta transição de 970 nm é importante para o aumento da eficiência da célula. Cabe ressaltar que o intervalo proibido de energia do silício é de 1,11 eV, correspondendo a, aproximadamente, 1120 nm. Os resultados, mostrados na figura 12, indicam que, quanto maior a concentração de itérbio, maior é este pico.

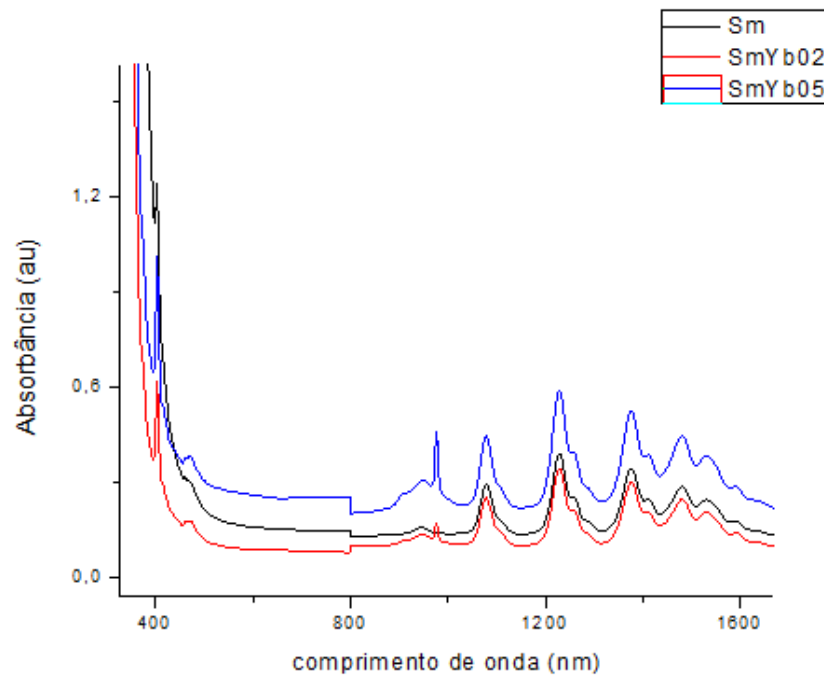


Figura 12: Espectros de absorção para os vidros.

O espectro de emissão obtido através das medidas da técnica de fotoluminescência mostra que, para uma excitação no UV, o vidro codopado com itérbio com concentração de 0,2% apresentou uma emissão consideravelmente mais intensa, como mostra a figura 13. Isso se deve ao fato de que, com maior concentração de itérbio, a interação entre eles começa a ser mais relevante, e de forma não radiativa. Para a concentração de 0,2% possivelmente a interação mais relevante ocorre entre os íons de samário e os íons de itérbio, de forma radiativa.

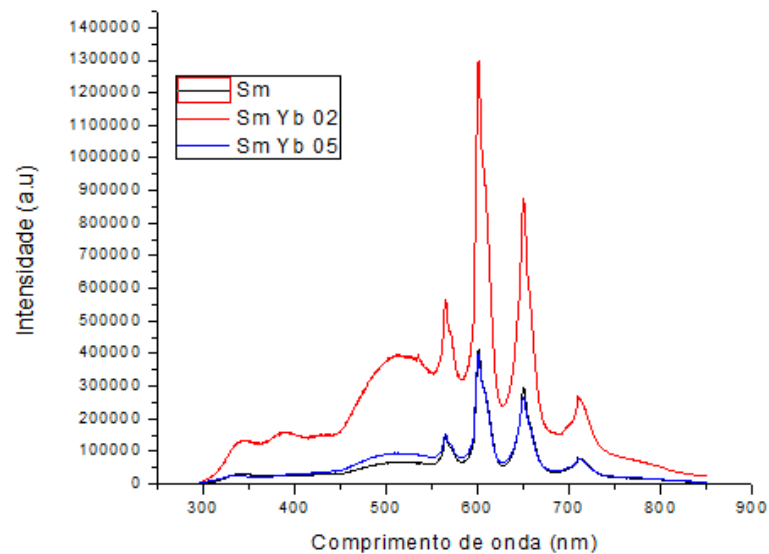


Figura 13: Espectros de emissão para os vidros.

5.3 Efeito dos vidros na eficiência

A figura 14 apresenta as curvas I-V medidas neste trabalho:

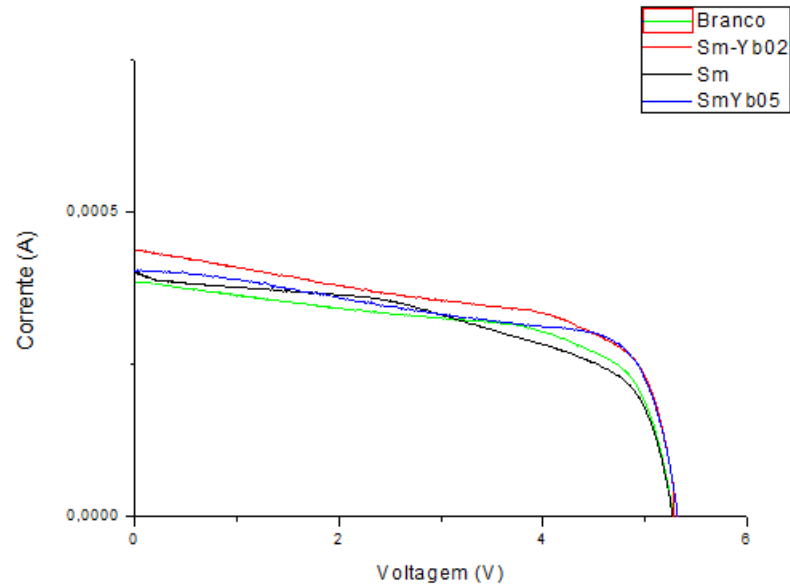


Figura 14: Curvas de tensão e corrente para a célula com os vidros e sem (branco na legenda).

Pode-se ver que a corrente de curto circuito para a concentração de 0,2% de Yb é consideravelmente maior, esperando-se antes mesmo de fazer os cálculos uma maior eficiência. Realizando-se os cálculos de eficiência utilizando os dados obtidos no experimento, chega-se à seguinte tabela.

	Corrente de curto circuito (A)	Tensão de circuito aberto (V)	Fill Factor	Eficiência	Aumento de eficiência
Branco	$0,00038 \pm 0,00002$	$5,30 \pm 0,03$	$0,747 \pm 0,016$	$0,14 \pm 0,02$	--
Sm	$0,00040 \pm 0,00001$	$5,23 \pm 0,02$	$0,546 \pm 0,11$	$0,18 \pm 0,01$	$28\% \pm 16\%$
SmYb02	$0,00044 \pm 0,00001$	$5,28 \pm 0,02$	$0,546 \pm 0,15$	$0,20 \pm 0,01$	$42\% \pm 17\%$
SmYb05	$0,00040 \pm 0,00003$	$5,28 \pm 0,01$	$0,640 \pm 0,03$	$0,18 \pm 0,02$	$28\% \pm 20\%$

Tabela 1: Dados obtidos no experimento.

Os erros se originaram nos dados da curva IxV através da variação do valor da corrente de curto circuito e tensão de circuito aberto, depois foram se propagando até chegar na eficiência. Podemos ver que o vidro codopado com concentração de 0,2% de itérbio apresenta resultados melhores do que apenas dopado com samário, graças à interação entre o samário e o itérbio. Mas ao aumentar a concentração de itérbio a eficiência é diminuída, por causa da interação entre estes íons. Cabe lembrar que a eficiência instrínseca da célula continua a mesma.

Possíveis erros nas medições do efeito do vidro na eficiência incluem: erro na medição na distância da lâmpada até a célula, a máscara de papelão usada e o tamanho da área do buraco, a espessura dos vidros dopados utilizados e o quão polidos estão e problemas de isolamento dos contatos da célula utilizados para medir a curva de tensão e corrente.

6 Conclusão

Obteve-se um aumento da eficiência de uma célula solar de silício policristalina comercial através do uso de uma máscara de vidro de $PbO - GeO_2$, escolhido por apresentar boas características tais como baixa energia de fônons e boa estabilidade, dopado com íons Sm^{3+} e Yb^{3+} . O processo de conversão descendente ocorrido no vidro envolvendo transferência de energia dos íons de samário para os de itérbio é, provavelmente, o responsável pelo aumento da eficiência observado. Os resultados apresentados neste trabalho mostram que a utilização de samário e itérbio parece promissora para melhorar a eficiência, mas mais experimentos precisam ser feitos para termos uma maior confiança nesses resultados. Uma possibilidade de trabalho futuro seria um estudo sobre o balanço entre espessura do vidro e ganho de eficiência, para descobrir com qual espessura o ganho é ótimo.

7. REFERÊNCIAS

[1] - Herrera,A.Estudo das propriedades espectroscópicas e estruturais de vidros de metais pesados dopados com íons Sm^{3+} e Pr^{3+} : efeito de altas pressões e da incorporação de nanopartículas de ouro. 20016. 118 f. Tese (doutorado em física) - Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio grande do Sul, 2016.

[2]- Green, M. Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1981. 274 p.

[3]- Honsberg, Christiana. Bowden, Stuart. Photovoltaic education network, 2013. Disponível em <http://www.pveducation.org> . Acesso em 8 de agosto de 2017.

[4]- Pecoraro, E. Estudo espectroscópico de vidros a base de aluminato de cálcio dopados com Nd^{3+} e de vidros a base de fluoreto de chumbo dopados com Pr e Pr / Yb. 1999. 225 f. Tese (doutorado em ciência e engenharia de materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos, São Paulo, 1999.

[5]- Shang, Y. Hao, S. Yang, C. Chen, G. Enhancing Solar Cell Efficiency Using Photon Upconversion Materials. Nanomaterials, v. 5 , n. 1, p. 1782-1809, outubro 2015.

[6]- Alombert-Goget G.Ristic D. Chiasera A.Varas S. Ferrari M. Righini G.Dieudonne B.Boulard B. Rare-earth doped materials enhance silicon solar cell efficiency, 2011. Disponível em https://www.researchgate.net/publication/265038107_Rare-earth_doped_materials_enhance_silicon_solar_cell_efficiency . Acesso em 10 de agosto de 2017.

[7]- Wehrspohn R. Rau U. Gombert A. Photon Management in solar cells. New Jersey: John Wiley & Sons, 2016. 376 p.

[8]-Steudel F. Dyrba M. Schweizer S. Fluorescent borate glass enhances cadmium telluride solar cells. SPIE newsroom. Online journal, 2012. Disponível em <http://spie.org/newsroom/4235-fluorescent-borate-glass-enhances-cadmium-telluride-solar-cells?SSO=1> . Acesso em 11 de agosto de 2017.

[9]-Aggarwal V. What are the most efficient solar panels on the market? EnergySage , 2017. Disponível em <http://news.energysage.com/what-are-the-most-efficient-solar-panels-on-the-market/> . Acesso em 11 de agosto de 2017.

[10]-Xiaoxi Wu et al. Light-induced picosecond rotational disordering of the inorganic sublattice in hybrid perovskites. Science Advances, v. 3, n. 7. Julho de 2017.

[11]-Chia-Hao M. Chuang, Patrick R. Brown, Vladimir Bulović, and Mounqi G. Bawendi. Improved performance and stability in quantum dot solar cells through band alignment engineering. The National Center for Biotechnology Information, 2014. Disponível em <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4110173/> . Acesso em 11 de agosto de 2017.

[12]-Osborn M. NREL validates Konarka's 8.3% 'Power Plastic' efficiency record. PVTech, 2010. Disponível em https://www.pv-tech.org/news/nrel_validates_konarkas_8.3_power_plastic_efficiency_record . Acesso em 11 de agosto de 2017.

[13]- M. A. Green *et al.*, "Solar Cell Efficiency Tables (Version 44)," Prog. Photovoltaics 22, 7 (2014).

[14]- H. P. Myers (2002). Introductory Solid State Physics. Taylor & Francis. [ISBN 0-7484-0660-3](https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07404860208839233).