

CÉLULAS SOLARES DE InP PARA APLICAÇÕES ESPACIAIS

N. G. Dhere*, T.J. Coutts, X. Wu, R. G. Dhere e T.A. Gessert
Solar Energy Research Institute, 1617 Cole Blvd, Golden, CO 80401

* Sob licença do Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ

As células solares de InP estão sendo estudadas para aplicações espaciais devido a suas propriedades interessantes de autorecozimento dos danos pela radiação à temperatura ambiente, através de passagem da corrente direta. Foram depositados filmes finos de ITO pela pulverização catódica tipo magnetron de corrente contínua (CC) e rádio frequência (RF), sobre monocristais de InP, num equipamento especial.* Foram utilizados os valores otimizados de pressão parcial de oxigênio para cada taxa de deposição. Foi estudada a variação de densidade de corrente de curto circuito, voltagem de circuito aberto, fator de preenchimento e eficiência de conversão fotovoltaica com a taxa de deposição, valor da distância entre fonte-substrato e varredura dos substratos abaixo do alvo. Obteve-se eficiências de conversão de 13,2% (Global AM1,5 1000 W/m²) por ambas as técnicas de CC e RF. Conseguiu-se também células com a densidade de corrente de curto circuito de 34,64 mA cm⁻² (AM 0) que constitui o maior valor publicado até a presente data para as células baseadas em InP.

1. INTRODUÇÃO

Células solares de InP possuem a interessante propriedade de auto recozimento à temperatura ambiente dos danos causados pela radiação. O processo de recozimento é induzido pela passagem da corrente direta. A comparação de degradação da eficiência de conversão fotovoltaica na fig. 1 mostra que, enquanto as células solares de Si GaAs perdem respectivamente 80 e 50% da sua eficiência original após uma dose de elétrons com energia de 1 MeV ² de 10¹⁶ cm⁻², as de InP perdem apenas 2% da sua eficiência original (1). Estudos mostraram que as perdas sob a incidência de radiação solar são ainda menores e que após 10 anos numa órbita geostacionária, a potência disponível por unidades de peso das células de InP será bem superior a do Si ou GaAs (2) (Fig. 2). Foram alcançadas eficiências de conversão de 20,4% e (AM 1,5) e 15,6% (AM 0) em homojunções de InP fabricadas por MOCVD e difusão (3,4). Yamaguchi e colegas fabricaram células de InP depositado sobre monocristais de Si (5). As células solares de ITO/InP podem ser fabricadas através de deposição de filmes finos semicondutores tipo-n de óxido de índio-estanho (ITO) sobre monocristais de InP tipo-p. O processo é simples e altas eficiências poderão ser alcançadas. Além disso, devido a suas junções rasas, estas células poderão apresentar uma maior resistência contra danos pela radiação. Este trabalho apresenta resultados de desenvolvimento de células solares de ITO/InP.

2. TÉCNICA EXPERIMENTAL

Os filmes finos de ITO foram depositados sobre substratos não-aquecidos, por pulverização catódica de corrente contínua (CC) e de rádio frequência (RF), tipo magnetron, num sistema especial fabricado pela Unifilm sob encomenda. O sistema está embutido num lado de uma mesa limpa com fluxo de ar limpo, mantendo-se nesta forma, condições de limpeza tanto na preparação quanto na montagem e deposição. O alvo constituiu de uma mistura em proporção molar de óxido de índio (91%) e óxido de estanho (9%). Aquecimento de InP resulta em dissociação e perda de fósforo, portanto é necessário minimizar as etapas de alta temperatura no processo. O sistema permite medidas de perfis de deposição e sua utilização no modelamento e deposição de filmes finos com espessuras uniformes (6). Foram determinadas as condições de deposição, especialmente a pres-

são parcial de oxigênio, para cada taxa de deposição, na obtenção de filmes finos de ITO com menor resistência de superfície e uma boa transparência ótica. Maiores informações sobre a técnica de deposição e os resultados obtidos com filmes finos de ITO se encontram numa outra publicação (6). O contato traseiro, depositado anteriormente, consistiu em filme fino da liga Au:Be (1% at.) depositado por evaporação a vácuo e recozido, sob fluxo de gás redutor (90% N₂ e 10% H₂), nas condições otimizadas para obtenção de resistência mínima de contato, à temperatura de aproximadamente 385-400°C, examinando-se constantemente a mudança de coloração, após a qual continua-se o aquecimento durante 30 seg. (7). Os monocristais de InP com dopagem tipo p de $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, fabricados pela Crystal-Comm, EUA, foram polidos mecanicamente com pastas de alumina, química-mecanicamente com pasta de alumina e gotas de uma solução de $\approx 0,1\%$ de bromo em metanol e quimicamente por gravação em solução de bromo (1%) em metanol, o contato traseiro sendo protegido nas células pela pasta de apiezon em tricloroetileno. Recentemente foi verificado que o contato traseiro gravado quimicamente numa solução alcalina e engrossado com uma camada eletrodepositada de Au com espessura de alguns microns, não necessita de nenhuma proteção adicional, durante as etapas de polimento e gravação. O desenho da grade de contato frontal com uma área coberta de 2.84% foi definido pelo processo de fotogravura tipo máscara inversa e foi depositado por eletrodeposição de Au. As etapas de fotogravura e eletrodeposição foram executadas numa sala limpa. As células foram recozidas no ar à temperatura de 120°C durante 30 min, a maioria das células mostrando uma melhoria após o recozimento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As células solares de ITO/InP foram fabricadas depositando-se os filmes finos de ITO sob condições pré-determinadas de deposição na obtenção de filmes com a menor resistência de superfície e uma ótima transparência ótica. A separação entre o alvo e os substratos foi aproximadamente de 5 ou 10 cms, com o alvo na posição central e com os substratos girando em torno do eixo do porta-substrato. No caso da separação menor, foi utilizado o modelamento da deposição para a obtenção de filmes finos uniformes sobre uma área maior através da varredura programada dos substratos abaixo do alvo. As taxas de deposição foram variadas entre 50 e 100 Å/min. na separação de 5 cm e entre 10 e 80 Å/min. na separação de 10 cm. A espessura dos filmes finos de ITO foi escolhida em 650-700 Å com a finalidade de aproveitar ao máximo o efeito antirefletor destes filmes sobre InP.

As figuras 3 e 4 mostram respectivamente a característica de corrente com a voltagem e a variação espectral da eficiência quântica externa da célula solar no caso de deposição de ITO com pulverização catódica tipo corrente contínua, na separação menor (5 cm) entre o alvo e os substratos e sem varredura. A resposta espectral na região azul é muito boa, sem dúvida devido a boa qualidade do ITO. As células fabricadas mostraram uma diminuição em todos os parâmetros i. e. densidade de corrente de curto circuito, J_{sc} , voltagem de circuito aberto, V_{oc} , fator de preenchimento, FF e eficiência de conversão fotovoltaica, quando a taxa de deposição foi aumentada nestas condições de 50 para 100 Å/min. (Tabela I). A resposta espectral na região azul também piorou. Quando foi empregada uma varredura dos substratos em baixo do alvo a uma taxa efetiva de deposição de 50 Å/min., com a finalidade de obter filmes uniformes sobre uma área maior, a voltagem de circuito aberto permaneceu inalterada, houve um pequeno aumento na densidade de corrente de curto circuito e uma pequena diminuição no fator de preenchimento, a eficiência permanecendo no mesmo valor relativa a taxa de 100 Å/min. A semelhança entre os parâmetros se deve talvez ao fato de a taxa de erosão do alvo ser a mesma nos dois casos: da taxa de deposição de 50 Å/min. com varredura e da taxa sem varredura de 100 Å/min.

A fig. 5 mostra a característica de corrente com voltagem da célula com o filme de ITO depositado por pulverização catódica tipo RF a taxa de deposição de 50 Å/min. Verifica-se melhorias na voltagem de circuito aberto, fator de preenchimento (FF) e na eficiência de conversão fotovoltaica. Um aumento na taxa de deposição por RF de 100 Å/min. resultou numa queda brusca em todos os parâmetros (Tabela I).

Os resultados descritos acima indicaram uma possível melhoria na eficiência das células com diminuição na taxa de deposição. Portanto foram fabricadas células aumentando a distância entre o alvo e os substratos de 5 para 10 cm e utilizando-se uma taxa bastante reduzida de 12 Å/min. Não houve entretanto a melhoria esperada. Melhores eficiências foram encontradas no caso de uma taxa de deposição de 90 Å/min. O bombardeamento dos substratos pelos íons e pelos elétrons é muito menor na pulverização catódica tipo magnetron do que na pulverização catódica convencional. Para ainda reduzir este bombardeamento foi colocada uma grade aterrada entre o alvo e os substratos. Os elétrons seguindo caminhos próximos ao eixo do alvo não são desviados pelo campo magnético e portanto incidem diretamente sobre o substrato. Foi embutida no centro da grade uma pequena placa circular para barrar tais elétrons. Não se verificou melhoria significativa nas características das células. Porém quando foi utilizada uma pressão maior de oxigênio na deposição inicial de ITO, observou-se uma melhoria (Tabela I).

A melhor eficiência obtida pela pulverização catódica tanto tipo CC quanto RF foi de 13,2% AM 1,5. Os melhores valores de corrente de curto circuito, voltagem de circuito aberto e fator de preenchimento são respectivamente $J_{sc} = 28,1 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc} = 647 \text{ mV}$ e $FF = 79\%$. Pode-se observar portanto que os valores de corrente de curto circuito e o fator de preenchimento já são satisfatórios; enquanto isto a voltagem de circuito aberto poderá ser melhorada até 800mV, o que resultaria numa eficiência de conversão fotovoltaica de 18%. Espera-se conseguir esta melhoria através da otimização dos parâmetros de preparação de ITO, utilizando monocristais e até as camadas epitaxiais de InP sobre Si. Estas células terão um excelente potencial de uso no programa espacial.

4. CONCLUSÕES

As células solares de InP possuem a interessante propriedade de autorecizimento dos danos causados pela radiação. As células fabricadas pela deposição de filmes finos de ITO poderão proporcionar boa resistência a radiação devido a sua estrutura rasa. Foi utilizada a técnica de deposição de ITO por pulverização catódica tipo magnetron de CC e RF para a fabricação de células de ITO/InP. A melhor eficiência de conversão fotovoltaica por filmes depositados ambos com CC e RF foi de 13,2% AM 1,5. A célula depositada com CC com taxa de deposição de 50 Å/min. apresentou o maior valor de densidade de corrente de curto circuito (AM 0) publicado até o momento. Espera-se conseguir eficiência de conversão de 18% AM 1,5 com a otimização dos parâmetros de deposição dos filmes finos de ITO.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi patrocinado pelo Departamento de Energia e NASA dos EUA, sob contrato nº DE-ACO2-83CHL0093; e pelos Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq e Ministério do Exército do Brasil. Os autores agradecem o Dr. Masafumi Yamaguchi pela permissão de uso das figuras 1 e 2.

6. BIBLIOGRAFIA

1. YAMAGUCHI, M., Uemura, C., Yamamoto, A. e Shibukawa, A.; Hapan. J. Appl. Phys., 23 (1984), 302-307.
2. YAMAGUCHI, M.; Comunicação particular.
3. CHOI, K. Y., e Shen, C. C.; Proc. 19th IEEE Photovoltaic

Specialists' Conference, New Orleans, LA, EUA, março de 1987, (sendo publicado)

4. BOTHRA, S., Bhimmathwala, H.G., Parat, K. K., Ghandi, S. K. e Borrego, J. M.; Proc. 19th IEEE Photovoltaic Specialists' Conference, New Orleans, LA, EUA, março de 1987, (sendo publicado).
5. YAMAGUCHI, M., Yamamoto, A., Itōh, Y., e Nishiota, T.; Proc. 19th IEEE Photovoltaic Specialists' Conference, New Orleans, LA, EUA, março de 1987, (sendo publicado).
6. DHERE, N. G., Cruz, L. R. O., Dhere R. G. e Coutts, T. J., Rev. Brasil. Apl. Vac. 7, (1987).
7. WU, X., Coutts, T. J., Dhere, R.G., Gessert, T.A. e Dhere, N.G. Proc. 19th IEEE Photovoltaic Specialists' Conference, New Orleans, LA, EUA, março de 1987, (sendo publicado).

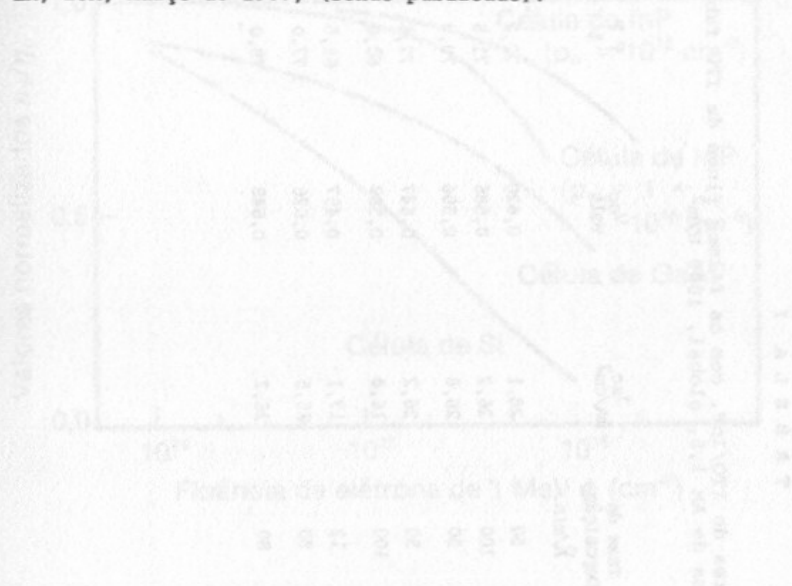


Fig. 1. Comparação da degradação de células solares cristalinas de silício sob diferentes fluxos de elétrons de 1 MeV devido ao dano no silício por radiação.

Fluxo de elétrons de 1 MeV (cm⁻²)	Velocidade de degradação (%)	Tempo de exposição (h)
10⁻⁵	0.05	10
10⁻⁴	0.10	10
10⁻³	0.20	10
10⁻²	0.40	10
10⁻¹	0.80	10
10⁻⁵	0.05	100
10⁻⁴	0.10	100
10⁻³	0.20	100
10⁻²	0.40	100
10⁻¹	0.80	100

T A B E L A I

Os parâmetros de células solares de ITO/InP, com os filmes finos de ITO fabricados nas diversas condições de deposição, sob condições de AM 1,5, global, 1000 W/m².

Tipo	Distância Alvo-Substrato	Varredura	Taxa de Deposição $\text{\AA}/\text{min.}$	J_{sc} mA/cm^2	V_{oc} volt	$F F$ %	Eficiência %
CC	5	sem	50	28,1	0,620	72,2	12,6
CC	5	sem	100	26,2	0,586	71,5	11,0
CC	5	com	50	26,8	0,586	70,4	11,0
RF	5	sem	50	26,2	0,647	77,6	13,2
RF	5	sem	100	16,8	0,509	60,0	5,1
CC	10	sem	12	17,1	0,457	65,5	5,1
CC	10	sem	80	26,5	0,626	77,0	12,8
CC	10	sem*	80	26,2	0,648	79,0	13,2

* com grade e variação de P_{O_2} .

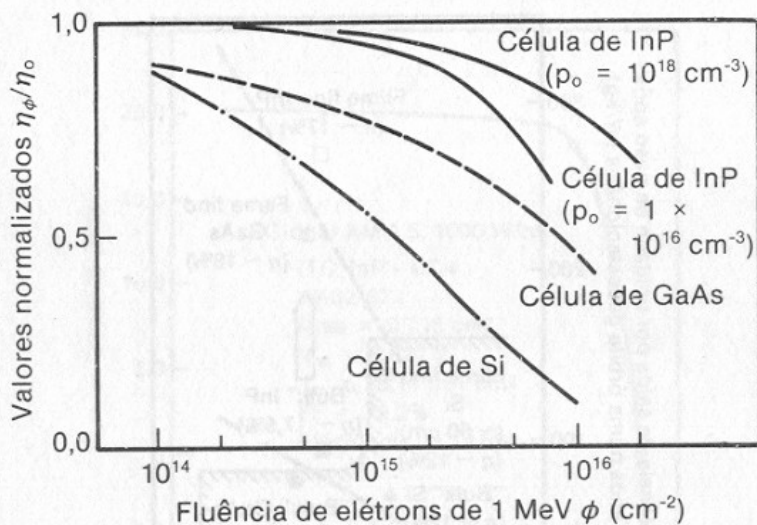


Fig. 1. Comparação de degradação de eficiências normalizadas de células solares de Si, GaAs e InP devido as doses de elétrons com energia de 1 MeV.

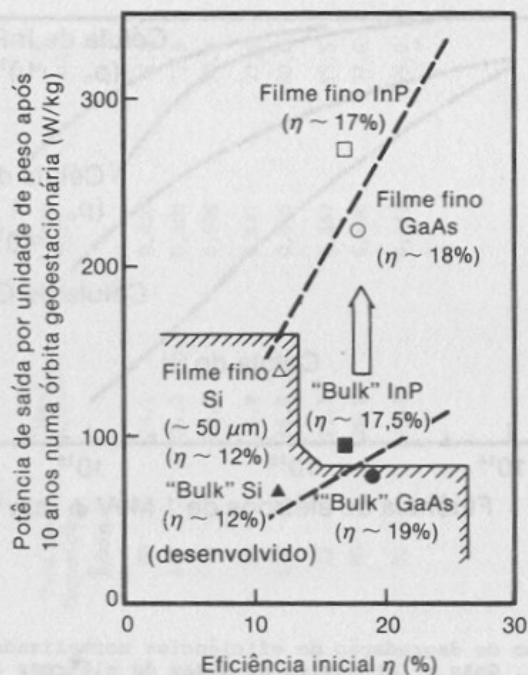


Fig. 2. Potência disponível por unidade de peso, após 10 anos numa órbita geoestacionária, de diversos tipos de células solares. As células abaixo da linha reforçada com traços já foram desenvolvidas.

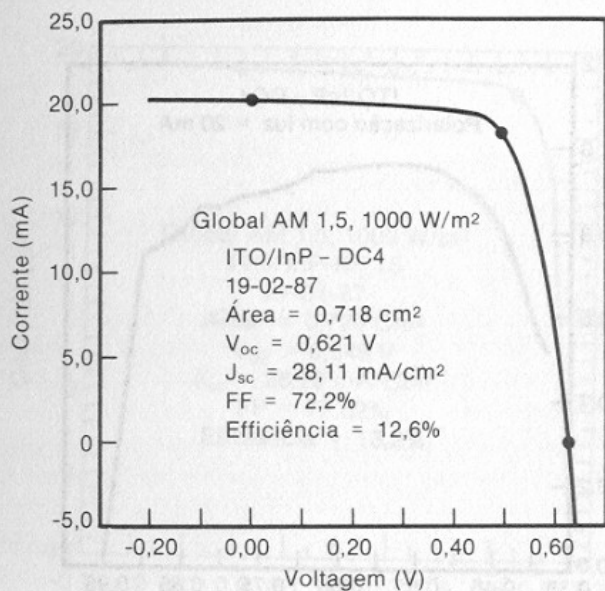


Fig. 3 Características de corrente com a voltagem de células solares de ITO/InP, com os filmes finos de óxido de índio-estanho depositados por pulverização catódica de magnetron tipo CC, a uma taxa de 50 Å/min, sob condições de AM 1,5, global, 1000 W/m².

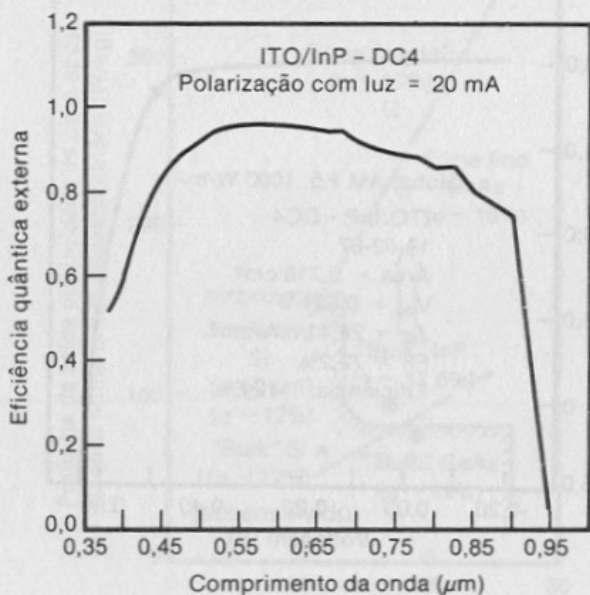


fig. 4. A variação espectral da eficiência quântica externa da célula solar de fig. 3.

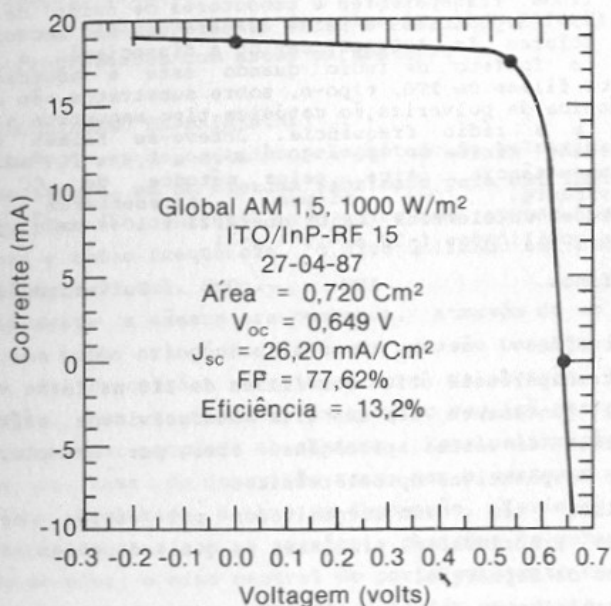


Fig. 5. Características de corrente com a voltagem de células solares de ITO/InP, com os filmes finos de ITO depositados por pulverização catódica de magnetron tipo RF, a uma taxa de 50 Å/min, sob condições de AM 1,5, global, 1000 W/m².