

Camada Antirefletora de Carbono Amorfo em Células Fotovoltaicas de Silício Cristalino

Douglas Soares da Silva¹ – dsoares@ifi.unicamp.br

Mark Anthony Barrios Mamani¹ – vicius21_4@hotmail.com

Marina Rogrigues de Aguiar² – mraguiar@ccs.unicamp.br

Andresa Deoclidia Soares Côrtes³ – andresac@fem.unicamp.br

Myriano Henriques de Oliveira Junior¹ – myriano@ifi.unicamp.br

Francisco das Chagas Marques¹ – marques@ifi.unicamp.br

¹Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Física Gleb Wataghin - IFGW

²Universidade Estadual de Campinas, Centro de Componentes Semicondutores - CCS

³Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica - FEM

3.2 Células Fotovoltaicas

Resumo. O presente trabalho apresenta um estudo do comportamento de uma estrutura de carbono amorfo tipo polimérico (PLC – polymeric like carbon) como camada antirefletora em células solares de silício cristalino. Os diversos filmes de PLC foram obtidos pela técnica de glow discharge, variando-se o tempo de crescimento e o tipo de substrato. Primeiramente, as características ópticas (transmissão e reflexão integrada) tanto dos substratos de silício cristalino como dos filmes de PLC foram avaliadas. Depois, camadas de PLC em condições otimizadas foram depositadas sobre um conjunto de células solares e seu comportamento como camada antirefletora foi estudado. Observaram-se melhorias em torno de 34% na eficiência das células, quando comparadas com células sem camada antirefletora. Estes resultados assemelham-se ao de outras estruturas antirefletoras, como SnO₂, porém, com a vantagem da estrutura de PLC ser menos prejudicial ao meio ambiente.

Palavras-chave: Células solares, Camada Antirefletora, Carbono Amorfo.

1. INTRODUÇÃO

Células solares para conversão fotovoltaica são dispositivos semicondutores que apresentam um grande potencial de aplicação e crescimento no mundo. A energia solar, abundante e limpa, compensa uma baixa eficiência de conversão. O máximo de rendimento previsto teoricamente na conversão de uma célula fotovoltaica à base de silício monocristalino é de aproximadamente 29% (Tiedje, 1984). O impacto econômico da alta do barril de petróleo, a procura por uma diversificação da matriz energética e o desenvolvimento de uma tecnologia importante (a dos semicondutores) impulsionam ainda mais o ambiente de pesquisa em conversão fotovoltaica no país. Neste sentido este trabalho apresenta um estudo de elementos alternativos na confecção e desenvolvimento de células de silício cristalino. A utilização de carbono amorfo (a-C) como camada antirefletora visa substituir as camadas de SnO₂ ou camadas duplas de ZnS/MgF₂, entre outras. De acordo com Alaluf (1995) e Litovchenko (2001), deposição de camadas antirefletoras de carbono sobre células solares resulta em melhoras de cerca de 30% na eficiência destes dispositivos. As camadas antirefletoras podem ser confeccionadas de modo a garantir a máxima absorção de radiação na faixa do espectro solar que o silício responde mais ativamente e refletir comprimentos de onda no infravermelho de modo a evitar perdas de eficiência do dispositivo em questão por efeitos térmicos. Durante o dia, a temperatura da célula pode variar consideravelmente devido à radiação solar, provocando o decréscimo da tensão de circuito aberto (V_{oc}) e tendo como consequência uma redução da potência e do rendimento da célula (Akhmatov, 1998).

Existem várias técnicas de deposição que podem ser empregadas no crescimento de filmes de carbono amorfo. Algumas delas utilizam fontes sólidas de carbono (Godet, 1998), como por exemplo, a técnica de FCVA (*Filtered Cathodic Vacuum Arc*) e *sputtering*, que extraem átomos de C e íons C⁺ do grafite. Em outras técnicas, carbono é extraído de fontes gasosas como no caso do metano, normalmente empregado na deposição de a-C por *glow discharge*. De acordo com a literatura, filmes de carbono amorfo crescidos por *glow discharge* no anodo são do tipo poliméricos (PLC – *polymeric like carbon*), altamente hidrogenados, pois são resultantes da decomposição de hidrocarbonetos (Godet, 1998). Dentre as características conhecidas estão alto *gap* óptico, baixa dureza e tensão mecânica (*stress intrínseco*), além de ser fotoluminescente na faixa do visível. Com o auxílio de espectrofotometria de transmissão e reflexão quantificamos aspectos ópticos dos filmes. As células solares foram confeccionadas no Laboratório de Pesquisas Fotovoltaicas (LPF) do IFGW.

2. EXPERIMENTAL

Os filmes de carbono do tipo polimérico foram preparados por *glow discharge* utilizando metano como fonte de carbono. O aparato consiste em uma câmara de vácuo conectada a um sistema composto por uma bomba mecânica e uma turbo-molecular. Substratos de silício polido nas duas faces e vidro *corning glass 7059* (CG-7059) foram presos ao anodo do sistema de eletrodos e utilizados como base para o crescimento dos filmes. A Tab. 1 apresenta um resumo das condições de deposição dos filmes de carbono. São apresentados, também, os respectivos valores das espessuras dos filmes.

Tabela 1 – Condições e resultados dos filmes de PLC investigados.

Condições → Bias: 400 V / Pressão: 10 x 10 ⁻³ mBar / Gás: CH ₄			
Amostra	Tempo [min]	Espessura no silício [nm]	Espessura no vidro [nm]
A	20	85±6	85±7
B	21	60±6	80±7
C	22	100±6	70±6
D	23	73±6	73±6
E	25	100±6	100±6
F	30	140±9	115±8
G	40	152±10	175±11
H	50	185±11	182±12
I	60	220±15	212±16

Como informação dos ensaios descritos, obtivemos a taxa de deposição do sistema a qual permite a caracterização das condições de deposição de nossa câmara.

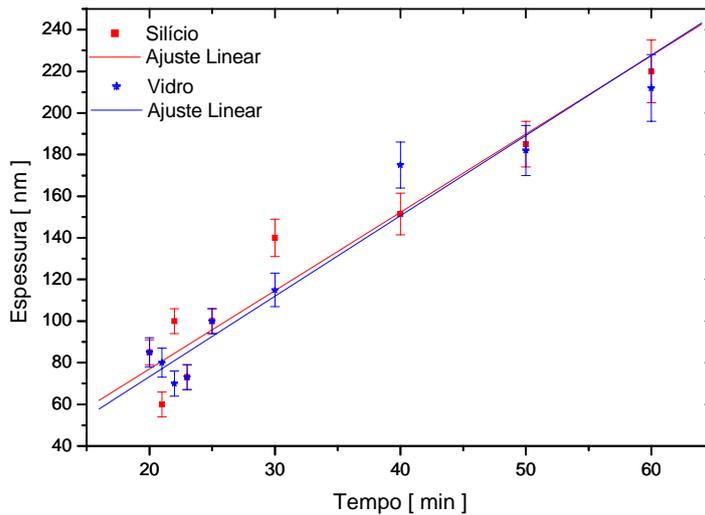


Figura 1 – Taxa de deposição do sistema de *glow discharge*.

Os espectros de transmissão foram obtidos a partir de um espectrofotômetro Perkin Elmer modelo Lambda 9 – UV – ultra violeta, VIS - visível, NIR – infravermelho próximo. Devido ao *gap* do silício, que é de aproximadamente 1,12 eV, comprimentos de onda inferiores à 1100 nm não são transmitidos pelo material pois são absorvidos no processo de excitação de elétrons da camada de valência para a camada de condução, assim sendo, para inferência sobre as características de transmissão do filme de PLC no espectro do visível (400 – 700 nm) foram utilizados substratos de vidro CG-7059. A faixa espectral foi estendida para além da porção visível do espectro, investigamos de 300 – 2000 nm. Os comprimentos de onda referentes à região do infravermelho próximo foram observados para verificar se a camada antirefletora transmite ou não radiação nesta faixa de energia.

A confecção das células solares de junção p-n é feita pelo método convencional de difusão de fósforo. Inicialmente as lâminas de Si são limpas quimicamente, em seguida são aquecidas a aproximadamente 900 °C sob um fluxo de POCl₃ para permitir a difusão, formando assim uma camada de depleção no dispositivo. Em seguida, evaporam-se contatos metálicos na parte posterior (Al – Ti – Pd – Ag) e na parte frontal (Ti – Pd – Ag) das lâminas recobertas por máscaras de modo a não bloquear completamente a passagem de radiação. Um tratamento térmico é realizado para passivar e/ou recozer os contatos. Por fim a camada antirefletora é depositada.

Para a caracterização da célula contamos com um simulador solar adaptado (Marques, 1984), que é formado basicamente por uma lâmpada de tungstênio-halogênio, um sistema de exaustão para a lâmpada e uma base de apoio que é responsável pelo contato elétrico da célula com a fonte/medidor (KEITHLEY 238 *High Current Source Measure*

Unit). A lâmpada é alimentada por uma fonte estabilizada 120 Vcc/15 A e a aquisição de dados é realizada por meio de uma interface sistema-computador.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os principais resultados foram os espectros de transmissão e reflexão dos filmes, seguida da análise da curva corrente-tensão das células solares para determinar a influência das camadas antirefletoras nas células.

3.1 Espectros Ópticos

A resposta dos filmes em relação à radiação incidente foi fundamental para a busca da melhor condição de deposição do filme de PLC na célula. As Figs. 2 e 3 apresentam o resumo dos resultados em relação à análise de transmissão e de reflexão integrada dos filmes depositados.

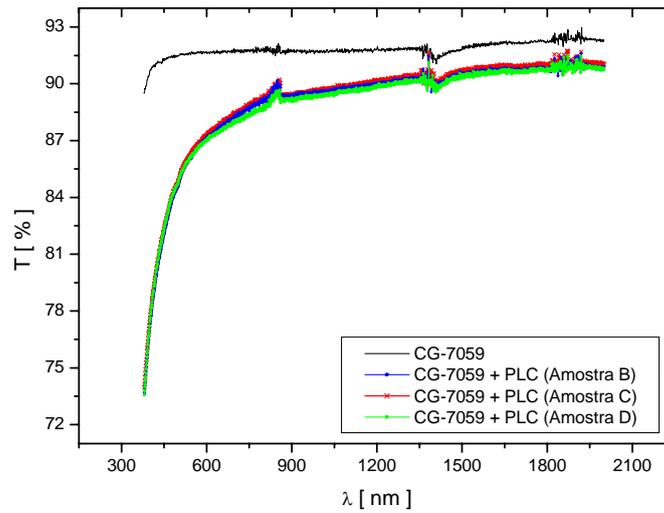


Figura 2 – Espectro de transmitância de três dos melhores filmes.

Pode-se ver na Fig. 2 que o efeito do filme de carbono amorfo tipo polimérico altera de maneira significativa a transmitância na faixa do ultravioleta. O valor da atenuação da radiação que atravessa o filme de carbono amorfo nestes comprimentos de onda é de 10 a 15 %, bem maior que no restante do espectro onde esta diferença fica próximo à 5%.

Na Fig. 3 são apresentados os espectros de refletância dos filmes. Observa-se um grande decréscimo na fração da radiação refletida. No comprimento de onda em torno de 600 nm, a melhora da refletividade fica em torno de 78%, passando de 38% de refletividade para apenas 8% (amostra C).

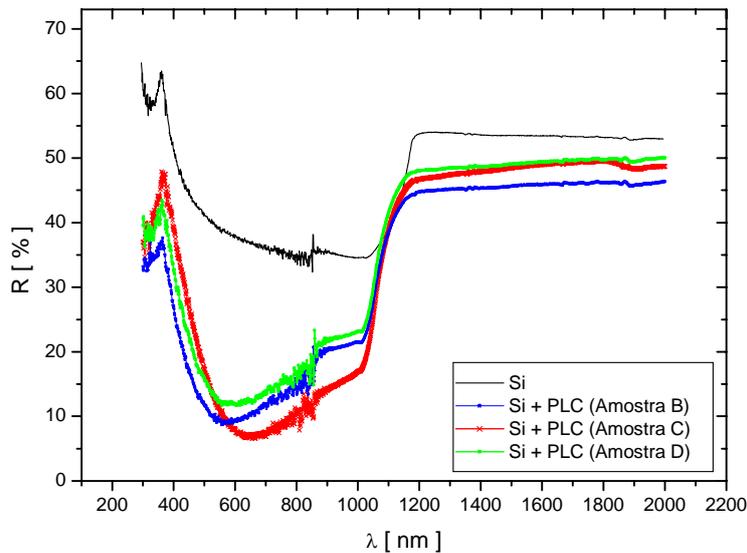


Figura 3 – Espectro de reflexão de três dos melhores filmes comparados ao substrato.

3.2. Curva I x V

Considerando os resultados apresentados nas Figs. 2 e 3, observamos que a amostra C é a que promove a menor reflexão na faixa de interesse. Estas condições foram então utilizadas para a deposição de camadas antirefletoras em células solares. Assim, depositamos filmes de aproximadamente 100 nm de PLC sobre as células e comparamos as mudanças nos parâmetros operacionais dos dispositivos fotovoltaicos. A resposta das células à camada antirefletora está resumidamente colocada na Tab. 2, contendo as principais propriedades das células examinadas antes e após a deposição do PLC.

Tabela 2 – Caracterização das células com e sem camada antirefletora (Irradiância 1000 W/m²).

Célula	ANTES				DEPOIS			
	V _{oc} [mV]	J _{cc} [mA/cm ²]	FF [%]	η [%]	V _{oc} [mV]	J _{cc} [mA/cm ²]	FF [%]	η [%]
1	589	24,0	55,0	7,8	595	33,8	52,4	10,5
2	598	25,5	57,1	8,7	598	34,1	57,5	11,7

(Legenda: V_{oc} = tensão de circuito aberto, J_{cc} = densidade de corrente de curto-circuito, FF = fator de forma e η = eficiência)

A Fig. 4 mostra as curvas de corrente versus tensão antes e após a deposição da camada antirefletora da célula 1 (ver Tab. 2). Observa-se que a maior diferença está no aumento da corrente de curto-circuito, como resultado da redução na reflexão das células.

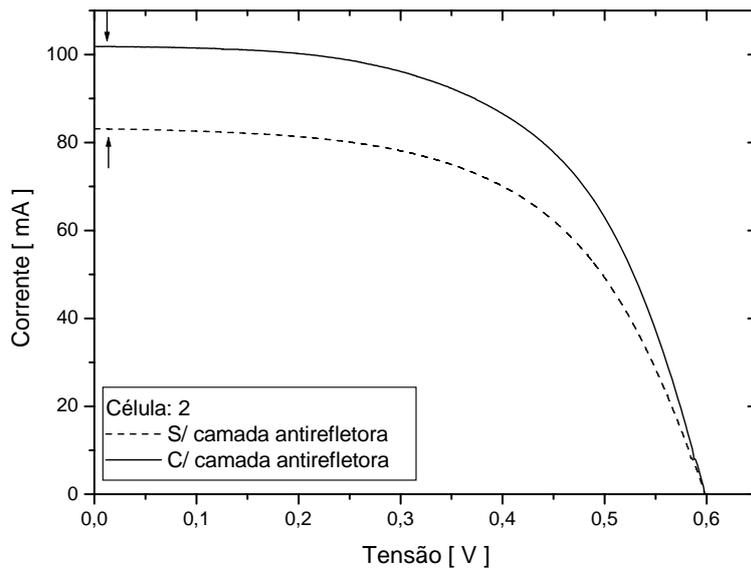


Figura 4 – Curva de corrente versus tensão da célula solar 2, antes e após receber camada de carbono polimérico, em destaque a variação da corrente de curto-circuito.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho investigamos o efeito do uso de camada antirefletora de carbono amorfo depositado pela técnica de *glow discharge* em células solares convencionais de junção p-n. Os filmes depositados têm características poliméricas, com alta banda proibida, apropriado para uso como camada antirefletora. Foi observado que a estrutura de carbono contribui para um decréscimo da perda de radiação incidente por reflexão da ordem de 75 % na faixa do espectro visível. O principal efeito foi o de elevação da corrente de curto-circuito, indicando que a camada antirefletora possibilitou que um maior número de fótons ultrapassasse a interface ar/silício sem ser refletida, alcançando a região ativa da célula gerando um maior número de processos de criação de pares elétrons-buracos, que por sua vez contribuem para o aumento da corrente gerada. A utilização de PLC como camada antirefletora possibilitou aumentos de aproximadamente 34 % na eficiência das células. Vale ressaltar que estes resultados são equivalentes aos obtidos com a utilização de camadas antirefletoras de SnO₂ ou, até mesmo, de ZnS/MgF₂, porém, como a camada de PLC é composta apenas por carbono, tem a vantagem de se tratar de uma estrutura mais limpa em relação ao meio ambiente.

Agradecimentos

Os autores agradecem a colaboração de Maria Izabel Luiz Guimarães Romeiro na preparação e confecção de filmes de PLC, o auxílio do engenheiro Antônio Carlos da Costa com as medidas de espectrofotometria no Laboratório de Ensino de Óptica. Agradecemos também à FAPESP e ao CNPq pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- Akhmatov, V. Galster, G. and Larsen, E. 1998. Questionable effects of antireflective coatings on inefficiently cooled solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 56, pp. 17.
- Alaluf, M. Appelbaum, J. Klibanov. L. Brinker, D. Scheiman, D. and Croitoru, N. 1995. Amorphous diamond-like carbon films – a hard anti-reflecting coating for silicon cells, *Thin Solid Films*, vol. 256, pp. 1.
- Godet, C. Heitz, T. Bourée, J. E. and Drévilion, B. 1998. Growth and composition of dual-plasma polymer-like amorphous carbon films, *Journal of Applied Physics*, vol. 84, n. 7, pp. 3919.
- Litovchenko, V.G. and Klyui, N. I. 2001. Solar cells based on DLC film – Si structures for space application, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 68, pp. 55.
- Marques, F. C. 1984. Células Solares com Estrutura Semicondutor-Isolante-Semicondutor (SIS) – $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/(\text{n})\text{Si}$. Tese de Mestrado. IFGW, UNICAMP, Campinas.
- Tiedje, T., Yablonovitch, E., Cody, G. D, and Brooks, B. G. 1984. Limiting efficiency of silicon solar cells. *IEEE Trans. Electr. Dev.*, vol. ED-31.

AMORPHOUS CARBON ANTIREFLECTIVE COATING ON CRISTALINE SILICON SOLAR CELLS

Abstract. *The use of polymeric amorphous carbon (PLC) as antireflective coating on crystalline silicon solar cells is been investigated. The optical characteristics (transmission and integrated reflection) of the PLC films deposited by glow discharge technique were studied using visible and near-infrared spectrophotometer. The deposition rate and film thickness were optimized for antireflective purpose on silicon substrate. Finally, conventional solar cells were fabricated through standard procedures, but using the PLC thin films as antireflective coating. An increase in the order of 34% in the solar cells efficiency was obtained. This result is similar to other antireflective structures such as SnO_2 , however harmless to the environment.*

Key Wors: *Solar Cell, Antireflective Coating, Amorphous Carbon.*