

## DESENVOLVIMENTO DE CAMADAS ANTIREFLETORAS PARA UTILIZAÇÃO EM CÉLULAS SOLARES DE SILÍCIO DE USO ESPACIAL

M. Cid, C.A. S. Ramos, N. Stem, C. Brunetti, e A. F. Beloto\*  
Laboratório de Microeletrônica - Depto de Engenharia Eletrônica  
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
P.O Box. 61548, Zip code 05424-970, São Paulo, Brasil  
\* Inst. Nac. de Pesq. Espaciais - INPE, e-mail: mcid@lme.usp.br

Palavras chave: camadas antirefletoras, células solares, uso espacial.

### RESUMO

*Neste trabalho analisam-se os comportamentos teóricos e experimentais de diversas estruturas antirefletoras utilizadas em células solares de silício de uso espacial. Realiza-se uma comparação entre camadas simples de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  e uma estrutura antirefletora composta por dupla camada de  $\text{MgF}_2$ - $\text{ZnS}$ , depositadas sobre superfícies polidas. As otimizações teóricas e experimentais foram realizadas através da utilização das curvas de reflexão e das densidades de corrente de curto-circuito de cada uma das estruturas analisadas. As densidades de corrente de curto-circuito obtidas a partir das refletividades experimentais foram:  $44,05 \text{ mA/cm}^2$  para o caso da dupla camada ( $\text{MgF}_2$ - $\text{ZnS}$ ), enquanto que para as camadas simples de  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  e  $\text{SiO}_2$  as correntes obtidas foram,  $41,26 \text{ mA/cm}^2$  e  $39,02 \text{ mA/cm}^2$  respectivamente. Estes resultados podem ser comparados com o valor máximo da densidade de corrente de curto-circuito de  $46,33 \text{ mA/cm}^2$ , supondo um caso ideal com reflexão zero. Como resultado da comparação entre as estruturas analisadas ficou comprovado que tanto as curvas de reflexão quanto as densidades de correntes de curto-circuito para o caso da camada dupla são menos sensíveis à variação da espessura se comparadas aos casos das camadas simples.*

### ABSTRACT

*This paper summarizes a theoretical-experimental optimization of several antireflection structures for crystalline silicon solar cells for space use. The work was made using  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  single layer and  $\text{MgF}_2$ - $\text{ZnS}$  double layer over polished surfaces. The optimization was made using reflection curves and short-circuit current densities, which were obtained from each of the analysed structures. Experimental short-circuit current density of  $44,05 \text{ mA/cm}^2$  was obtained for  $\text{MgF}_2$ - $\text{ZnS}$  double layer, while for  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  and  $\text{SiO}_2$  single layer the results were  $41,26 \text{ mA/cm}^2$  and  $39,02 \text{ mA/cm}^2$  respectively. These results were compared with maximum short-circuit current density of  $46,33 \text{ mA/cm}^2$  for a standard cell with no reflection. Reflection curves and short-circuit current densities of double layer are less sensitive to thickness variation, when compared with single layer ones.*

### INTRODUÇÃO

Diversas estruturas antirefletoras têm sido utilizadas visando a diminuição da reflexão em células solares de alto rendimento de usos espacial e terrestre, [1],[2],[3]. A diversidade de propostas é muito ampla, cobrindo desde camadas simples de  $\text{SiO}_2$  até complexas estruturas com dupla camada sobre superfícies texturizadas com pirâmides invertidas. Neste trabalho foi realizada uma otimização teórico-experimental de diversas camadas antirefletoras simples, de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ , e duplas de  $\text{MgF}_2$ - $\text{ZnS}$ , com o objetivo de diminuir as perdas por reflexão na superfície frontal das células solares de silício de alto rendimento. Os cálculos teóricos foram realizados utilizando a teoria da óptica clássica [4],[5]. As camadas antirefletoras experimentais de  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  e  $\text{MgF}_2$ - $\text{ZnS}$  foram depositadas através de equipamentos à vácuo, enquanto que as camadas de  $\text{SiO}_2$  foram obtidas em fornos de alta temperatura de tubo aberto. As espessuras das camadas antirefletoras foram medidas através de elipsometria enquanto que as curvas de reflexão hemisféricas foram obtidas através de espectrofotometria.

### OBTENÇÃO DAS CAMADAS ANTIREFLETORAS

A camada experimental de  $\text{SiO}_2$  foi obtida através de tubo aberto à temperatura de  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 200 minutos. As camadas de  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  e  $\text{MgF}_2$ - $\text{ZnS}$  foram depositadas por feixe de elétrons com a espessura monitorada através de um cristal de quartzo. A camada de  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  foi depositada utilizando-se um cadinho de grafite, taxa de deposição  $1-2 \text{ \AA/seg.}$ , pressão parcial de oxigênio de  $2-5 \times 10^{-5} \text{ mbar}$ , com a temperatura do substrato em torno de  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ . No caso da camada dupla, o  $\text{ZnS}$  foi depositado utilizando-se um cadinho de cobre, a taxa de deposição foi de  $2-3 \text{ \AA/seg.}$  com o substrato à temperatura de  $125 \text{ }^\circ\text{C}$ . O  $\text{MgF}_2$  foi depositado utilizando-se um cadinho de grafite, com uma taxa de  $3-5 \text{ \AA/seg}$  e com  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  como temperatura do substrato.

### COMPARAÇÃO TEÓRICO-EXPERIMENTAL

O critério de otimização seguido baseou-se na obtenção da mínima reflexão da estrutura antirefletora analisada, para um comprimento de onda correspondente ao valor máximo

do fluxo fotônico do espectro solar, levando em consideração a efetividade de coleção através da eficiência quântica interna de uma célula padrão. Para simplificar os cálculos teóricos, o índice de refração do silício foi admitido como dependente do comprimento de onda, enquanto que para o caso das camadas dielétricas o índice foi considerado como constante. Novamente, por razões de simplicidade, admitiu-se zero na parte imaginária do índice de refração do silício e nos materiais utilizados como camadas antirefletoras, supondo ambos como materiais pouco absorventes [6]. Assim, utilizou-se a densidade de corrente de curto-circuito, visando a melhor maneira de comparar a qualidade das diferentes camadas antirefletoras, considerando o fluxo fotônico do espectro solar AM0 [7], e a eficiência quântica interna de uma célula considerada como padrão.

Assim, a densidade de corrente de curto-circuito pode ser escrita como:

$$J_{SC} = q \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda)(1 - R(\lambda)) Q_i(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

Sendo,  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  os limites de comprimento de onda (350 nm - 1100 nm).  $F(\lambda)$ , o fluxo fotônico do espectro solar, normalizado à 135,3 mW/cm<sup>2</sup>. As Refletividades  $R(\lambda)$  foram calculadas teoricamente através de um programa de computador desenvolvido especificamente para esta análise, sendo que as medidas experimentais foram obtidas através de um espectrofotômetro. A eficiência quântica interna  $Q_i(\lambda)$ , foi medida nos laboratórios Sandia (centro de referência na medida de dispositivos fotovoltaicos) e corresponde a uma célula solar otimizada, com resistividade de base  $\rho = 21 \Omega \cdot \text{cm}$ , e com campo retrodifusor formado por alumínio [8].

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na otimização teórica realizada foram supostos os seguintes índices de refração, ( $\text{SiO}_2$ ,  $n = 1,48$ ;  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $n = 2,1$ ;  $\text{MgF}_2$ ,  $n = 1,38$  e  $\text{ZnS}$ ,  $n = 2,33$ ). Os resultados das reflexões teóricas e experimentais podem ser vistos nas figuras 1, 2 e 3. As reflexões estão representadas como uma função do comprimento de onda, para as camadas antirefletoras de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  e  $\text{MgF}_2$ - $\text{ZnS}$  respectivamente. A figura 1 mostra o caso de duas camadas simples de  $\text{SiO}_2$  com 102,0 nm e 97,6 nm de espessura. Neste caso observa-se um razoável ajuste entre as curvas teórica e experimental, apesar da diferença observada entre as espessuras das camadas. A elevada reflexão encontrada no caso teórico para curtos comprimentos de onda deve-se à simplificação comentada anteriormente, que supõe zero na parte imaginária do índice de refração do material utilizado como camada antirefletora. Por outro lado, o aumento da refletividade para longos comprimentos de onda, no caso da curva experimental, deve-se à reflexão da luz na superfície posterior da célula, entretanto, este efeito não foi considerado no cálculo teórico. O erro na densidade de

corrente de curto-circuito ( $J_{sc}$ ) e devido às duas simplificações citadas anteriormente, pode ser desprezado, uma vez que o fluxo de fótons do espectro solar para estas regiões (comprimentos de onda, curtos e longos) é muito baixo.

Na tabela I pode ser observado um resumo dos resultados em termos de densidade de corrente de curto-circuito ( $J_{sc}$ ). Como referência e como auxílio, na comparação para a verificação da qualidade das camadas antirefletoras estudadas, apresenta-se o valor máximo da  $J_{sc}$  obtida supondo absorção total. Da mesma forma são dadas as densidades de corrente de curto-circuito, relacionadas com cada curva teórica e experimental, cada uma delas associada à sua espessura. As perdas de corrente, devido à utilização de cada estrutura antirefletora, também são calculadas através da relação entre os valores da  $J_{sc}$  teóricos ou experimentais e o  $J_{sc}$  máximo. Assim, para 102,0 nm e 97,6 nm de espessuras de  $\text{SiO}_2$ , as densidades de corrente de curto-circuito calculadas através das curvas de reflexão teórica e experimental são 39,45 mA/cm<sup>2</sup> e 39,02 mA/cm<sup>2</sup> respectivamente, enquanto que as perdas relacionadas com o máximo de corrente, são de 14,8 % e 15,8 %. O comportamento observado na figura 1, para curtos e longos comprimentos de onda, deve-se aos mesmos fatores considerados previamente, podendo ser desprezados.

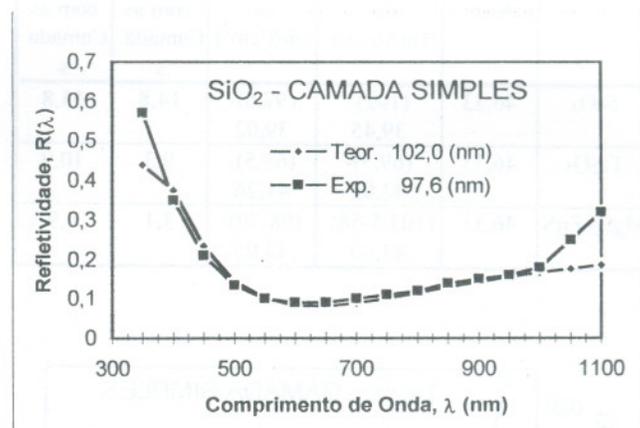


Figura 1: Curvas de refletividade teórica e experimental em função do comprimento de onda - (Camada simples de  $\text{SiO}_2$  sobre superfície polida).

Para o caso da camada de  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ , as densidades de corrente de curto-circuito são 42,02 mA/cm<sup>2</sup> e 41,26 mA/cm<sup>2</sup>, sendo as perdas associadas de 9,3 % e 10,9 %, para os casos teórico e experimental respectivamente. Na figura 2 observa-se um excelente ajuste entre as curvas teórica e experimental, exceto para os casos de curtos e longos comprimentos de onda. Na figura 3 são mostrados os resultados para a dupla camada de  $\text{MgF}_2$ - $\text{ZnS}$ . Nesta figura também pode ser observado um razoável ajuste entre a curva teórica e a experimental, com espessuras de 103,5 nm - 58 nm e 98 nm - 70 nm, respectivamente. Da mesma forma, não encontrou-se um bom ajuste teórico-experimental para as regiões de curtos e longos comprimentos de onda, como comentado previamente.

Neste caso específico, as espessuras experimentais das camadas obtidas não estão muito ajustadas aos valores ótimos obtidos para o caso teórico. Entretanto, devido ao fato de que as camadas duplas apresentam dois mínimos de reflexão, podem ser obtidos baixos valores de reflexão experimental ao longo de uma extensa região de comprimentos de onda. Desta forma, observa-se que as espessuras das camadas individuais em uma estrutura de dupla camada não são parâmetros críticos na obtenção de bons resultados. As densidades de corrente de curto-circuito obtidas para este caso são 44,90 mA/cm<sup>2</sup> e 44,05 mA/cm<sup>2</sup>, nos casos teórico e experimental respectivamente, sendo de 3,1 % e 4,9 % as perdas observadas.

TABELA I: Resultados teóricos e experimentais de camadas simples e duplas. Os Valores de J<sub>SC</sub> máximo (0% de perdas) assume absorção total. São apresentados também os valores da J<sub>SC</sub> teórica e experimental associada com cada tipo e espessura de estrutura e o erro produzido quando comparado com o máximo de corrente obtida em cada caso.

Tipos de Camadas	J <sub>SC</sub> (0% de perdas mA/cm <sup>2</sup> )	Otimiz. Teórica W(nm) - J <sub>SC</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	Result. Experim. W(nm) - J <sub>SC</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	Teórico Δ <sub>r</sub> (%), Perdas com as Camadas	Exper. Δ <sub>r</sub> (%), Perdas com as Camadas
SiO <sub>2</sub>	46,33	(102)-39,45	(97,6)-39,02	14,8	15,8
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	46,33	(69,5)-42,02	(68,5)-41,26	9,3	10,9
MgF <sub>2</sub> -ZnS	46,33	(103,5-58)-44,90	(98-70)-44,05	3,1	4,9

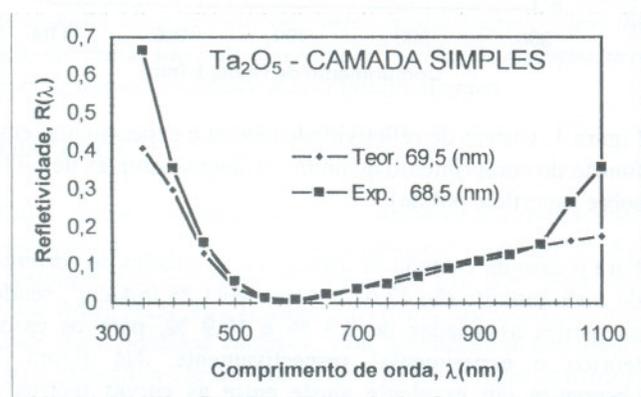


Figura 2: Curvas de refletividade teórica e experimental como função do comprimento de onda - (Camada simples de Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sobre superfície polida).

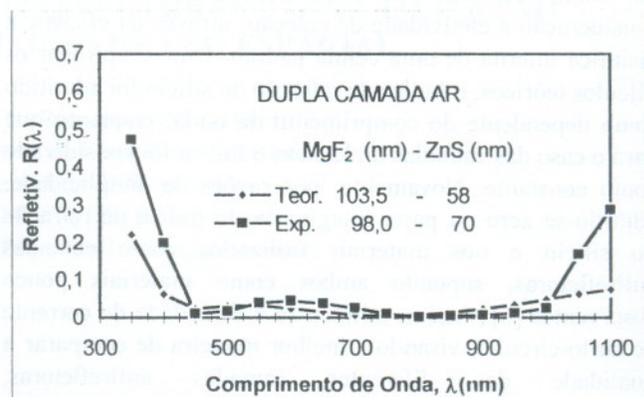


Figura 3: Curvas de refletividade teórica e experimental em função do comprimento de onda - (Camada dupla de MgF<sub>2</sub>-ZnS sobre superfície polida).

### CONCLUSÕES

Foram realizadas otimizações e comparações entre diversas estruturas antirefletoras através da análise da densidade de corrente de curto-circuito e de suas respectivas espessuras. As previsões teóricas foram utilizadas para se comparar com os desenvolvimentos experimentais, tendo sido alcançados excelentes resultados, principalmente, para a estrutura antirefletora composta pela dupla camada, em cujo desenvolvimento residia o principal objetivo deste trabalho. Também foi possível comprovar que tanto as curvas de reflexão como as densidades de corrente de curto-circuito, para o caso da camada dupla, são menos sensíveis à variação das espessuras das camadas individuais que a compõe, quando comparadas com as estruturas antirefletoras baseadas em camadas simples. Este comportamento permite a obtenção de baixos valores de reflexão em uma ampla margem de comprimentos de onda, embora as espessuras das camadas experimentais não estejam muito próximas dos valores obtidos na otimização teórica.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Luiz Carlos M. Lavras do Laboratório de Óptica Aplicada do Instituto de Estudos Avançados/CTA, pela contribuição para a obtenção das camadas de Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Este trabalho foi realizado com os apoios da Agência Espacial Brasileira (AEB), Projeto UNISAT (Consórcio de Universidades), FAPESP, sob contrato nº 95/09435-0, e RHA/E/CNPq, sob contrato nº 610009/97.4.

### BIBLIOGRAFIA

[1]. H. Washio, T. Katsu, Y. Tonomura, T. Hisamatsu, T. Saga, A. Suzuki, M. Uesugi, T. Tamura and S. Matsuda, 11th E. C. Photovoltaic Solar Energy Conference, Montreux, Switzerland, October 1992, pp. 430 - 433.  
 [2]. P. Uebele, K. H. Tentscher, R. Kern, S. Mattes, K. D. Rasch, W. Schmidt, F. Schomann, G. Strobl, 12th

European Photovoltaic Solar Energy Conference, Amsterdam, The Netherlands, April 1994, pp. 67 - 69.

[3]. J. Zhao, A. Wang, S. R. Wenham and M. A. Green, 24th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Hawaii, December 1994, pp. 1477 - 1480.

[4]. M. Born and E. Wof, Principles of Optics, 5th edn, Pergamon, New York, 1975.

[5]. A. Nussbaum and R. A. Phillips, Contemporary Optics for Scientists and Engineers, Englewood Cliffs, Prentice - Hall, NJ, 1974.

[6]. J. Zhao and Martin A. Green, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 38, nº 8, August 1991, pp. 1925 - 1934.

[7]. M. P. Thekackara, A. J. Drummond, D. G. Murcray, P. R. Gast, E. G. Laue and R. C. Willson, "NASA SP 8005.

[8]. A. Cuevas and M. A. Balbuena, 8th European Communities Photovoltaic Solar Energy Conference, Florence, Italy, May 1988, Dordrecht, The Netherlands, Kluwer, 1988, pp. 1186 - 1191.

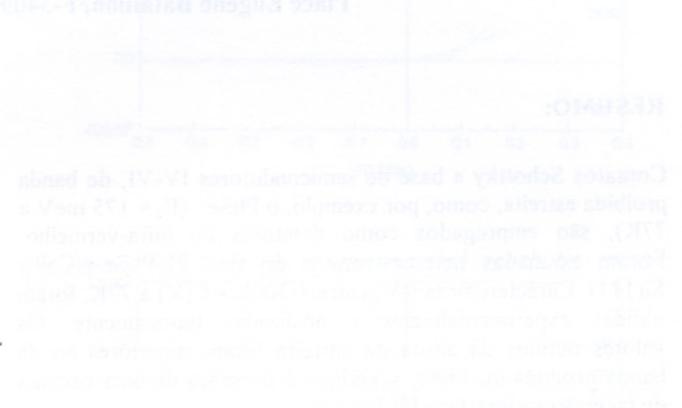


Fig. 1. Current density vs. voltage characteristics of the solar cell.

The solar cell characteristics are shown in Fig. 1. The open circuit voltage is 0.6 V and the short circuit current density is 0.9 A/cm<sup>2</sup>. The maximum power point is at 0.4 V and 0.5 A/cm<sup>2</sup>. The fill factor is 0.75 and the efficiency is 18.5%.

The solar cell characteristics are shown in Fig. 2. The open circuit voltage is 0.6 V and the short circuit current density is 0.9 A/cm<sup>2</sup>. The maximum power point is at 0.4 V and 0.5 A/cm<sup>2</sup>. The fill factor is 0.75 and the efficiency is 18.5%.

The solar cell characteristics are shown in Fig. 3. The open circuit voltage is 0.6 V and the short circuit current density is 0.9 A/cm<sup>2</sup>. The maximum power point is at 0.4 V and 0.5 A/cm<sup>2</sup>. The fill factor is 0.75 and the efficiency is 18.5%.

The solar cell characteristics are shown in Fig. 4. The open circuit voltage is 0.6 V and the short circuit current density is 0.9 A/cm<sup>2</sup>. The maximum power point is at 0.4 V and 0.5 A/cm<sup>2</sup>. The fill factor is 0.75 and the efficiency is 18.5%.

The solar cell characteristics are shown in Fig. 5. The open circuit voltage is 0.6 V and the short circuit current density is 0.9 A/cm<sup>2</sup>. The maximum power point is at 0.4 V and 0.5 A/cm<sup>2</sup>. The fill factor is 0.75 and the efficiency is 18.5%.