

INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DO FILME ANTIRREFLEXO DE TiO₂ NOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DE CÉLULAS SOLARES COM BASE N

Moussa Ly – moussa.ly@puhrs.br

Izete Zanescio – izete@puhrs.br

Adriano Moehlecke – moehlecke@puhrs.br

Raquel Sanguiné Fagundes – raquel4600@gmail.com

Angélica Souza Cenci – angelica.scenci@gmail.com

Natália Feijó Lopes – nataliaflopess@gmail.com

Vanessa Alves Gonçalves – vanessita0304@yahoo.com.br

Deise Cristina da Silva – deise.silva@gmail.com

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Faculdade de Física, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Núcleo de Tecnologia em Energia Solar

Resumo. A redução da reflexão na superfície de células solares de silício é realizada com a deposição de filmes finos. O filme antirreflexo (AR) de TiO₂ pode ser mais adequado para células solares com emissor de boro. Porém, sabe-se que as características do filme são alteradas durante o processo de queima das pastas de metalização. Conseqüentemente, a variação do filme AR influencia na eficiência do dispositivo. O objetivo deste trabalho é analisar a variação do filme antirreflexo de TiO₂ e a influência nas características elétricas das células com emissor de boro. Para fabricar as células solares, foram depositados filmes AR de TiO₂ de diferentes espessuras e variou-se a temperatura do processo de queima das pastas de metalização para encontrar a melhor temperatura para cada espessura do filme AR. Confirmou-se a variação da espessura, da refletância e do comprimento de onda que corresponde à mínima refletância no processo de queima das pastas metálicas, para o filme AR de TiO₂, depositado pela técnica de evaporação em alto vácuo com canhão de elétrons. Para espessuras depositadas do filme de 62 nm a 103 nm, a refletância média final variou de 3 % a 4 %. A melhor eficiência média de 13,6 % foi obtida para a espessura do filme de 97 nm após o processo de queima, com refletância média de 3,3 %. O fator de forma praticamente não foi afetado pelo aumento da espessura do filme AR, porém a tensão de circuito aberto e a densidade de corrente de curto-circuito apresentaram uma tendência de crescimento com o aumento da espessura do filme AR até a espessura de 103 nm.

Palavras-chave: Células solares de Si Tipo n, Filme Antirreflexo, Temperatura de Queima

1. INTRODUÇÃO

A redução da reflexão em células solares por meio de filmes finos ocorre devido a interferência destrutiva na interação da radiação solar com o filme fino depositado sobre um substrato de maior índice de refração. Por afetar a radiação solar que penetra no material, a espessura e o material do filme antirreflexo (AR) influenciam principalmente na corrente de curto-circuito (Isc) da célula solar. Mais especificamente, a Isc depende da resposta espectral (RE(λ)) (em mA/(W.m⁻²)) da célula solar e do espectro da irradiância solar (G(λ)) (em W/(m².nm)) incidente (Zanescio e Krenzinger, 1993) e pode ser determinada por:

$$Isc = \int_0^{\infty} G(\lambda)RE(\lambda)d\lambda \quad (1)$$

Na Fig. 1. pode-se observar que o pico do espectro solar AM1,5G e da resposta espectral de uma célula solar de silício com campo retrodifusor formado pela difusão de alumínio ocorrem para comprimentos de onda (λ) diferentes, o que afeta o projeto do melhor filme AR.

Considerando que a resposta espectral depende da eficiência quântica interna (EQI), da refletância (ρ) e do fator de sombreamento (Fs), pode-se escrever a Eq.(1) da seguinte forma:

$$Isc = \frac{qA}{hc} \int_0^{\infty} G(\lambda)[1 - \rho(\lambda)](1 - Fs)EQI(\lambda)\lambda d\lambda \quad (2)$$

onde q é a carga do elétron, A é área da célula solar, h é a constante de Planck e c é a velocidade da luz. Deste modo, a

otimização do filme antirreflexo deve considerar o espectro da irradiância solar que penetra no substrato e a EQI de cada tipo de célula solar (Zhao e Green, 1991).

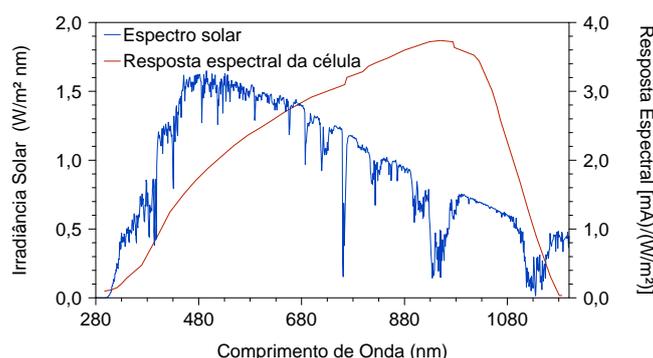


Figura 1 - Espectro solar AM1,5G e resposta espectral de uma célula solar de silício, produzida por processo industrial.

Na indústria atual de células solares, geralmente é utilizado o filme AR de nitreto de silício depositado por PECVD (*plasma enhanced chemical vapor deposition*) sobre o emissor n^+ formado pela difusão de fósforo (Ebong *et al.*, 2011). Porém, em células solares com base n , o emissor frontal é formado por boro e o filme AR de TiO_2 , além de possuir uma menor absorção que o nitreto de silício, apresenta uma melhor passivação de superfície (Thomson, Lynn e McIntosh, 2010). Por exemplo, Thomson e MacIntosh (2012) obtiveram a densidade de corrente de saturação de 90 fA/cm^2 para uma região dopada com boro com resistividade de folha de $200 \text{ } \Omega/\square$. Em uma lâmina de silício tipo n com resistividade de $5 \text{ } \Omega\cdot\text{cm}$, a velocidade de recombinação em superfície foi da ordem de 30 cm/s . Esta baixa recombinação foi atribuída a existência de cargas negativas no filme AR de TiO_2 e além disto, observou-se que a passivação foi melhorada quando a superfície foi exposta à radiação proveniente de uma lâmpada halógena (Thomson e MacIntosh, 2012), resultado conveniente para as células solares que são expostas à radiação solar.

Ly (2007) avaliou a influência da variação da espessura do filme AR de TiO_2 na corrente de curto-circuito da célula solar, a partir da simulação de células solares n^+pp^+ com programa PC-1D (Basore e Clugston, 1997). Foi usado o índice de refração constante de 2,3 e constatou-se que existe um intervalo de aproximadamente 5 nm em que a corrente de curto-circuito é máxima e que variações de 10% na espessura produzem uma redução de 1% na corrente elétrica e de 0,1% (absoluto) na eficiência. Para obter a maior I_{sc} , a espessura de TiO_2 deveria estar no intervalo de 66 nm a 70 nm .

No processo industrial de fabricação de células solares, o filme AR de TiO_2 é necessariamente submetido ao processo de queima das pastas que formam a malha de metalização e este passo térmico, realizado em fornos de esteira, pode modificar a refletância do filme. Por exemplo, Ly *et al.* (2007) observaram que o comprimento de onda onde ocorre o valor mínimo de refletância é reduzido de 15 nm a 50 nm para processos térmicos no intervalo de $850 \text{ }^\circ\text{C}$ a $980 \text{ }^\circ\text{C}$ e velocidade de esteira de 100 cm/min a 200 cm/min . Este deslocamento na curva de refletância espectral pode ser explicado por uma redução na espessura do filme AR e/ou um aumento no índice de refração. Vellejo *et al.* (2005) constataram que estas mudanças nas características do filme AR após o processamento térmico devem-se a transição da fase amorfa para uma fase parcialmente cristalina. Foi observado que depois de um tratamento térmico a $810 \text{ }^\circ\text{C}$ de filmes de TiO_2 depositados por APCVD (*atmospheric pressure chemical vapor deposition*), o índice de refração do filme passou de 1,98 para 2,21 e a espessura reduziu de aproximadamente 12 nm , produzindo um deslocamento espectral do mínimo da refletância de 45 nm (Vellejo *et al.*, 2005). Este valor é similar ao obtido por Ly *et al.* (2007) para filmes depositados por evaporação em alto vácuo com feixe de elétrons e que passaram por processo térmico a $850 \text{ }^\circ\text{C}$. Segundo Hugman *et al.* (2002), para processos térmicos realizados com temperatura entre $450 \text{ }^\circ\text{C}$ e $700 \text{ }^\circ\text{C}$, a fase observada para o filme de TiO_2 foi a anatase, com estrutura tetragonal, índice de refração de 2,49 e densidade de $3,84 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Quando a temperatura do processo térmico foi maior que $800 \text{ }^\circ\text{C}$, os espectros de raios X indicaram a presença da fase rutila, com estrutura tetragonal, índice de refração de 2,903 e a densidade de $4,26 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

Portanto, o filme AR de TiO_2 pode ser mais adequado para células solares com emissor de boro. Além disso, características do filme são alteradas durante o processo de queima das pastas de metalização, alterando a refletância. Conseqüentemente, a variação do filme AR, além de influenciar a corrente de curto-circuito, também pode afetar os outros parâmetros elétricos da célula solar. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é analisar a variação do filme antirreflexo de TiO_2 e a sua influência nas características elétricas das células com base n e emissor formado pela difusão de boro. Foram depositados filmes AR de TiO_2 de diferentes espessuras e variou-se a temperatura do processo de queima das pastas de metalização para encontrar a melhor temperatura para cada espessura do filme AR.

2. FABRICAÇÃO DAS CÉLULAS SOLARES EM BASE N COM DIFERENTES ESPESSURAS DO FILME AR DE TiO_2

Para avaliar a variação do filme AR de TiO_2 e, conseqüentemente, a influencia nos parâmetros elétricos, foram fabricadas células solares em lâminas de silício grau solar crescido pelo método Czochralski (Si-CZ), tipo n , com

emissor formado por boro. Foram depositadas as seguintes espessuras do filme AR de TiO_2 : 62 nm, 68 nm, 76 nm, 89 nm, 92 nm, 103 nm e 150 nm e para cada espessura do filme AR variou-se a temperatura de queima das pastas que formam a malha metálica. A maioria das espessuras do filme AR depositadas foram maiores que o valor determinado para células em base p, com emissor de fósforo, pois a resposta espectral de células com emissor frontal formado por boro é menor para comprimentos de onda na região do violeta-azul (Cañizo *et al.*, 2000). Além disso, a espessura do filme AR diminui durante o processo de queima das pastas de metalização.

As lâminas utilizadas foram de silício Cz, tipo n, diâmetro de $(100 \pm 0,5)$ mm, espessura de (200 ± 30) μm , orientação dos planos $\{100\}$ e resistividade de base de $1 \Omega\cdot\text{cm}$ a $20 \Omega\cdot\text{cm}$. As etapas do processo de fabricação de células solares foram: ataque anisotrópico das lâminas de silício para formação de micropirâmides, limpeza RCA (Kern, 1993), deposição por *spin-on* e secagem do dopante líquido com boro PBF20, difusão de boro em forno convencional, oxidação, deposição de resina e ataque do óxido na face posterior em solução de HF tampão, limpeza da resina e limpeza RCA, difusão de fósforo a partir de POCl_3 para formar a região de campo retrodifusor (BSF, *back surface field*), ataque do borosilicato em solução de HF, limpeza RCA, deposição de filme AR de TiO_2 , metalização por serigrafia e isolamento nas bordas por radiação laser. Para depositar o filme AR, foram usados grânulos de TiO_2 de 99,9% de pureza, colocados em um cadinho de grafite e o material foi fundido por feixe de elétrons em uma câmara mantida em alto vácuo (pressão de $8,5 \cdot 10^{-5}$ torr). A taxa de deposição do material foi mantida em $1 \text{ \AA} / \text{s}$.

As etapas deste processo de fabricação foram otimizadas e a área das células solares foi de $61,58 \text{ cm}^2$. A Fig. 2 ilustra uma célula solar fabricada. A característica da corrente elétrica em função da tensão aplicada (I-V) de todas as células solares foi medida em condições padrão de medição, isto é, espectro solar AM1,5G, irradiância incidente de 1000 W/m^2 e temperatura das células solares de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. A refletância de amostras com filme AR com diferentes espessuras também foi medida, antes e após o processo de queima, no espectrofotômetro Lambda 950, da PerkinElmer, com esfera integradora.



Figura 2 - Célula solar fabricada em Si-Cz, tipo n, com emissor de boro.

3. RESULTADOS E ANÁLISE

Na Fig. 3 compara-se a refletância das amostras com filme antirreflexo de TiO_2 com diferentes espessuras após serem submetidas ao processo de queima das pastas de metalização na temperatura de $840 \text{ }^\circ\text{C}$. Nestas amostras não foi depositada a malha de metalização. Observa-se que o mínimo da refletância desloca-se para maiores comprimentos de onda com o aumento da espessura do filme AR. Da Fig. 4, nota-se que o processo de queima afeta a refletância, deslocando o mínimo para menores comprimentos de onda, devido à redução da espessura e variação do índice de refração, causadas pela alteração da estrutura do material. Este resultado, praticamente independe da temperatura de queima no intervalo de $820 \text{ }^\circ\text{C}$ a $860 \text{ }^\circ\text{C}$, conforme mostra a Fig. 5.

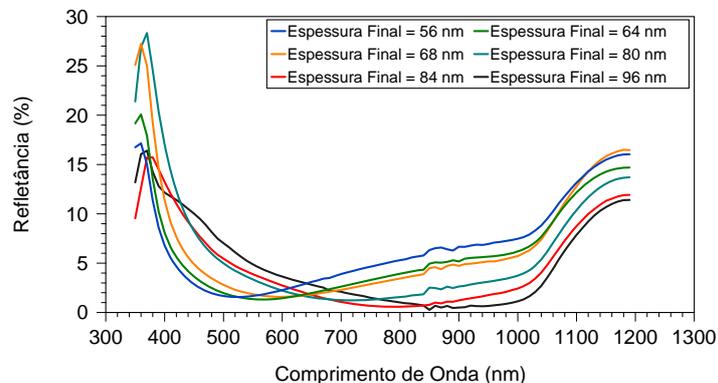


Figura 3 - Refletância das amostras com filme antirreflexo de TiO_2 com diferentes espessuras após serem submetidas ao processo de queima das pastas de metalização na temperatura de $840 \text{ }^\circ\text{C}$.

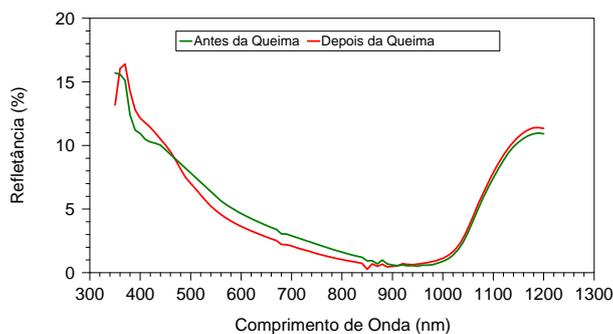


Figura 4 - Comparação da refletância da amostra com filme antirreflexo de TiO₂ com espessura depositada de 103 nm e de 97 nm após o processo de queima das pastas de metalização na temperatura de 840 °C.

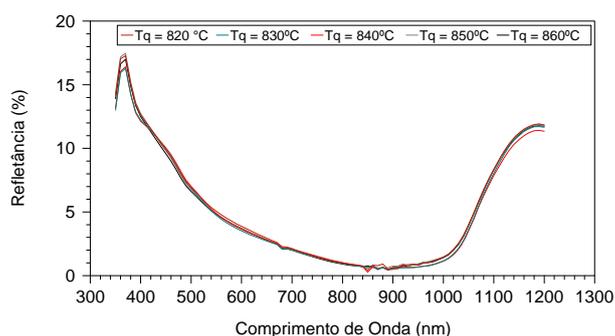


Figura 5 - Refletância das lâminas de silício com filme de TiO₂ com espessura depositada de 103 nm para diferentes temperaturas do processo térmico de queima das pastas de metalização.

Na Tab. 1 apresentam-se os resultados da espessura (d) do filme AR, da refletância média final (ρ_{Final}) no intervalo de 400 nm a 1050 nm e do comprimento de onda que corresponde à mínima refletância (λ_{min}) em função da temperatura de queima (Tq) das pastas de metalização e da espessura inicial do filme AR. Conforme esperado, para todos os casos analisados, a espessura do filme AR diminuiu após o processo de queima, resultando em valores de variação da espessura (Δd) negativos. Da Fig. 6 nota-se que com a variação de 820 °C a 860 °C, a Tq praticamente influencia a espessura do filme AR da mesma forma. Para espessuras do filme menores que 92 nm, a variação da espessura apresenta a tendência de crescer com o aumento da temperatura de queima das pastas de metalização até a Tq = 840 °C. A refletância varia de 3 % a 4 %, considerando todos os casos apresentados e o menor valor ocorre para $d_{Inicial} = 92$ nm. A variação da refletância apresenta uma relação com o aumento da espessura do filme AR. Com o processo de queima das pastas de metalização, a refletância média aumenta até $d_{Inicial} = 76$ nm e a partir deste valor, a refletância diminui. Não se observa uma relação do comprimento de onda que corresponde à refletância mínima com a temperatura de queima das pastas de metalização. Da mesma forma que a variação da espessura, observa-se que a $\Delta \lambda_{min}$ apresenta a tendência de aumentar até Tq = 840 °C, para os valores de $d_{Inicial}$ menores que 92 nm.

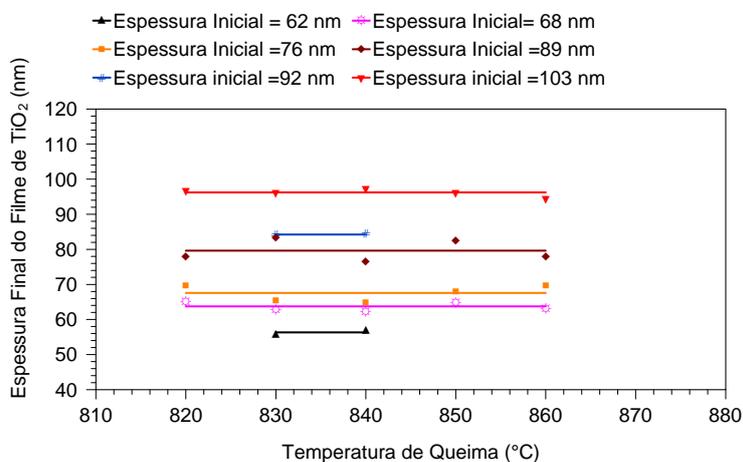


Figura 6 - Espessura final do filme AR de TiO₂ em função da temperatura de queima das pastas de metalização.

Tabela 1. Valores médios da espessura do filme AR de TiO₂ após o processo de queima (d_{Final}), variação da espessura (Δd), refletância média após o processo de queima (ρ_{Final}), variação da refletância ($\Delta\rho$), comprimento de onda que corresponde a mínima refletância ($\lambda_{MinFinal}$) após o processo de queima e variação do comprimento de onda que corresponde a mínima refletância ($\Delta\lambda_{min}$) em função da temperatura de queima (Tq) das pastas de metalização e da espessura do filme AR ($d_{Inicial}$).

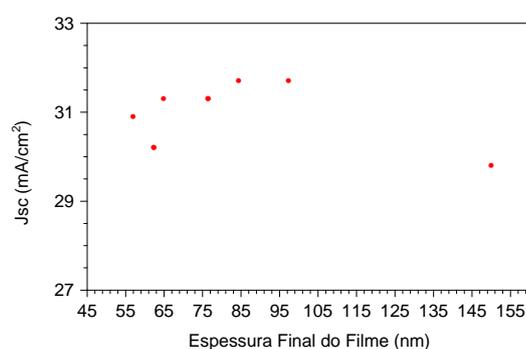
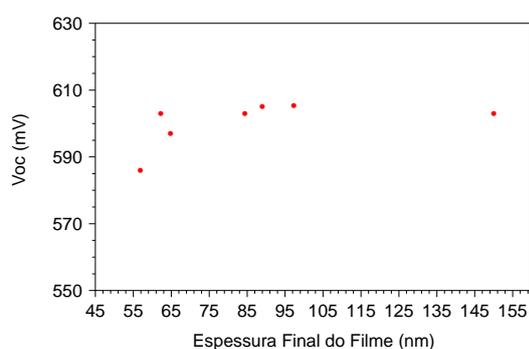
| $d_{Inicial}$ (nm) | Tq (°C) | d_{Final} (nm) | Δd (nm) | ρ_{Final} (%) | $\Delta\rho$ (%) | $\lambda_{MinFinal}$ (nm) | $\Delta\lambda_{min}$ (nm) |
|--------------------|-----------|------------------|-----------------|--------------------|------------------|---------------------------|----------------------------|
| 60,9 | 830 | 55,8 | -5,1 | 5,30 | +1,16 | 503,3 | 56,7 |
| 63,8 | 840 | 56,9 | -6,9 | 4,66 | +1,05 | 523,3 | 63,4 |
| 67,7 | 820 | 65,2 | -2,5 | 3,72 | +0,68 | 600 | 23,3 |
| 67,5 | 830 | 63,0 | -4,5 | 3,49 | +0,58 | 580 | 53,3 |
| 68,5 | 840 | 62,3 | -6,2 | 3,93 | +0,91 | 630 | 56,7 |
| 69,2 | 850 | 64,9 | -4,3 | 3,62 | +0,51 | 603,3 | 33,3 |
| 69,5 | 860 | 63,3 | -5,2 | 3,82 | +0,72 | 583,3 | 56,7 |
| 78,2 | 820 | 69,8 | -8,4 | 3,68 | +0,28 | 643,3 | 76,7 |
| 75,0 | 830 | 65,5 | -9,5 | 3,85 | +0,60 | 603,3 | 86,7 |
| 74,2 | 840 | 64,8 | -9,4 | 3,90 | +0,65 | 596,6 | 86,7 |
| 75,3 | 850 | 68,0 | -7,3 | 3,74 | +0,38 | 626,6 | 66,7 |
| 78,9 | 860 | 69,8 | -9,1 | 3,76 | +0,25 | 643,3 | 83,3 |
| 86,6 | 820 | 77,9 | -8,7 | 3,61 | -0,16 | 716,6 | 80 |
| 90,9 | 830 | 83,3 | -7,6 | 3,87 | -0,17 | 766,6 | 70 |
| 87,0 | 840 | 76,4 | -10,5 | 3,69 | -0,04 | 703,3 | 96,6 |
| 90,9 | 850 | 82,6 | -8,3 | 3,95 | -0,13 | 760 | 76,6 |
| 89,1 | 860 | 77,9 | -11,2 | 3,64 | 0,15 | 716,6 | 103,3 |
| 91,7 | 830 | 84,1 | -7,6 | 3,20 | -0,12 | 773,3 | 70 |
| 92,3 | 840 | 84,4 | -8,3 | 3,05 | -0,22 | 776,7 | 76,6 |
| 102,5 | 820 | 96,7 | -5,8 | 3,40 | -0,32 | 890 | 53,3 |
| 102,8 | 830 | 96,3 | -6,5 | 3,32 | -0,33 | 886,6 | 60 |
| 103,6 | 840 | 97,3 | -6,3 | 3,32 | -0,30 | 893,3 | 60 |
| 103,9 | 850 | 96,3 | -7,6 | 3,40 | -0,36 | 886,6 | 70 |
| 102,8 | 860 | 94,5 | -8,3 | 3,36 | -0,32 | 870 | 76,6 |

Os parâmetros elétricos médios das células solares são apresentados na Tab. 2, onde se destacam as melhores eficiências obtidas para cada espessura do filme AR. Para a maioria dos casos, para cada espessura do filme AR e temperatura de queima foram processadas de 3 a 4 células solares. Observa-se que o fator de forma é baixo, devido à pasta de alumínio utilizada para formar a malha metálica frontal. Este tipo de pasta foi desenvolvido para a metalização na face posterior das células solares e quando utilizada para formar a malha frontal aumenta a resistência em série, principalmente devido às duas barras coletoras. A maior eficiência média, de 13,6 %, ocorre para a espessura do filme inicial de 103 nm e final de 97 nm. Neste caso, a refletância média após o processo de queima das pastas de metalização foi de 3,3 %, com $\lambda_{MinFinal} = 893$ nm. O fator de forma diminuiu para a temperatura de queima de 860 °C, indicando que a melhor Tq é menor que este valor. Para espessuras iniciais menores que 92 nm, as melhores eficiências foram encontradas para $Tq = 830$ °C, porém para valores de $d_{Inicial}$ maiores que este valor, o melhor resultado foi encontrado para $Tq = 840$ °C, demonstrando uma tendência de aumento da melhor temperatura de queima com o aumento da espessura do filme AR.

Nas Figuras 7 e 8 apresenta-se a tensão de circuito aberto, a densidade de corrente de curto-circuito, o fator de forma e a eficiência em função da espessura final do filme antirreflexo para a temperatura de queima de 840 °C. O fator de forma praticamente não é afetado pela espessura do filme AR, apresentando uma pequena tendência de aumento com o crescimento da espessura do filme, para espessuras menores que 103 nm. Este comportamento é mais pronunciado para a densidade de corrente de curto-circuito e tensão de circuito aberto. Como consequência, a eficiência é maior para a espessura depositada do filme AR de 103 nm, decaindo para maiores ou menores valores que esta espessura.

Tabela 2. Valores médios da tensão de circuito aberto (V_{oc}), densidade de corrente de curto-circuito (J_{sc}), fator de forma (FF) e eficiência (η) das células solares fabricadas em lâminas de Si-CZ, tipo n, com emissor de boro em função da temperatura de queima (T_q) das pastas de metalização e da espessura do filme AR ($d_{inicial}$).

| $d_{inicial}$ (nm) | T_q (°C) | V_{oc} (mV) | J_{sc} (mA/cm ²) | FF | η (%) |
|--------------------|------------|---------------|--------------------------------|---------------|------------|
| 60,9 | 830 | 598,8±0,8 | 31,2 | 0,650±0,015 | 12,1 ± 0,3 |
| 63,8 | 840 | 603,0±0,6 | 30,9±0,2 | 0,69±0,03 | 12,9 ± 0,5 |
| 67,7 | 820 | 600,9±1,3 | 30,8±0,8 | 0,70±0,04 | 12,7 ± 0,4 |
| 67,5 | 830 | 597±6 | 31,1±0,3 | 0,671±0,017 | 12,5 ± 0,2 |
| 68,5 | 840 | 586±14 | 30,2±0,5 | 0,645±0,005 | 11,4 ± 0,5 |
| 69,2 | 850 | 602,5±0,22 | 30,5±0,1 | 0,674±0,001 | 12,4 ± 0,1 |
| 69,5 | 860 | 600,26 | 30,7 | 0,599 | 11,0 |
| 78,2 | 820 | 594±5 | 30,9±0,2 | 0,695±0,011 | 12,8 ± 0,3 |
| 75,0 | 830 | 598±3 | 31,3±0,1 | 0,693±0,017 | 13,0 ± 0,4 |
| 74,2 | 840 | 597±4 | 31,3±0,3 | 0,67±0,04 | 12,5 ± 0,8 |
| 75,3 | 850 | 594,3±0,8 | 31,2 | 0,645±0,007 | 12,0 ± 0,1 |
| 78,9 | 860 | 585,4 | 30,3 | 0,567 | 10,1 |
| 86,6 | 820 | 603,9±1,6 | 31,3±0,1 | 0,695±0,014 | 13,1 ± 0,3 |
| 90,9 | 830 | 603,3±2,4 | 31,3±0,2 | 0,693±0,004 | 13,1 ± 0,2 |
| 87,0 | 840 | 605,1±0,9 | 31,3±0,4 | 0,690±0,005 | 13,1 ± 0,2 |
| 90,9 | 850 | 597,9±2,1 | 31,0±0,2 | 0,647±0,013 | 12,0 ± 0,4 |
| 89,1 | 860 | 597±5 | 31,0±0,4 | 0,62±0,04 | 11,5 ± 0,9 |
| 91,7 | 830 | 606,4±0,2 | 31,5±0,3 | 0,699±0,024 | 13,3 ± 0,6 |
| 92,3 | 840 | 603,0±0,8 | 31,7±0,4 | 0,681±0,014 | 13,0 ± 0,4 |
| 102,5 | 820 | 603,9±1,4 | 31,4±0,2 | 0,692±0,013 | 13,1 ± 0,2 |
| 102,8 | 830 | 604,8±0,6 | 31,6±0,1 | 0,697±0,008 | 13,3 ± 0,1 |
| 103,6 | 840 | 605,2±1,0 | 31,7±0,2 | 0,706±0,002 | 13,6 ± 0,1 |
| 103,9 | 850 | 604,1±1,3 | 31,6±0,1 | 0,689±0,015 | 13,2 ± 0,2 |
| 102,8 | 860 | 545±100 | 30,4±1,9 | 0,54±0,19 | 12,3 ± 0,3 |
| 150 | 820 | 601,1±0,5 | 30,3±0,1 | 0,610±0,011 | 11,1 ± 0,2 |
| | 830 | 602,8±0,2 | 29,9±0,6 | 0,6389±0,0004 | 11,5 ± 0,2 |
| | 840 | 602,9±1,5 | 29,8±0,1 | 0,645±0,011 | 11,6 ± 0,3 |
| | 850 | 596±11 | 29,4±0,5 | 0,6365±0,0001 | 11,2 ± 0,4 |
| | 860 | 604,3 | 29,9 | 0,59 | 10,6 |



(a)

(b)

Figura 7 - (a) Tensão de circuito aberto (V_{oc}) e (b) densidade de corrente de curto-circuito (J_{sc}) em função da espessura final do filme de TiO_2 para a temperatura de queima de 840 °C.

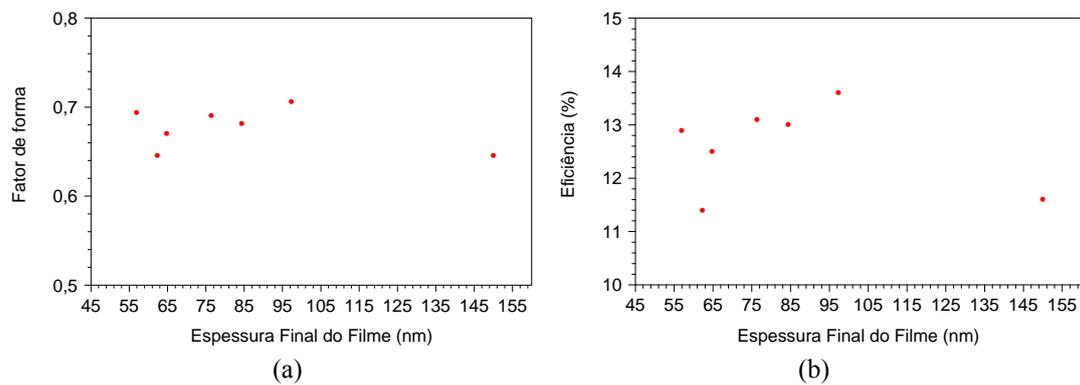


Figura 8 - (a) Fator de forma e (b) eficiência em função da espessura final do filme de TiO_2 para a temperatura de queima de $840\text{ }^\circ\text{C}$.

4. CONCLUSÕES

Confirmou-se a variação da espessura, da refletância e do comprimento de onda que corresponde à mínima refletância durante o processo de queima das pastas metálicas para o filme AR de TiO_2 , depositado pela técnica de evaporação em alto vácuo com canhão de elétrons. Temperaturas de queima das pastas que formam a malha metálica de $820\text{ }^\circ\text{C}$ a $860\text{ }^\circ\text{C}$ influenciam no filme AR da mesma forma. Para espessuras depositadas do filme de 62 nm a 103 nm , a refletância média final variou de 3% a 4% . A variação na espessura e no comprimento de onda que corresponde à mínima refletância com o processo de queima apresenta a tendência de aumentar até $T_q = 840\text{ }^\circ\text{C}$, para as menores espessuras do filme de TiO_2 . A melhor eficiência média de $13,6\%$ foi obtida para a espessura do filme depositada de 103 nm , com refletância média de $3,3\%$. Neste caso, a espessura do filme foi reduzida de aproximadamente 6 nm durante o processo de queima das pastas de metalização. Esta espessura é maior que a prevista, devido a menor resposta das células solares com emissor de boro nos menores comprimentos de onda. O fator de forma praticamente não foi afetado pelo aumento da espessura do filme AR, porém a tensão de circuito aberto e a densidade de corrente de curto-circuito apresentaram uma tendência de crescimento com o aumento da espessura do filme AR até a espessura de 103 nm , decaindo a partir deste valor. Portanto, constatou-se que a espessura do filme AR não afeta somente a corrente de curto-circuito, mas também a tensão de circuito aberto.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) pela subvenção no âmbito do convênio nº 01.08.0635.00, Ref. 1359/08 e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

- Basore, P.A., Clugston, D.A., 1997. PC1D Version 5: 32-bit solar cell modeling on personal computers, 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anaheim, EUA, pp. 207–210.
- Cañizo, C., Moehlecke, A., Zanesco, I., Luque, A., 2000. Cz bifacial solar cells. IEEE Electron Device Letters, v. 21, n 4, pp. 179-180.
- Ebong, A., Cooper, I.B., Rousaville, B., Rohatgi, A., Borland, W., Carrol, A., Mikeska, K., 2011. Overcoming the technological challenges of contacting homogeneous high sheet resistance emitters (HHSE). 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburgo, Alemanha, pp.1747-1749.
- Hugman, J., Richards, B.S., Crosky, A., 2002. Phase characterization of TiO_2 thin films using micro-Raman spectroscopy and low glancing angle x-ray diffraction. Conference on Optoelectronic and Microelectronic Materials and Devices (COMMAD), Sydney, Austrália, pp.181-184.
- Ly, M., Eberhardt, D., Filomena, G.Z., Moehlecke, A., Zanesco, I., 2007. Impact of metal grid firing on antireflection coatings. 22th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Milão, Itália, pp.1532-1534.
- Ly, M., 2007. Desenvolvimento e Análise de Filme Antirreflexo de Sulfeto de Zinco para Células Solares, Dissertação de Mestrado, PGETEMA, PUCRS, Porto Alegre, 65p.
- Kern, W., 1998. Handbook of Semiconductor Wafer Cleaning Technology. New Jersey, USA, Noyes Publications, 623p.
- Thomson, A.F., Lynn, S.Z., McIntosh, K.R., 2010. Passivation of silicon by negatively charged TiO_2 . 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Espanha, pp.1146-1153.
- Thomson, A.F., McIntosh, K.R., 2012. Light-enhanced surface passivation of TiO_2 -coated silicon. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 20, n. 3, pp. 343-349.

- Vallejo, B., Gonzalez-Mañas, M., Martinez-López, J., Morales, F., Caballero, M.A., 2005. Characterization of TiO₂ deposited on textured silicon wafers by atmospheric pressure chemical vapor deposition. *Solar Energy Materials*, v. 86, n. 3, pp. 299-308.
- Zanenco, I., Krenzinger, A., 1993. The effects of atmospheric parameters on the global solar irradiance and on the current of a silicon solar cell. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 1, n. 3, pp. 169-179.
- Zhao, J., Green, M.A., 1991. Optimized antireflection coatings for high-efficiency silicon solar cells, *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 38, n. 8, pp. 1925-1934.

INFLUENCE OF THE TiO₂ ANTIREFLECTION FILM THICKNESS IN THE ELECTRICAL PARAMETERS OF N-TYPE SOLAR CELLS

Abstract. *The reduction of reflection on the silicon solar cell surface is obtained by the deposition of thin films. The antireflection film (AR) of TiO₂ can be suitable for solar cells with boron doped emitters. However, the film characteristics are modified during the firing process of metal pastes and therefore the AR film variation influences the device efficiency. The aim of this paper is to analyse the variation of TiO₂ antireflection film and the influence on the electrical characteristics of solar cells with boron doped emitter. To fabricate the solar cells, TiO₂ films of different thicknesses were deposited and the temperature of metal paste firing was varied in order to find the best temperature for each film thickness. Changes in the thickness, reflectance and wavelength related to the minimum reflectance were observed after firing process. For film thicknesses from 62 nm to 103 nm, the average reflectance after firing was of 3 % to 4 %. Best average cell efficiency was of 13.6 %, obtained with solar cells with 97 nm thick TiO₂ film and an average reflectance of 3.3%. Fill factor was not affected by the TiO₂ thickness, but the open circuit voltage and the short-circuit current density shown a slight enhancement with the thickness until 103 nm film.*

Key words: *n-Type Si Solar Cells, Antireflection Film, Firing Temperature*