

# INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE DIFUSÃO DE FÓSFORO E DA ESPESSURA DO FILME ANTIRREFLEXO EM CÉLULAS SOLARES $n^+pn^+$

Angélica Souza Cenci – angelica.scenci@gmail.com

Izete Zanescio – izete@pucrs.br

Adriano Moehlecke – moehleck@pucrs.br

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Núcleo de Tecnologia em Energia Solar  
Faculdade de Física

**Resumo.** A principal meta da indústria de células solares é obter alta eficiência e baixo custo de produção. O objetivo deste artigo é apresentar o desenvolvimento de células solares  $n^+pn^+$  em lâminas de Si-Cz do tipo p, grau solar, com metalização por serigrafia e avaliar a influência do emissor  $n^+$  e do filme antirreflexo. Parâmetros do processo de fabricação como a temperatura de difusão de fósforo, a introdução de uma etapa de recozimento e a espessura do filme antirreflexo foram otimizados experimentalmente, avaliando-se a concentração do dopante em função da profundidade, a refletância ponderada e os parâmetros elétricos das células solares. Concluiu-se que a temperatura de difusão de 875 °C resultou na eficiência de 13,7 %, devido ao elevado FF. No entanto, com a redução da temperatura para 850 °C, o fator de forma (FF) diminuiu, devido ao aumento da resistência de folha e, conseqüentemente, da resistência de contato. Com a introdução da etapa de recozimento para ambas as temperaturas de difusão avaliadas, apenas para a temperatura de 850 °C observou-se um aumento do fator de forma, elevando a eficiência das células solares para 13,2 %. Com o recozimento, a espessura com alta concentração, denominada de “zona morta” aumentou, bem como a concentração do dopante para todas as profundidades, reduzindo a densidade de corrente de curto-circuito. Para a temperatura de difusão de 875 °C, com a introdução do recozimento, a eficiência diminuiu um pouco para 13,3 %. Verificou-se que a “zona morta” aumentou em relação ao processo com a temperatura de 850 °C e com recozimento. A espessura do filme antirreflexo de  $TiO_2$  entre 95 nm e 110 nm resultou no menor valor da refletância ponderada média e, conseqüentemente, obteve-se a melhor eficiência. A espessura inicial do filme AR de 95 nm foi considerada mais viável por utilizar menor quantidade de material e resultou na eficiência máxima de 13,7 %.

**Palavras-chave:** células solares, emissor  $n^+$ , metalização por serigrafia.

## 1. INTRODUÇÃO

O uso da energia solar para a produção de energia elétrica é uma importante e promissora alternativa como fonte renovável de energia. Porém, tem como desvantagem a necessidade de investimentos iniciais para a instalação dos sistemas fotovoltaicos. Neste contexto, é necessário continuar investindo em novas pesquisas para o desenvolvimento de células solares, a redução dos custos de produção e a obtenção de maior eficiência na conversão. Atualmente, a produção anual de dispositivos fotovoltaicos é crescente. No mundo, no ano de 2010 ocorreu o recorde na fabricação de células solares, com um aumento de 118 %. Em 2012, o crescimento foi de aproximadamente 50 %, com produção de 56 GW (Hering, 2011), (Epi, 2012).

Células solares de silício cristalino representam 88 % do mercado, onde 57 % são de silício multicristalino (Si-Mc) (Hering, 2011). A eficiência de células de silício cristalino usadas para fabricar módulos comerciais varia entre 11 % e 19,7 % (Epi, 2012).

Nas células solares de silício cristalino tipo p, a junção pn pode ser formada por meio da difusão de uma camada de fósforo na lâmina que originalmente está dopada com boro. Essa camada de fósforo é denominada de emissor, que é uma das regiões mais relevantes de uma célula solar (Lorenzo, 1994). Os emissores homogêneos são obtidos mediante uma difusão em alta temperatura (800 °C a 1000 °C). Um dos inconvenientes do uso de um emissor homogêneo é a alta resistência de contato entre o emissor e as trilhas metálicas, formadas na metalização por serigrafia, podendo causar perdas de potência e, por conseqüência, de eficiência (Lorenzo, 1994), (Vásquez et al., 2010). Para reduzir esta resistência em série, pode-se aumentar a concentração do dopante em superfície, mas outro fator que limita a eficiência é a recombinação de portadores de carga minoritários na região altamente dopada. A necessidade de buscar alternativas para tais problemas permeiam para o desenvolvimento de processos de fabricação de células solares em que, além de visar o baixo custo de produção, buscam aumentar a eficiência das células com emissor homogêneo e metalização por serigrafia.

Das diferentes estruturas de células solares, as células com campo retrodifusor, também denominado BSF (*back surface field*), geralmente são formadas pela difusão de alumínio ou boro na face posterior de lâminas de Si tipo p. A camada altamente dopada na face posterior, próxima ao contato metálico permite um aumento na tensão de circuito aberto e na corrente de curto-circuito. Porém, em células solares com campo retrodifusor formado por pasta de

alumínio, geralmente surge um problema que é o abaulamento que ocorre durante a queima das pastas metálicas (Yang et al., 2011), (Moehlecke e ZanESCO, 2012).

A célula solar de estrutura  $n^+pn^+$  é um dispositivo mais simples e de relativo baixo custo, baseado em uma etapa térmica, a difusão de fósforo, com malha metálica na face posterior de Al/Ag formada a partir da metalização por serigrafia, que perfura a região posterior  $n^+$ . As células solares de estrutura  $n^+pn^+$  são consideradas células típicas industriais, formadas por emissor homogêneo. São as de menor custo se comparadas com células com BSF, resultando em dispositivos de eficiência na ordem de 15 % (Baranão, 2001).

Portanto, este estudo teve como objetivo principal desenvolver células solares com estrutura  $n^+pn^+$  em lâminas de Si-Cz, tipo p, grau solar, com metalização por serigrafia, por meio da otimização da difusão de fósforo e do filme antirreflexo.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho, foi desenvolvido um processo para fabricação de células solares em silício monocristalino, com emissor  $n^+$  formado por difusão de fósforo a partir de  $POCl_3$  e metalização por serigrafia. Otimizou-se a difusão de fósforo, a partir da variação da temperatura, introduziu-se o processo de recozimento e avaliou-se a influência do emissor  $n^+$  e da pasta de prata nas características elétricas das células solares. Também foi otimizada a espessura do filme antirreflexo das células solares.

Utilizaram-se substratos de Si-Cz tipo p, grau solar, com 100 mm de diâmetro, espessura de  $(200 \pm 30)$   $\mu m$ , orientação dos planos cristalinos {100} e resistividade de base entre 1  $\Omega.cm$  e 20  $\Omega.cm$ .

O processo para a fabricação das células solares está resumido na Fig. 1 e consistiu basicamente nas seguintes etapas: texturação da superfície das lâminas de Si, limpeza química RCA, formação das regiões altamente dopadas, ataque do silicato de fósforo e limpeza química RCA-2, deposição do filme antirreflexo (AR), metalização frontal e posterior por serigrafia com diferentes pastas metálicas e isolamento das bordas.

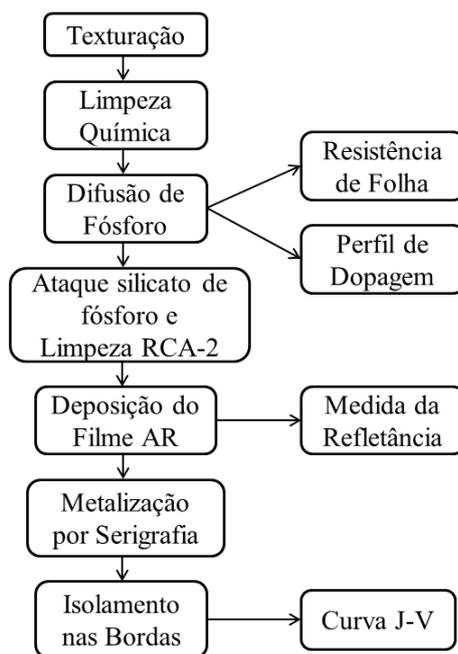


Figura 1 - Etapas do processo de fabricação das células solares e das técnicas de caracterização.

A difusão de fósforo foi realizada com  $POCl_3$  em ambas as faces das lâminas. Para otimizar a formação do emissor  $n^+$ , foi variada a temperatura de difusão de fósforo e foi introduzida uma etapa de recozimento após a difusão de fósforo e no mesmo processo térmico. Para caracterizar o emissor mediu-se a resistência de folha e o perfil de dopagem de fósforo nas lâminas pela técnica ECV (*electrochemical capacitance voltage profiling*). Com esta técnica a concentração do dopante é obtida a partir da medição da capacitância em função da tensão aplicada. A resistência de folha foi medida em 13 regiões da lâmina de silício e calculou-se o valor médio.

Após o ataque do silicato de fósforo e da limpeza RCA-2, foi depositado o filme antirreflexo pela técnica de canhão de elétrons com o objetivo de diminuir a refletância das células e aumentar a eficiência. Depositou-se em uma das superfícies das lâminas de silício um filme antirreflexo composto de dióxido de titânio com diferentes espessuras e mediu-se a refletância em amostras com o espectrofotômetro Lambda 950, da Perkin - Elmer. A refletância foi medida em três regiões da lâmina de silício e calculou-se a refletância ponderada média (Ly, 2007), ( Ly, 2012). A refletância ponderada foi calculada considerando a refletância medida, o espectro solar AM1,5G e a resposta espectral de uma

célula solar de silício. Estas amostras foram submetidas ao processo de queima no forno de esteira, porém sem a deposição da malha de metalização, para avaliar a influência deste processo térmico no filme antirreflexo.

A malha metálica frontal possui 38 trilhas de 100  $\mu\text{m}$  de largura e duas barras coletoras de 1,5 mm de largura cada uma, resultando no fator de sombra de 8,2 % e foi implementada com a pasta de prata PV16A, da Dupont. A etapa de secagem foi feita em ambiente controlado no forno de esteira. Na face posterior foi depositada uma malha metálica formada com a pasta de prata e alumínio PV202, da Dupont. Após a secagem da pasta de Ag/Al, foi realizado o processo de queima das duas pastas metálicas na mesma etapa térmica a 840°C no forno de esteira.

As células solares  $n^+pn^+$  com 61,58  $\text{cm}^2$  foram caracterizadas por meio da medição da densidade de corrente em função da tensão elétrica aplicada (curva J-V) em condições padrão de medição: irradiância de 100  $\text{mW}/\text{cm}^2$ , espectro solar AM1.5G e temperatura da célula solar de 25 °C. Uma célula solar previamente calibrada no CalLab - FhG-ISE (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme), Alemanha, foi usada como referência.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Influência da temperatura de difusão de fósforo

Foram processadas células solares com temperatura de difusão de fósforo ( $T_D$ ) de 875 °C e 850 °C. O tempo de difusão foi de 35 minutos e foram fabricadas 6 células solares em cada processo. O filme antirreflexo de  $\text{TiO}_2$  foi de 68 nm para o processo de difusão na temperatura de 875 °C. Para a difusão na temperatura de 850 °C, o filme AR foi de 95 nm. A velocidade de esteira foi de 220  $\text{cm}/\text{min}$  para ambos os processos.

A Tab. 1 compara a resistência de folha média e os parâmetros elétricos médios das células solares fabricadas com difusão de fósforo a 875 °C e 850 °C. A curva J-V da melhor célula com difusão de fósforo na temperatura de 875 °C e a melhor célula processada na temperatura de 850 °C são mostradas na Fig. 2. Para a difusão realizada a 875 °C, a resistência de folha obtida foi de  $(38 \pm 3) \Omega/\square$ , resultando em células solares com eficiência média de  $(13,4 \pm 0,3) \%$ . Conforme esperado, quando a temperatura de difusão de fósforo foi reduzida para 850 °C, a resistência de folha do emissor aumentou para  $(69 \pm 4) \Omega/\square$ . Porém, a eficiência média das células solares reduziu-se para  $(10,7 \pm 0,2) \%$ . O aumento da resistência de folha reduziu principalmente o fator de forma, devido ao aumento da resistência de contato, como se pode ver na Fig. 2. Também se nota que a densidade de corrente de curto-circuito aumentou, devido à redução da recombinação no emissor, com o aumento da resistência de folha. A maior eficiência, de 13,7 %, foi alcançada com a difusão de fósforo realizada a 875 °C.

Tabela 1- Resistência de folha média ( $R_{\square}$ ) e valores médios da tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ ), densidade de corrente de curto-circuito ( $J_{SC}$ ) e eficiência média ( $\eta$ ) das células solares fabricadas com difusão de fósforo na temperatura de 875 °C e 850 °C.

| $T_D$ (°C) | $R_{\square}$ ( $\Omega/\square$ ) | $V_{OC}$ (mV)   | $J_{SC}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ ) | FF                | $\eta$ (%)     |
|------------|------------------------------------|-----------------|--------------------------------------|-------------------|----------------|
| 875        | $38 \pm 3$                         | $577,5 \pm 2,5$ | $30,1 \pm 0,4$                       | $0,772 \pm 0,001$ | $13,4 \pm 0,3$ |
| 850        | $69 \pm 4$                         | $568,8 \pm 0,6$ | $31,1 \pm 0,2$                       | $0,603 \pm 0,006$ | $10,7 \pm 0,2$ |

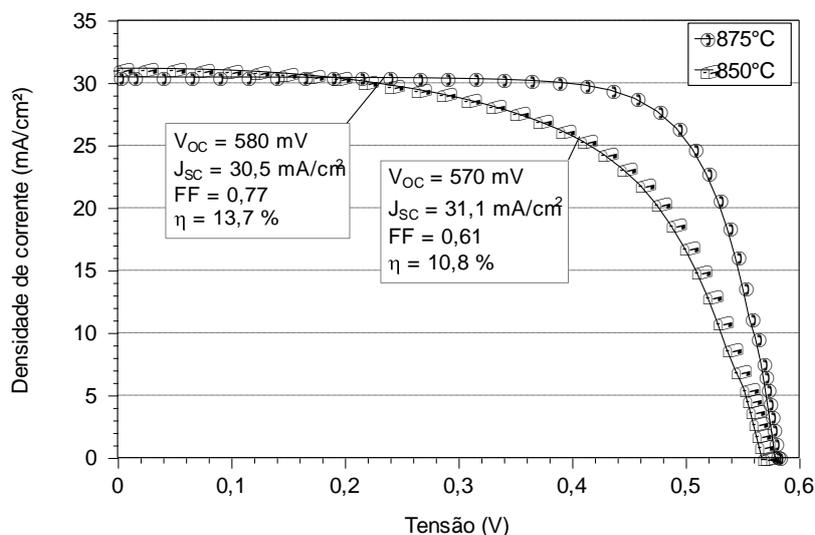


Figura 2 - Curva da densidade de corrente em função da tensão elétrica aplicada das melhores células solares obtidas com os processos de difusão de fósforo na temperatura de 875 °C e 850 °C.

Comparando as curvas J-V da Fig. 2 observa-se que a célula solar com emissor formado com resistência de folha de  $(69 \pm 4) \Omega/\square$  apresentou também menor  $V_{OC}$ . A redução na  $V_{OC}$  foi produzida pela diminuição do FF e aumento da resistência em série. O aumento da resistência de contato pode ocorrer quando o emissor é pouco dopado.

Na Fig. 3 mostra-se a concentração de fósforo em função da profundidade para a difusão de fósforo realizada a  $850 \text{ }^\circ\text{C}$ . A profundidade da junção é de aproximadamente  $0,50 \mu\text{m}$  e a concentração em superfície foi de aproximadamente  $3,5 \times 10^{20}$  átomos/ $\text{cm}^3$ . Para este perfil do dopante, a pasta metálica não foi capaz de manter um bom contato com o emissor, resultando em alta resistência de contato.

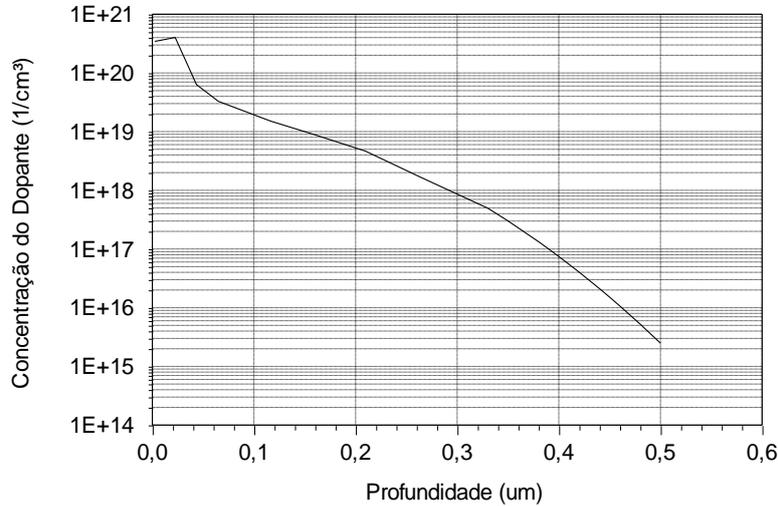


Figura 3 - Concentração de fósforo em função da profundidade para as difusões realizadas na temperatura de  $850 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 35 minutos.

### 3.2 Influência do processo de recozimento

Com o objetivo de analisar a influência da concentração de fósforo em função da profundidade nos parâmetros elétricos das células solares foi introduzida a etapa de recozimento na mesma etapa térmica da difusão. Durante o recozimento, as lâminas permanecem no forno em alta temperatura sem fluxo de nitrogênio que passa no recipiente com  $\text{POCl}_3$ , porém, mantendo as demais vazões de  $\text{N}_2$  e  $\text{O}_2$ .

Foram processadas 8 células solares com temperatura e tempo de difusão de  $850 \text{ }^\circ\text{C}$  e 35 minutos e recozimento com temperatura de  $850 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 30 minutos. Com o recozimento a resistência de folha baixou de  $(69 \pm 4) \Omega/\square$  para  $(53 \pm 4) \Omega/\square$ , como se pode ver na Fig. 4. A menor resistência de folha obtida com a etapa de recozimento caracteriza um emissor mais dopado. Observa-se que com o recozimento, a profundidade da junção aumentou para  $0,58 \mu\text{m}$  e a concentração em superfície, de aproximadamente  $3,3 \times 10^{20}$  átomos/ $\text{cm}^3$ , permaneceu praticamente a mesma. A espessura com alta concentração, denominada de “zona morta” também aumentou bem como a concentração do dopante para todas as profundidades.

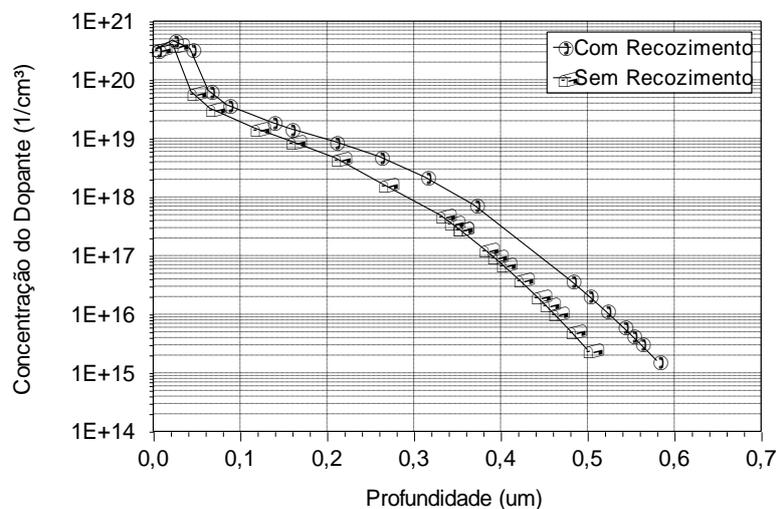


Figura 4 - Concentração de fósforo em função da profundidade para as difusões realizadas na temperatura de  $850 \text{ }^\circ\text{C}$ , sem e com recozimento a  $850 \text{ }^\circ\text{C}$ .

A temperatura de queima ( $T_Q$ ) das pastas de metalização foi de 840 °C e 850 °C com velocidade de esteira de 240 cm/min. O filme AR foi de 95 nm. A máscara de metalização utilizada possuía 34 trilhas de 100  $\mu\text{m}$  de largura com duas barras coletoras de 1,5 mm de largura cada e um fator de sombra de 7,8 %. Os resultados dos parâmetros elétricos médios para as diferentes  $T_Q$  são apresentados na Tab. 2.

Tabela 2 - Parâmetros elétricos médios das células solares fabricadas com difusão de fósforo na temperatura de 850 °C durante 35 minutos e recozimento na temperatura de 850 °C durante 30 minutos.

| $T_Q$ (°C) | $V_{OC}$ (mV) | $J_{SC}$ (mA/cm <sup>2</sup> ) | FF          | $\eta$ (%) |
|------------|---------------|--------------------------------|-------------|------------|
| 840        | 574,1 ± 2,8   | 30,1 ± 0,5                     | 0,49 ± 0,09 | 8,4 ± 1,7  |
| 850        | 574,7 ± 1,2   | 30,30 ± 0,05                   | 0,73 ± 0,04 | 12,7 ± 0,7 |

Conforme os resultados apresentados na Tab. 2, a temperatura de queima de 850 °C resultou em maior eficiência das células solares. Nota-se que a  $V_{OC}$  e a  $J_{SC}$  praticamente não foram afetadas pelo aumento da  $T_Q$ . No entanto, o FF aumentou consideravelmente, passando de (0,49 ± 0,09) para (0,73 ± 0,04), quando a temperatura de queima foi maior.

A Fig. 5 compara a melhor célula obtida com o processo de difusão com temperatura de 850 °C com e sem recozimento. Para ambas as células a  $T_Q$  foi de 850 °C. Observa-se que ao ser introduzida a etapa de recozimento no processamento das células solares ocorre o aumento do fator de forma devido à redução da resistência em série e, conseqüentemente, a eficiência aumenta. Com o recozimento, a profundidade da junção aumentou e a “zona morta” aumentou, reduzindo a  $J_{SC}$ . Porém, o FF da melhor célula solar aumentou de 0,61 para 0,76. Este resultado também pode ser notado comparando a Tab. 2 com a Tab. 1. Conseqüentemente, a eficiência do melhor dispositivo aumentou de 10,8 % para 13,2 % com a introdução da etapa de recozimento.

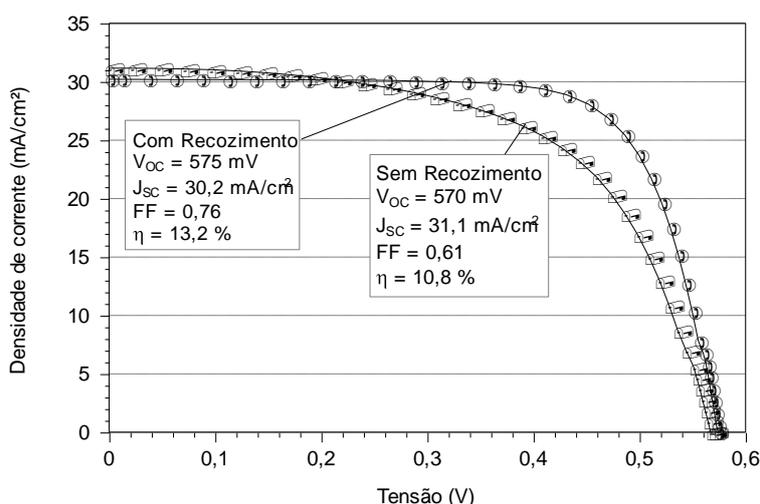


Figura 5 - Curva J-V das melhores células solares fabricadas com os processos de difusão de fósforo na temperatura de 850 °C durante 35 minutos, sem e com recozimento na temperatura de 850 °C e tempo de 30 minutos.

Para avaliar a influência do recozimento no processo de difusão realizado na temperatura de 875 °C durante 30 minutos, implementou-se um processo com a temperatura de recozimento ( $T_R$ ) de 875 °C e o tempo de recozimento ( $t_R$ ) de 30 minutos. A temperatura de queima das pastas metálicas foi mantida em 840 °C e 850 °C. Os parâmetros elétricos médios das 8 células solares de cada processo são mostrados na Tab. 3. Neste caso, a resistência de folha, de (35 ± 3)  $\Omega/\square$  com a introdução do recozimento, foi praticamente a mesma do processo sem recozimento. Como se pode ver na Fig. 6, a profundidade da junção foi de 0,67  $\mu\text{m}$  e a concentração em superfície do dopante foi de  $3,4 \times 10^{20}$  átomos/cm<sup>3</sup>. Comparando a concentração do dopante em função da profundidade obtida com a  $T_D$  de 850 °C e o  $t_D$  de 35 minutos e  $T_R$  de 850 °C e  $t_R$  de 30 minutos, mostrados na Fig. 4, verifica-se que a “zona morta” aumentou, porém a concentração em superfície permaneceu praticamente a mesma.

Da Tab. 3 verifica-se que a variação da temperatura de queima praticamente não influenciou os resultados, ao contrário dos resultados apresentados na Tab. 2. A eficiência média, de 13,1 % e 13,2 %, foi praticamente a mesma para as duas  $T_Q$ . A eficiência máxima obtida foi de 13,3 % para ambas as  $T_Q$ . A maior eficiência média, de 13,21 %, ocorreu para a  $T_Q$  de 850 °C. Das curvas J-V apresentadas na Fig. 7, nota-se que com a introdução da etapa de recozimento para a  $T_D$  de 875 °C, os parâmetros elétricos das melhores células processadas não apresentaram variação significativa. Com o recozimento a eficiência diminuiu um pouco, de 13,7 % para 13,3 %, o FF de 0,77 manteve-se e ocorreu um pequeno decréscimo na  $V_{OC}$  e  $J_{SC}$ .

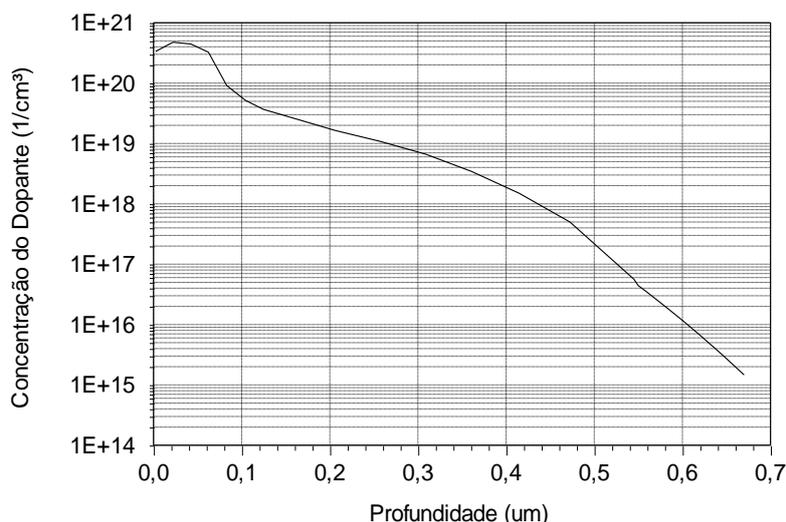


Figura 6 - Concentração de fósforo em função da profundidade para a difusão e recozimento realizados na temperatura de 875 °C durante 30 minutos.

Tabela 3 - Parâmetros elétricos médios das células solares fabricadas com difusão de fósforo e recozimento, ambos com temperatura de 875 °C e tempo de processamento de 30 minutos.

| T <sub>Q</sub> (°C) | V <sub>OC</sub> (mV) | J <sub>SC</sub> (mA/cm <sup>2</sup> ) | FF            | η (%)      |
|---------------------|----------------------|---------------------------------------|---------------|------------|
| 840                 | 573,4 ± 0,7          | 30,0 ± 0,1                            | 0,760 ± 0,013 | 13,1 ± 0,2 |
| 850                 | 576,8 ± 1,7          | 29,8 ± 0,3                            | 0,769 ± 0,008 | 13,2 ± 0,1 |

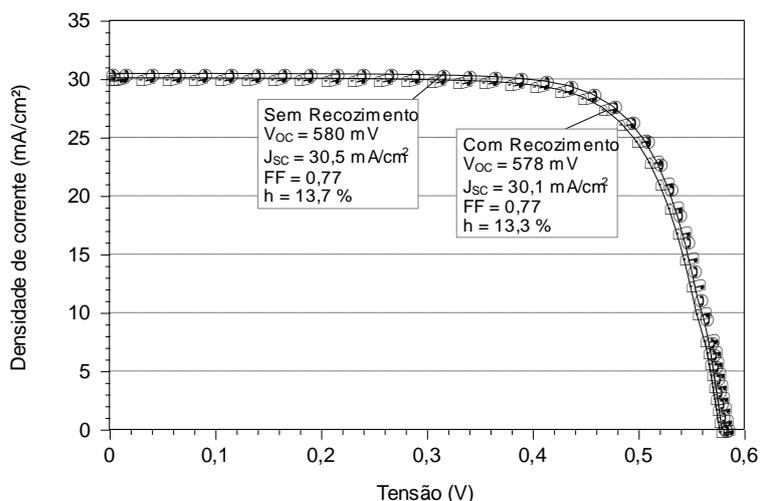


Figura 7 - Curva J-V das melhores células solares obtidas nos processos de difusão de fósforo na temperatura de 875 °C durante 35 minutos (sem recozimento) e difusão e recozimento na temperatura de 875 °C com tempo de processamento de 30 minutos (com recozimento).

### 3.3 Influência da espessura do filme antirreflexo

O filme antirreflexo afeta as características elétricas das células solares, principalmente a J<sub>SC</sub>. Portanto, foi variada a espessura do filme AR de TiO<sub>2</sub> para verificar a influência na eficiência dos dispositivos. Para avaliar a influência do filme AR nos parâmetros elétricos das células solares foi implementado o processo com difusão de fósforo na temperatura de 875 °C durante 35 minutos. O filme antirreflexo composto de dióxido de titânio foi depositado na superfície frontal das lâminas de silício antes da etapa de metalização e a espessura do filme foi variada de 68 nm a 130 nm. Lâminas de Si com o filme AR, porém sem a malha de metalização, foram processadas no forno de esteira na temperatura de 840 °C.

Na Fig. 8 está representada a refletância para as diferentes espessuras do filme antirreflexo, depois do processo de queima das pastas metálicas. Observa-se que com a redução da espessura do filme AR, a refletância mínima desloca-se para menores comprimentos de onda.

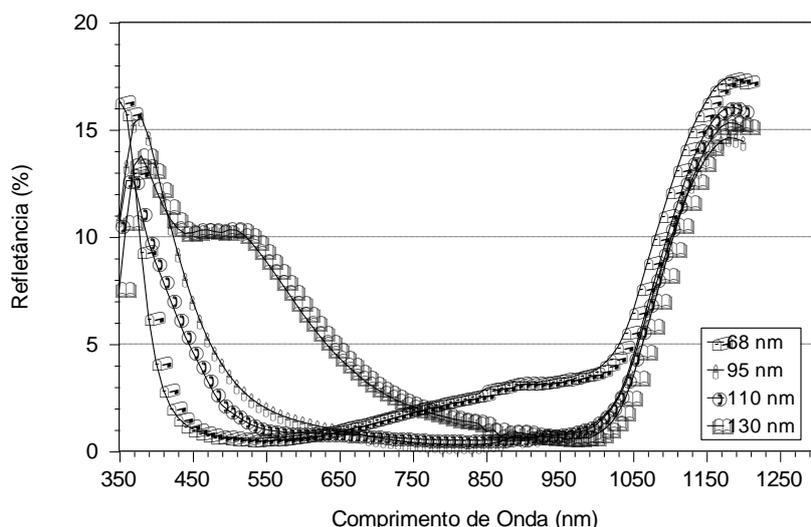


Figura 8 - Refletância de filmes antirreflexo de TiO<sub>2</sub> com diferentes espessuras depois do processo de queima das pastas metálicas. As amostras não foram metalizadas.

A Tab. 4 mostra os valores de espessura inicial ( $d_{inicial}$ ) e final ( $d_{final}$ ), bem como a refletância ponderada média ( $\rho_w$ ) e o comprimento de onda que corresponde à refletância mínima ( $\lambda_{min.}$ ) medidos para cada espessura do filme AR, após o processo de queima no forno de esteira. A espessura do filme AR diminuiu após o processamento das lâminas no forno de esteira, provavelmente pela alteração no índice de refração do filme (Ly, 2007) e (Ly, 2012).

A menor refletância ponderada média de 1,69 % ocorre para a espessura final do filme AR de 110 nm e, neste caso, o comprimento de onda que corresponde à refletância mínima está próximo de 820 nm. Este comprimento de onda é maior que o correspondente ao pico do espectro solar AM1,5G, devido a baixa resposta espectral da célula solar em baixos comprimentos de onda.

A Tab. 5 mostra os parâmetros elétricos médios e na Fig. 9 a curva J-V das melhores células solares em função da variação da espessura do filme AR.

Tabela 4 - Parâmetros dos filmes AR de TiO<sub>2</sub> com diferentes espessuras depositados sobre as lâminas de silício texturadas.

| $d_{inicial}$ (nm) | $d_{final}$ (nm) | $\rho_w$ (%) | $\lambda_{min.}$ (nm) |
|--------------------|------------------|--------------|-----------------------|
| 68                 | 60 ± 2           | 2,33 ± 0,11  | 550 ± 20              |
| 95                 | 85 ± 5           | 1,92 ± 0,13  | 783 ± 47              |
| 110                | 89               | 1,69 ± 0,03  | 820                   |
| 130                | 104              | 4,60 ± 0,18  | 960                   |

Tabela 5 - Parâmetros elétricos médios e eficiência máxima das células solares fabricadas com deposição de diferentes espessuras de filme AR de TiO<sub>2</sub> após o processo de queima

| $d_{final}$ (nm) | $V_{OC}$ (mV) | $J_{SC}$ (mA/cm <sup>2</sup> ) | FF            | $\eta$ (%)   |
|------------------|---------------|--------------------------------|---------------|--------------|
| 60               | 572 ± 4       | 30,01 ± 0,27                   | 0,769 ± 0,003 | 13,21 ± 0,05 |
| 85               | 579,1 ± 0,3   | 30,40 ± 0,03                   | 0,775 ± 0,003 | 13,64 ± 0,05 |
| 89               | 578,7 ± 0,8   | 30,37 ± 0,16                   | 0,771 ± 0,003 | 13,55 ± 0,08 |
| 104              | 577,4 ± 0,7   | 29,39 ± 0,24                   | 0,765 ± 0,003 | 12,98 ± 0,16 |

Foram processadas de 3 a 4 células solares para cada espessura do filme AR. Os filmes finos com espessura final de 85 nm e 89 nm resultaram nos menores valores da refletância ponderada média de 1,92 % e de 1,69 %, respectivamente e, conseqüentemente, em células solares de maior eficiência. Aumentando ou diminuindo a espessura do filme AR a partir destes valores, observa-se uma redução não somente na  $J_{SC}$ , mas também no FF. Este resultado também pode ser visto na Fig. 9, onde estão representadas as curvas J-V das melhores células solares para cada espessura da camada de TiO<sub>2</sub>. A melhor eficiência média, de 13,6 %, foi obtida com estas espessuras de

filme AR. Porém, o filme AR com espessura final de 85 nm é considerado mais viável por utilizar menor quantidade de material na deposição. Para essa espessura, a eficiência da melhor célula solar foi de 13,7 %.

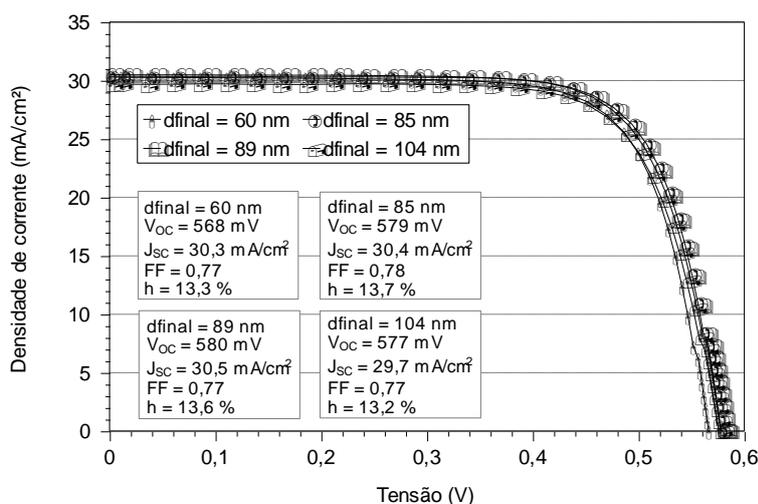


Figura 9 - Curva J-V das melhores células solares processadas com diferentes espessuras do filme AR de TiO<sub>2</sub>.

#### 4. CONCLUSÕES

Foi avaliada a influência do processo de difusão na concentração de fósforo em função da profundidade e nos parâmetros elétricos das células solares n<sup>+</sup>pn<sup>+</sup>. A resistência de folha de 38 Ω/□ foi obtida com a temperatura de difusão de 875 °C durante 35 minutos e proporcionou a eficiência média das células solares de 13,4 % e a eficiência máxima de 13,7 %. Neste caso, o fator de forma foi de 0,77. A redução da temperatura de difusão para 850 °C provocou uma diminuição do fator de forma para valores abaixo de 0,6. Este resultado está relacionado ao aumento da resistência de folha do emissor para 69 Ω/□, aumentando a resistência de contato entre o emissor e a malha metálica.

Com a introdução da etapa de recozimento para ambas as temperaturas de difusão, apenas para a temperatura de 850 °C observou-se um aumento do fator de forma, elevando a eficiência das células solares de 10,8 % para 13,2 %. Com o recozimento, a profundidade da junção aumentou e a concentração em superfície permaneceu praticamente a mesma. A espessura com alta concentração, denominada de “zona morta” aumentou bem como a concentração do dopante para todas as profundidades, reduzindo a densidade de corrente de curto-circuito.

Para a temperatura de difusão de 875 °C, com a introdução do recozimento a eficiência diminuiu um pouco para 13,3 %. A resistência de folha foi praticamente a mesma do processo sem recozimento. Comparando este resultado com o obtido com a temperatura de difusão de 850 °C com recozimento, verificou-se que a “zona morta” aumentou, porém a concentração em superfície não foi alterada.

A espessura final do filme antirreflexo de TiO<sub>2</sub> entre 85 nm e 89 nm resultou no menor valor da refletância ponderada média, de 1,92 % e 1,69 %, respectivamente. Consequentemente, obteve-se a melhor eficiência e o maior valor dos parâmetros elétricos médios. Porém, a espessura final do filme AR de 85 nm foi considerada mais viável por utilizar menor quantidade de material depositado, além de ter resultado na eficiência média de 13,6 % e máxima de 13,7 %. Quando foi reduzida a temperatura de difusão para 865 °C e formado o campo retrodifusor com pasta de Al, as células solares alcançaram a eficiência de 15,5 %.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem a Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica (CEEE-D) pela subvenção do projeto de P&D intitulado “Células Solares de Alta Eficiência com Emissores Seletivos”, contrato CEEE-D/9942400 e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de Produtividade em Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora.

#### REFERÊNCIAS

- Baranão, F. R., 2001. Evaluación de la serigrafia como técnica de metalización para células solares eficientes, Tese de Doutorado, Bilbao, Escuela Superior de Ingenieros de Bilbao, Universidad Del País Vasco, Espanha.
- Epia, Global Market Outlook for Photovoltaics 2013-2017. pp. 59. 2012. Disponível em <http://www.epia.org/news/publications/global-market-outlook-for-photovoltaics-2013-2017>.

- Epia - European Photovoltaic Industry Association. Disponível em: <<http://www.epia.org/solar-pv/pv-technologies-cells-and-modules.html>>. Acesso em: 03 de fevereiro de 2012.
- Hering, G., 2011. Enter the dragon: PV cell production rises 36 percent in 2011 to 37 GW, as the heat of ongoing oversupply – fueled by China’s rapid rise – reshapes the industry, Science & Technology: Photon International, pp. 132-162.
- Ly, M. et al., 2007. Impact of metal grid firing on antireflection coating, 22<sup>nd</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Milan – Italy.
- Ly, M. et al., 2012. Influência da espessura do filme antirreflexo de TiO<sub>2</sub> nos parâmetros elétricos nas células solares com base n, IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferencia Latino-americana da ISES, São Paulo.
- Lorenzo, E., 1994. Electricidad Solar - Ingenieria de los Sistemas Fotovoltaicos. 1a. ed. España: Progensa,
- Moehlecke, A.; Zanesco, I., 2012 . Development of Silicon Solar Cells and Photovoltaic Modules in Brazil: Analysis of a Pilot Production, Materials Research, vol. 15, pp. 581-588.
- Vásquez, C. et al., 2010. Efficiency of commercial Cz-Si solar cell with a shallow emitter, Materials Science and Engineering B, vol. 172, pp. 43-49.
- Yang, L. et al., 2011. High efficiency screen printed bifacial solar cells on monocrystalline CZ silicon, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 19, pp. 275-279.

### INFLUENCE OF THE PHOSPHORUS DIFFUSION PARAMETERS AND THE ANTIREFLECTION COATING THICKNESS IN $n^+pn^+$ SOLAR CELLS

**Abstract.** *The main goal of the solar cell industry is to obtain high efficiency and low production cost. The aim of this paper is to present the development of  $n^+pn^+$  solar cells in solar grade p-type Si-Cz wafer with metallization by screen printing and to evaluate the influence of the  $n^+$  emitter and antireflection coating. Parameters of the fabrication process such as the temperature of phosphorus diffusion, the introduction of an annealing step and the antireflection coating thickness were experimentally optimized, evaluating the dopant concentration as a function of the depth, the weighted reflectance and the electrical parameters of the solar cells. The diffusion temperature of 875°C results in the efficiency of 13.7%, due to the high fill factor (FF). However, with the reduction of temperature to 850°C, the FF is reduced due to the increase of sheet resistance and consequently the increase of the contact resistance. With the introduction of the annealing step for both diffusion temperature, just for temperature of 850°C was observed an increase of the fill factor, increasing the efficiency of the solar cells to 13,2 %. With the annealing step, the dead layer increased, as well as the dopant concentration for all depths, reducing the short-circuit current density. For the diffusion temperature to 875°C, with the introduction of the annealing step, the efficiency decreased slightly to 13.3 %. In this case, the dead layer increased if compared to the process with the temperature of 850 °C and the annealing step. The thickness of TiO<sub>2</sub> antireflection coating between 95 nm and 110 nm resulted in the lowest value of the average weighted reflectance and, consequently, the best efficiency was obtained. The initial thickness of the antireflection coating of 95 nm was considered most viable because it is formed with less material and lead to the maximum efficiency to 13.7 %.*

**Key words:** *Solar Cell,  $n^+$  Emitter, Metallization by Screen Printing.*