

INFLUÊNCIA DA LARGURA DAS BARRAS COLETORAS E DA TEMPERATURA DE QUEIMA EM CÉLULAS SOLARES COM CAMPO RETRODIFUSOR DE ALUMÍNIO

Vanessa Alves Gonçalves – vanessaalvesgonc@gmail.com

Izete Zanescio – izete@puhrs.br

Adriano Moehlecke – moehlecke@puhrs.br

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. O uso da energia solar para produção de energia elétrica vem se destacando devido ao esgotamento das fontes naturais. As células fabricadas em lâminas de Si-Cz tipo p com campo retrodifusor formado por pasta de alumínio são largamente produzidas pela indústria. A formação do campo retrodifusor e das barras coletoras em uma célula solar é muito importante no desempenho geral da célula solar. O objetivo deste trabalho é avaliar a influência da largura das barras coletoras posteriores e da temperatura de queima em células solares desenvolvidas em lâminas de Si-Cz, grau solar, com campo retrodifusor formado por pasta de alumínio. Variou-se a largura das barras coletoras posteriores e otimizou-se a temperatura de queima simultânea da pasta de Ag, de Al e de Ag/Al. A temperatura de queima foi variada de 840 °C a 970 °C. O fator de forma das células solares com barras coletoras de 10 mm foi de 0,75, menor que o valor de 0,78 obtido para dispositivos com barras coletoras de 3,8 mm aumentando a tensão de circuito aberto de 579 mV para 597 mV. A eficiência alcançada foi de 14,5 %. O comprimento de difusão dos portadores de carga minoritários medido em células com barras coletoras de 3,8 mm foi maior, de 516 μm , comparado ao obtido em dispositivos com barras coletoras de 10 mm, cujo valor foi 132 μm .

Palavras-chave: Células Solares, Campo Retrodifusor de Alumínio, Barras Coletoras.

1. INTRODUÇÃO

O esgotamento de fontes de energia convencionais e as ameaças ambientais têm se tornado uma preocupação da humanidade. Com isto, há a plena consciência que se deve por em prática um sistema sustentável, através de energias renováveis. Dentre elas, pode-se destacar a energia solar por ser uma fonte de energia renovável que pode ser convertida em energia elétrica e térmica. A produção direta de energia elétrica a partir da energia solar é realizada por meio de células solares (Peter, 2009)(Atlas, 2012).

A pasta de alumínio é amplamente usada na indústria de células solares de silício fabricadas em substratos tipo p, para formar o campo retrodifusor, que também é denominado de BSF (*back surface field*). Esta região altamente dopada pp^+ forma um campo elétrico que diminui a velocidade de recombinação, reduzindo o número de portadores de carga minoritários que chegam até a superfície posterior (Cao, 2011)(Dhariwal, 1981). Para fabricar o módulo fotovoltaico, as células solares são soldadas e, portanto, é necessária a formação de barras coletoras na face posterior com pasta de Ag/Al.

A etapa da formação do BSF e das barras coletoras posteriores afeta diretamente a tensão de circuito aberto (Voc), a corrente de curto-circuito (Isc), o fator de forma (FF) e a eficiência (η) da célula solar (Honsberg, 2012). Por exemplo, a resistência em série e paralelo reduz o FF da célula solar (Kwon, 2010). Porém, como grande parte da superfície posterior pode ser coberta com a pasta de alumínio, a resistência em série do metal poderá ser muito baixa (Kerschaver, 2006).

As células solares com campo retrodifusor de alumínio são amplamente usadas na indústria fotovoltaica devido a eficiência alcançada e ao processo de produção. Estas células são fabricadas com materiais com coeficientes de dilatações diferentes, que podem gerar deformações como o abaulamento (Popovich, 2013). Portanto, o processo de metalização destas células deve ser otimizado para evitar a quebra durante a soldagem e laminação para a fabricação do módulo fotovoltaico.

Em células solares com BSF foi alcançada a eficiência de até 18,7 % em lâminas de Si monocristalino tipo p (Basu, 2013) e a eficiência de 18,5 % foi obtida com substratos tipo n, (Kalio, 2011). Porém, a eficiência média das células solares produzidas pela indústria em substrato de silício Czochralski (Cz-Si) tipo p é de aproximadamente 16,5 % (Fath, 2009).

A espessura da camada de pasta de Al que forma o campo retrodifusor influencia os parâmetros elétricos da célula solar processada em Si-Cz, grau solar. Com o aumento da densidade superficial de pasta de Al de 2,8 mg/cm^2 para 3,5 mg/cm^2 , a eficiência média aumentou de 14,4 % para 15,0 %. O principal parâmetro afetado foi o FF, que aumentou de 0,71 para 0,80 (Zanescio, 2013).

Outro parâmetro de processo que afeta de forma importante a eficiência das células solares é a temperatura de queima usada para a formação da camada de BSF. Com a otimização desta etapa, é possível reduzir a recombinação dos portadores de carga minoritários na superfície posterior (Chen, 2014).

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência da largura das barras coletoras posteriores e da temperatura de queima nos parâmetros elétricos das células solares e no comprimento de difusão dos portadores de carga minoritários. As células solares foram desenvolvidas em lâminas de Si-Cz, tipo p, grau solar, com campo retrodifusor formado por pasta de Al. Para cada largura das barras coletoras posteriores, otimizou-se a temperatura de queima simultânea das pastas metálicas de Al, Al/Ag e Ag no forno de esteira.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizadas lâminas de silício crescido pela técnica Czochralski, tipo p, grau solar, orientação dos planos cristalinos {100}, espessura de (200 ± 30) μm , diâmetro de $(100 \pm 0,5)$ mm, resistividade de base de 1- 20 $\Omega\cdot\text{cm}$, tempo de vida dos portadores de carga minoritários maior que 10 μs e concentração de carbono e de oxigênio de 5×10^{16} átomos/ cm^3 e 1×10^{18} átomos/ cm^3 , respectivamente. A Fig. 1 apresenta o fluxograma do processo de fabricação de células solares.

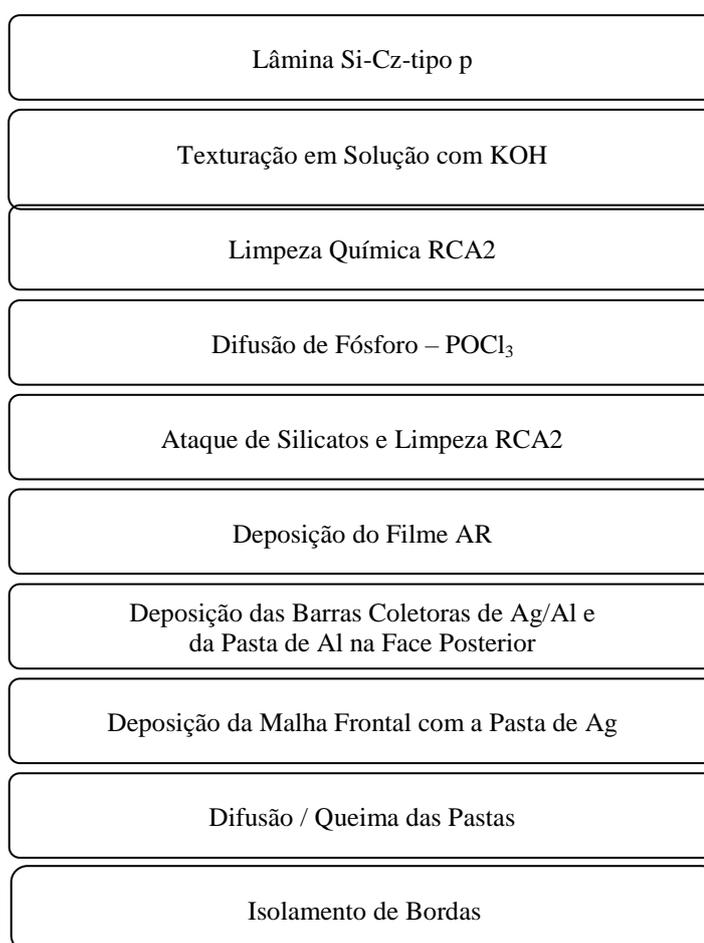


Figura 1 - Fluxograma com as etapas do processo de fabricação das células solares.

As etapas do processo foram: texturação das superfícies em solução de KOH, limpeza química superficial RCA2, difusão de fósforo em ambas as faces, ataque do silicato de fósforo em solução com ácido fluorídrico diluído e limpeza RCA2, deposição do filme antirreflexo (AR) de TiO_2 , deposição por serigrafia na face posterior das duas barras coletoras de Al/Ag, deposição por serigrafia da pasta de Al para formar o campo retrodifusor, deposição da malha metálica frontal formada por pasta de Ag, queima das pastas metálicas e isolamento das bordas com um sistema de radiação laser. O filme antirreflexo de 68 nm de espessura foi formado pela evaporação com canhão de elétrons de dióxido de titânio e a densidade superficial de pasta de Al que forma o campo retrodifusor foi de $2,8 \text{ mg/cm}^2$. As etapas otimizadas foram: a formação das barras coletoras posteriores e a formação do BSF por meio da otimização da temperatura de queima/difusão da pasta de Al e queima das pastas de Ag e Al/Ag na mesma etapa térmica.

O emissor n^+ foi formado pela difusão de fósforo utilizando POCl_3 . Esta etapa foi implementada na temperatura de $875 \text{ }^\circ\text{C}$ (Moehlecke, 2010), resultando na resistência de folha média de $(45 \pm 4) \Omega/\square$, considerando três processos de

difusão realizados. A difusão de fósforo foi implementada inclusive na face posterior, para evitar etapas térmicas para a formação de uma máscara para evitar a difusão de fósforo nesta face. No entanto, a difusão de fósforo na face posterior foi compensada pela difusão de alumínio durante a formação do BSF.

Na face posterior, primeiramente foram depositadas as barras coletoras com a pasta de Ag/Al PV202 da Dupont. Após a secagem, depositou-se a pasta de Al PV381, também da Dupont, com auxílio da máscara com espaços vazios no local das barras coletoras e, então, a pasta de Al foi seca. Este método foi avaliado em um trabalho anterior (Gonçalves, 2013), onde verificou-se que se as barras coletoras de Ag/Al são depositadas diretamente sobre a pasta de Al ocorre o descolamento das barras coletoras ou não é possível soldar as células solares para formar módulos fotovoltaicos. A deposição das barras coletoras antes da pasta de Al foi definida em função do alinhamento, que resultou em células solares com maior eficiência (Gonçalves, 2013).

O desenho das máscaras utilizadas na deposição das barras coletoras de 10 mm e da pasta de alumínio está ilustrado na Fig. 2 e Fig. 3, respectivamente. Nas regiões escuras deposita-se a pasta metálica. Estas máscaras formam células solares pseudoquadradas de 61,58 cm² a partir das lâminas de Si de 100 cm de diâmetro. As máscaras com barras coletoras menores, de 3,8 mm, estão representadas na Fig. 4 e Fig. 5. A redução das barras coletoras aumenta a região com campo retrodifusor e, conseqüentemente, pode aumentar a eficiência das células solares. Porém, aumenta a dificuldade do processo de soldagem, pois é necessário um ótimo alinhamento das barras coletoras frontais e posteriores.



Figura 2 - Desenho da máscara com as barras coletoras posteriores de 10 mm de largura.



Figura 3 - Desenho da máscara utilizada para depositar a pasta de Al em toda a superfície com exceção das barras coletoras de 10 mm de largura.



Figura 4 - Desenho das barras coletoras posteriores de 3,8 mm de largura.



Figura 5 - Desenho da máscara utilizada para depositar a pasta de Al em toda a superfície com exceção das barras coletoras de 3,8 mm de largura.

Para formar a malha na face frontal foi utilizada a máscara constituída de 38 trilhas e duas barras coletoras de 1,5 mm de largura, totalizando um fator de sombra de 8,2 %. Utilizou-se a pasta de prata PV159, nas células solares com barras coletoras posteriores de 10 mm e a pasta de prata PV16A, nos dispositivos com barras coletoras posteriores de 3,8 mm.

O processo de difusão de Al e queima das pastas metálicas foi realizado em uma única etapa térmica no forno de esteira, com aquecimento por lâmpadas halógenas tubulares. Em cada processo foram fabricadas de 3 a 4 células solares.

Todas as células solares foram caracterizadas em condições padrão de medição utilizando um simulador solar. As condições de medição são: irradiância de 100 mW/cm², 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. Também se mediu a distribuição bidimensional do comprimento de difusão dos portadores de carga minoritários com a técnica LBIC (*light beam induced current*), utilizando o equipamento WT-2000PV, da Semilab.

3. RESULTADOS DAS CÉLULAS SOLARES

3.1. Dispositivos com barras coletoras de 10 mm

Foram fabricadas 15 células solares com barras coletoras posteriores de 10 mm. As características elétricas para cada temperatura de pico da difusão de Al e queima das três pastas metálicas (T_{Q-D}) são apresentadas na Tab. 1.

Como mostra a Fig. 6 (a) a tensão de circuito aberto praticamente não foi afetada pela T_{Q-D} , variando de 576 mV a 579 mV. A maior densidade de corrente de curto-circuito, de 29,6 mA/cm², ocorreu para a T_{Q-D} de 880 °C, como se pode ver na Fig. 6 (b) e na Tab. 1.

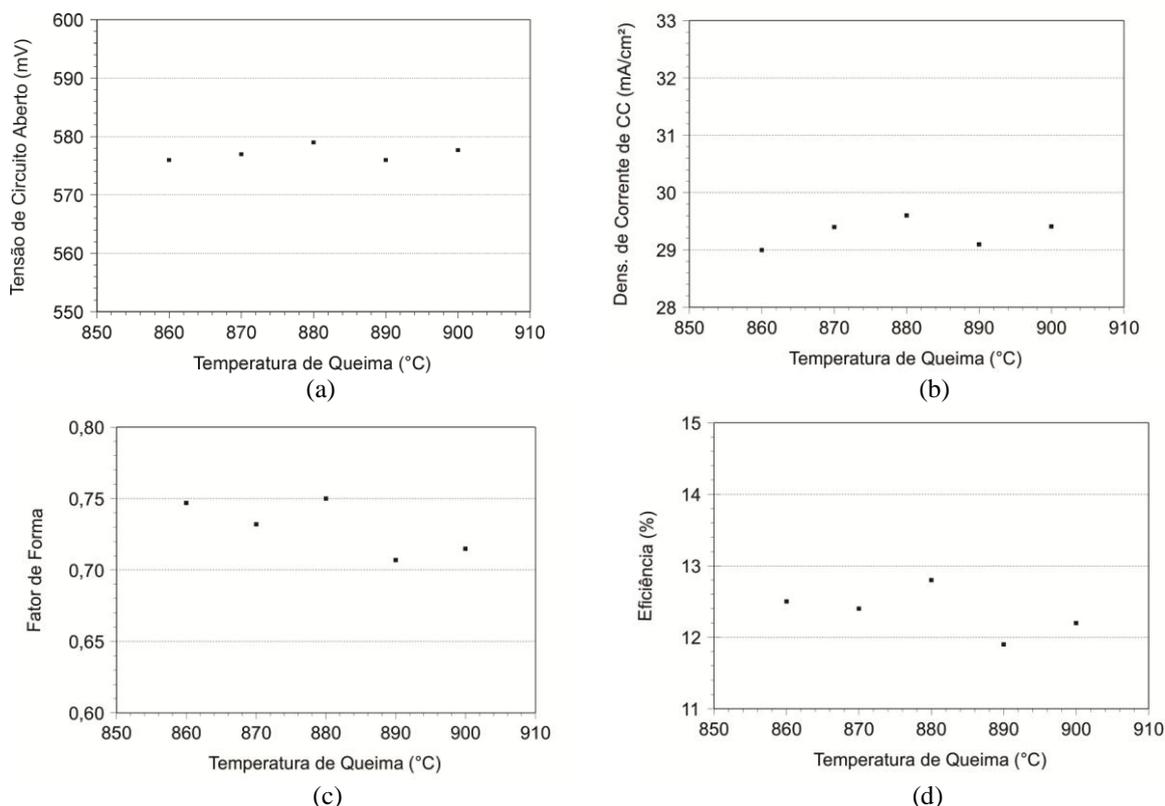


Figura 6 - (a) Tensão de circuito aberto, (b) densidade de corrente de curto-circuito, (c) fator de forma e (d) eficiência em função do pico de temperatura de difusão de Al e queima das pastas metálicas de células solares com barras coletoras posteriores de 10 mm de largura.

Tabela 1 - Parâmetros elétricos médios das células solares com metalização na face posterior formada pela deposição primeiramente da pasta de Ag/Al nas barras coletoras de 10 mm, seguida da deposição da pasta de Al em toda a superfície da lâmina, menos nas barras coletoras, em função da temperatura de difusão de Al e queima das pastas metálicas.

T_{Q-D} (°C)	Nº de células	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF	η (%)
860	1	576	29,0	0,747	12,5
870	4	577 ± 1	29,4 ± 0,1	0,732 ± 0,006	12,4 ± 0,1
880	3	579 ± 2	29,6 ± 0,1	0,75 ± 0,02	12,8 ± 0,5
890	4	576 ± 1	29,1 ± 0,3	0,707 ± 0,006	11,9 ± 0,2
900	3	577,7 ± 0,4	29,41 ± 0,05	0,715 ± 0,009	12,2 ± 0,2

Da Fig. 6 (c) nota-se que os valores do fator de forma diminuíram para a T_{Q-D} a partir de 890 °C. O maior valor médio foi de $(0,75 \pm 0,02)$ e ocorreu para a T_{Q-D} de 880 °C. Conseqüentemente, a melhor eficiência média, de $(12,8 \pm 0,5) \%$, foi obtida para a T_{Q-D} de 880 °C, conforme apresenta a Fig. 6 (d).

A Fig. 7 (a) e a Fig. 7 (b) apresentam a distribuição bidimensional do comprimento de difusão dos portadores de carga minoritários (L_D) medido por meio da técnica LBIC em células solares com eficiência similar e processadas com a T_{Q-D} de 880 °C. Somente a temperatura de secagem da pasta de Ag que forma a malha metálica frontal foi diferente. A Fig. 7 (a) mostra os resultados de uma célula solar com secagem da pasta de Ag de 220 °C e com os seguintes parâmetros elétricos: $V_{oc} = 571$ mV, $J_{sc} = 29,6$ mA/cm², $FF = 0,76$ e $\eta = 12,8 \%$. O valor médio de L_D foi de 132 μ m, variando de 98 μ m a 166 μ m conforme mostra a Fig. 7 (a). O valor médio aproximado de L_D de 132 μ m também foi obtido para a célula solar com secagem da pasta de Ag de 280 °C e com os seguintes parâmetros elétricos: $V_{oc} = 571$ mV, $J_{sc} = 28,9$ mA/cm², $FF = 0,77$ e $\eta = 12,7 \%$. Nesta célula, o L_D variou de 102 μ m a 157 μ m. Na Fig. 7 (a) e Fig. 7 (b) observa-se o menor valor de L_D na região das barras coletoras posteriores, causado pela maior recombinação dos portadores de carga minoritários onde foi depositada a pasta de Al/Ag.

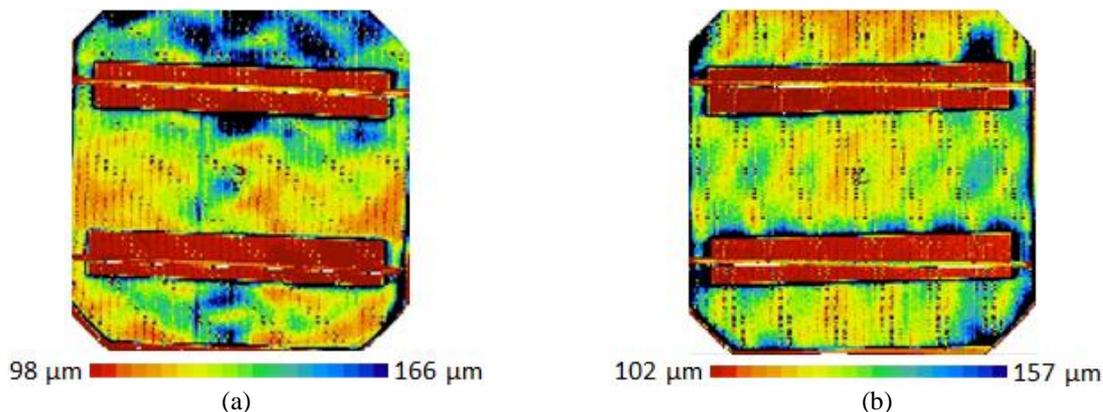


Figura 7 - Mapeamento do comprimento de difusão dos portadores de carga minoritários em células solares com barras coletoras de 10 mm de largura com temperatura de secagem da pasta de Ag (a) de 220 °C e (b) 280 °C.

3.2. Dispositivos com barras coletoras de 3,8 mm

A fim de comparar a influência da largura das barras coletoras foram fabricadas células solares com barras coletoras posteriores de Ag/Al de 3,8 mm de largura. Os resultados obtidos das células solares para cada T_{Q-D} são apresentados na Tab. 2.

Tabela 2 - Parâmetros elétricos médios das células solares com metalização na face posterior formada pela deposição primeiramente das barras coletoras de Ag/Al de 3,8 mm de largura, seguida da deposição da pasta de Al PV 381 em toda a superfície, menos nas barras coletoras, em função da temperatura de difusão de Al e queima das três pastas metálicas.

T_{Q-D} (°C)	Nº de Células	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF	η (%)
840	3	582 ± 3	$30,6 \pm 0,4$	$0,770 \pm 0,005$	$13,7 \pm 0,3$
850		$581,2 \pm 2,0$	$30,9 \pm 0,1$	$0,777 \pm 0,006$	$13,9 \pm 0,2$
860		$584,4 \pm 1,0$	$31,4 \pm 0,3$	$0,777 \pm 0,002$	$14,3 \pm 0,2$
880		$587,9 \pm 2,0$	$31,79 \pm 0,03$	$0,774 \pm 0,002$	$14,5 \pm 0,1$
900		$592,2 \pm 1,2$	$32,02 \pm 0,03$	$0,758 \pm 0,002$	$14,4 \pm 0,1$
910	4	$595,3 \pm 2,0$	$32,1 \pm 0,4$	$0,756 \pm 0,011$	$14,5 \pm 0,1$
920		$594,1 \pm 0,8$	$31,87 \pm 0,06$	$0,762 \pm 0,005$	$14,4 \pm 0,1$
940		$595,9 \pm 0,4$	$31,54 \pm 0,08$	$0,769 \pm 0,001$	$14,4 \pm 0,1$
950		$596,8 \pm 0,3$	$31,0 \pm 0,1$	$0,764 \pm 0,003$	$14,1 \pm 0,1$
970		$591,9 \pm 2,0$	$30,2 \pm 0,6$	$0,69 \pm 0,04$	$12,4 \pm 0,9$

Conforme mostra a Fig. 8 (a), observa-se que a V_{oc} tende a aumentar com a T_{Q-D} até 910 °C, permanecendo praticamente com o mesmo valor até a T_{Q-D} de 970 °C. A maior V_{oc} média foi de 597 mV, maior que o valor obtido em

células solares com barras coletoras de 10 mm, devido à redução da recombinação dos portadores de carga minoritários. Pelo mesmo fato, a J_{sc} das células solares com menor largura das barras coletoras foi maior. O valor de $32,1 \text{ mA/cm}^2$ foi obtido para a T_{Q-D} de $910 \text{ }^\circ\text{C}$. Para temperaturas maiores ou menores a este valor, a J_{sc} tende a diminuir, como se pode ver na Fig. 8 (b).

O fator de forma também foi maior que o resultado obtido para células solares com barras coletoras de 10 mm e variou de 0,76 a 0,78, com exceção do valor obtido para a T_{Q-D} de $970 \text{ }^\circ\text{C}$, como mostra a Fig. 8 (c) e Tab. 2. Nesta temperatura o fator de forma caiu para 0,69. Experimentalmente verificou-se que para esta temperatura ocorreu a degradação da pasta de Ag dos contatos frontais, danificando as células solares. Como resultado do aumento da V_{oc} , J_{sc} e FF com a redução das barras coletoras, a eficiência foi maior. Da Fig. 8 (d) nota-se que a eficiência variou de 14,3% a 14,5% no intervalo de T_{Q-D} de $860 \text{ }^\circ\text{C}$ a $940 \text{ }^\circ\text{C}$.

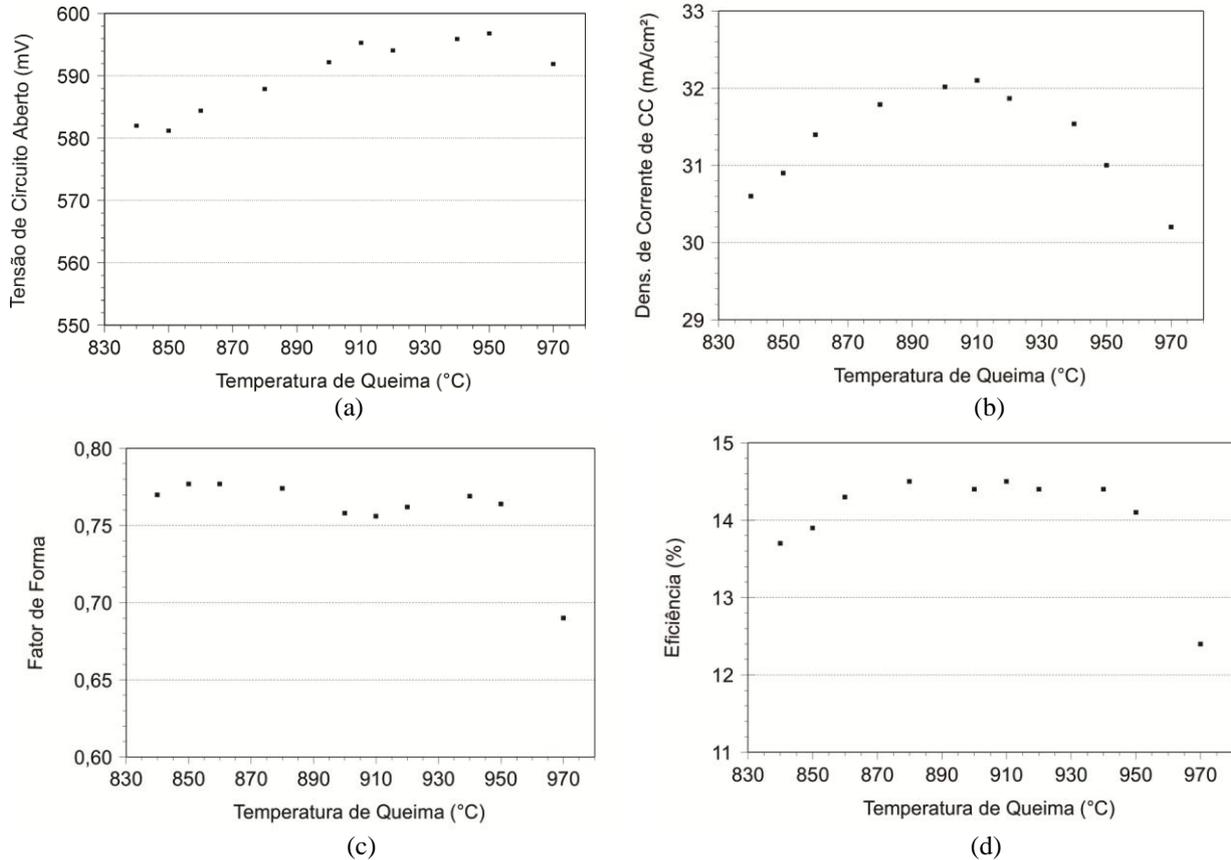


Figura 8 - (a) Tensão de circuito aberto, (b) densidade de corrente de curto-circuito, (c) fator de forma e (d) eficiência em função do pico de temperatura de difusão de Al e queima das pastas metálicas de células solares com barras coletoras posteriores de 3,8 mm de largura.

A Fig. 9 (a) e a Fig. 9 (b) apresentam a distribuição bidimensional do comprimento de difusão dos portadores de carga minoritários medido em células solares. A Fig. 9 (a) mostra os resultados de uma célula solar com os seguintes parâmetros elétricos: $V_{oc} = 548 \text{ mV}$, $J_{sc} = 30 \text{ mA/cm}^2$, $FF = 0,76$ e $\eta = 12,5 \%$. Esta célula foi processada com $T_{Q-D} = 850 \text{ }^\circ\text{C}$. O valor médio de L_D foi $120 \text{ }\mu\text{m}$ variando de $101 \text{ }\mu\text{m}$ a $140 \text{ }\mu\text{m}$. Os resultados mostrados na Fig. 9 (b) são relativos a uma célula solar processada com a T_{Q-D} de $940 \text{ }^\circ\text{C}$, cujos parâmetros elétricos são: $V_{oc} = 596 \text{ mV}$, $J_{sc} = 32 \text{ mA/cm}^2$, $FF = 0,77$ e $\eta = 14,5 \%$. Neste caso, o valor médio de L_D foi de $516 \text{ }\mu\text{m}$ e variou de $190 \text{ }\mu\text{m}$ a $780 \text{ }\mu\text{m}$. Portanto, a maior temperatura de difusão de Al e queima das pastas metálicas produz uma região de BSF mais efetiva, reduzindo a probabilidade de recombinação dos portadores de carga minoritários na região posterior. Para a maior T_{Q-D} o comprimento de difusão dos portadores de carga minoritários é aproximadamente 2,5 vezes maior que a espessura da lâmina de silício ($200 \text{ }\mu\text{m}$).

A curva da densidade de corrente em função da tensão elétrica aplicada da melhor célula solar com barras coletoras posteriores de 10 mm e 3,8 mm é mostrada na Fig. 10. A célula solar com barras coletoras maiores foi processada com a T_{Q-D} de $880 \text{ }^\circ\text{C}$ e as características elétricas foram: $V_{oc} = 581 \text{ mV}$, $J_{sc} = 29,7 \text{ mA/cm}^2$, $FF = 0,78$ e $\eta = 13,4 \%$. A melhor célula solar com barras coletoras posteriores de 3,8 mm foi processada com a T_{Q-D} de $910 \text{ }^\circ\text{C}$. Nesta célula solar, os parâmetros elétricos foram: $V_{oc} = 596 \text{ mV}$ e $J_{sc} = 32,2 \text{ mA/cm}^2$, $FF = 0,76$ e $\eta = 14,5 \%$. Confirma-se que todos os parâmetros elétricos aumentaram com a redução das barras coletoras, devido à maior área da região de BSF.

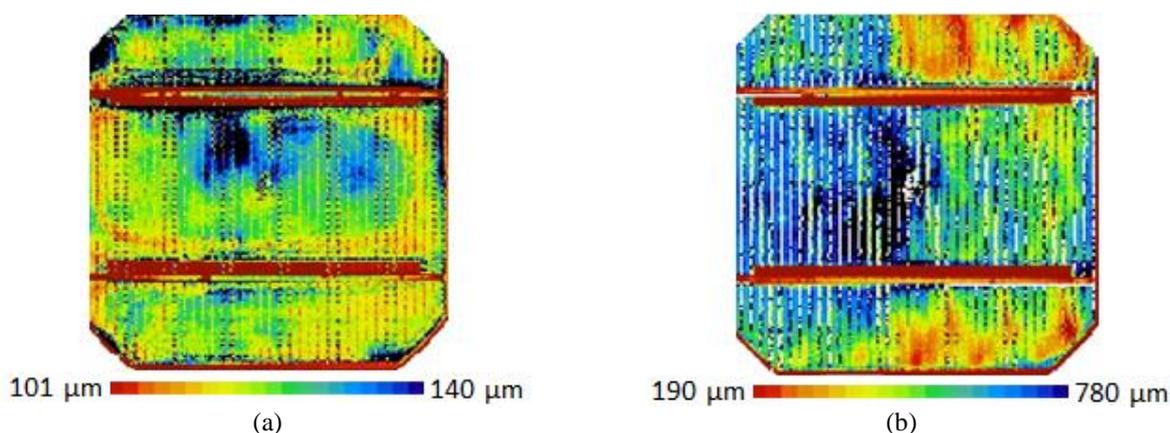


Figura 9 - Mapeamento do comprimento de difusão dos portadores de carga minoritários em células solares com barras coletoras de 3,8 mm de largura processadas na temperatura de difusão de Al e queima das pastas metálicas de (a) 850 °C ($V_{oc} = 548$ mV e $\eta = 12,5$ %) e (b) 940 °C ($V_{oc} = 596$ mV e $\eta = 14,5$ %).

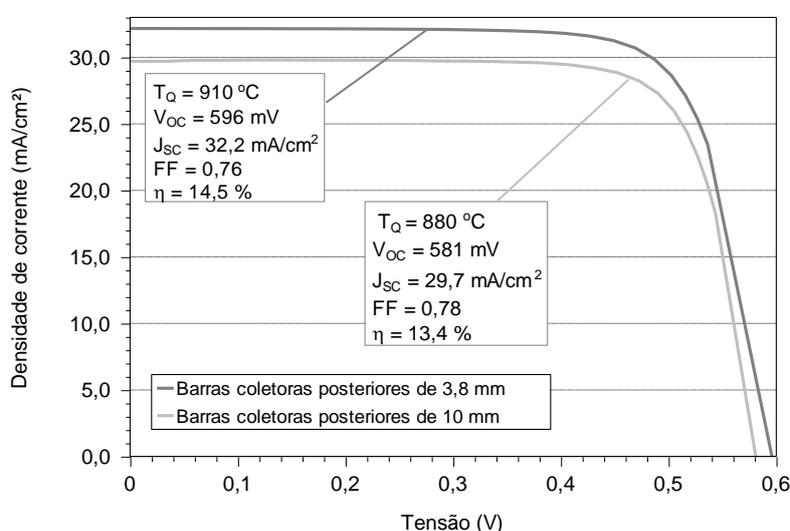


Figura 10 - Curva da densidade de corrente elétrica em função da tensão aplicada das melhores células solares com barras coletoras de 10 mm e 3,8 mm de largura, processadas em diferentes temperaturas de difusão de Al e queima das pastas metálicas.

4. CONCLUSÕES

Foi apresentada a análise da influência da largura das barras coletoras e da temperatura de pico da difusão de Al e queima das pastas metálicas em células solares com campo retrodifusor formado por pasta de Al.

Para células solares com barras coletoras posteriores de 10 mm de largura, concluiu-se que o fator de forma foi o parâmetro mais afetado pela temperatura de pico de queima das pastas metálicas. O maior valor médio do fator de forma foi de $(0,75 \pm 0,02)$ e resultou na melhor eficiência média, de $(12,8 \pm 0,5)$ %, obtida para a T_{Q-D} de 880 °C. O valor médio da distribuição bidimensional do comprimento de difusão dos portadores de carga minoritários foi de 132 μm . Conforme esperado, o menor valor de L_D ocorreu principalmente na região das barras coletoras posteriores.

Com a redução das barras coletoras posteriores, todos os parâmetros elétricos das células solares aumentaram. A maior V_{oc} média foi de 597 mV, aproximadamente 20 mV maior que o resultado medido em células solares com barras coletoras maiores, devido à redução da recombinação dos portadores de carga minoritários. Pelo mesmo fato, a J_{sc} média aumentou de 29,6 mA/cm^2 para 32,1 mA/cm^2 . O fator de forma variou de 0,76 a 0,78, com exceção do valor obtido para a maior T_{Q-D} . Consequentemente, a eficiência das células solares com menor largura das barras coletoras foi maior. Neste caso, a eficiência variou de 14,3 % a 14,5 % no intervalo de T_{Q-D} de 860 °C a 940 °C. A distribuição bidimensional do comprimento de difusão dos portadores de carga minoritários medida em uma célula solar processada com $T_{Q-D} = 850$ °C foi de 120 μm . Na célula solar processada com a T_{Q-D} de 940 °C o valor médio de L_D foi de 516 μm , resultando na eficiência de 14,5 %. As melhores células solares com barras coletoras de 10 mm e de 3,8 mm apresentaram a eficiência de 13,4 % e 14,5 % respectivamente. Neste tipo de células solares, quando a densidade superficial de pasta de Al foi aumentada para 3,5 g/cm^2 e otimizada a temperatura de queima, a eficiência subiu para 15,1 %, devido principalmente ao aumento da J_{sc} (Zanescó, 2013).

Agradecimentos

Os autores agradecem a Eletrosul Centrais Elétricas S. A. (Eletrosul) pela subvenção do projeto de P&D intitulado “Desenvolvimento de Processos Industriais para Fabricação de Células Solares com Pasta de Alumínio”, convênio nº 88500014 e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de Produtividade em Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora.

REFERÊNCIAS

- Atlas Aplicações de Energia Solar. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03Energia_Solar\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03Energia_Solar(3).pdf)>. Acesso em: 22 de abril 2012.
- Basu, P. K. et al., 2013. 18.7% Efficient inline-diffused screen-printed silicon wafer solar cells with deep homogeneous emitter etch-back, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, v. 117, pp. 412–420.
- Cao, X. L., Chen, Y. M., 2011. Simulation and analysis on the property of aluminum back-surface-field of monocrystalline silicon solar cells, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. v. 13, p. 432 – 438.
- Chen, Y., Shen, H., Altermatt, P. P., 2014. Analysis of recombination losses in screen-printed aluminum-alloyed back surface fields of silicon solar cells by numerical device simulation, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, v. 120, pp. 356–362.
- Dhariwal, S.R.; Kulshreshtha, A. P., 1981. Theory of back surface field silicon solar cells. *Solid-State Electronics*, v. 24, p. 1161 – 1165.
- Fath, P., Keller, S., Winter, P., Jooß, W., Herbst, W., 2009. Status and perspective of crystalline silicon solar cell production, 36th IEEE PVSC, Seattle.
- Gonçalves, A. Desenvolvimento de Células Solares: Influência do Processo de Formação do Campo Retrodifusor com Pasta de Alumínio. Porto Alegre. 2013. 124 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia dos Materiais). PGETEMA, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Brasil.
- Honsberg, C.; Bowden, S. Photovoltaics CDROM. Disponível em:<<http://www.udel.edu/igert/pvcdrom>>. Acesso em: 22 abril 2012.
- Kalio, A. et al., 2011. Metallization of n-type silicon solar cells using fine line printing techniques, *Energy Procedia*, v. 8, pp. 571–576.
- Kerschaver, E. V.; Beaucarne, G., 2006. Back-contact solar cells: a review, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 14, pp. 107 – 123.
- Kwon, T., Kim, S., Kyung, D., Jung, W., Kim, S., Lee, Y.; Kim, Y., Jang, K., Jung, S., Shin, M., Yi, J., 2010. The effect of firing temperature profiles for the high efficiency of crystalline Si solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 94, pp. 823–829.
- Moehlecke, A.; Zanesco, I., 2010. Pilot production of p⁺pn⁺ and n⁺pp⁺ silicon solar cells: efficiency x yield, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia.
- Peter, S., Lehmann, H., 2009. Renewable energy outlook 2030 energy watch group global renewable energy scenarios, 24th European photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg.
- Popovich, V. A. et al., 2013. Understanding the properties of silicon solar cells aluminium contact layers and its effect on mechanical stability, *Materials Sciences and Applications*, v. 4, pp. 118-127.
- Zanesco, I., Gonçalves, V. A., Moehlecke, A., 2013. Influence of the aluminum paste surface density on the electrical parameters of silicon solar cells, 2013 ISES Solar World Congress, Cancun.

INFLUENCE OF THE WIDTH OF THE BUSBARS AND FIRING TEMPERATURE IN SOLAR CELLS WITH ALUMINUM BACK SURFACE FIELD

Abstract . *The use of solar energy for electric energy production has been highlighted due to the exhaustion of natural sources. Solar cells fabricated in p-type Si-Cz wafers and with back surface field formed by aluminum paste are largely produced by industry. The formation of the back surface field and busbars in a solar cell is very important to the overall performance of the solar cell. The objective of this study is to evaluate the influence of the width of the rear busbars and of the firing temperature in solar cells developed in solar grade Si-Cz wafers, with back surface field performed by aluminum paste. The width of the busbars was ranged and the simultaneous firing peak temperature was optimized for Ag, Al, and Ag/Al pastes. The firing temperature was ranged from 840 °C to 970 °C. The fill factor for the solar cells with busbars of 10 mm was 0.75, lower than the value of 0.78 obtained for devices with busbar of 3.8 mm, increasing the open circuit voltage from 579 mV to 597 mV. The efficiency achieved was 14.5 %. The minority charge carrier diffusion length measured in solar cells with busbars of 3.8 mm was 516 μm. This value was greater than that obtained with devices with bases of 10 mm, which value was 132 μm.*

Key words: *Solar Cells, Aluminium Back Surface Field, Busbars.*