

Desenvolvimento e análise de células solares com campo retrodifusor formado por pasta de alumínio e difusão em forno de esteira

Development and analysis of solar cells with back surface field formed by aluminum paste and diffusion in belt furnace

Juliane Bernardes Marcolino

Mestre-Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA), Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS) - Porto Alegre - RS.
jujumarcolino@hotmail.com

Adriano Moehlecke

Professor Adjunto - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS) - Porto Alegre - RS.
moehleck@puccrs.br

Izete Zanescio

Professora Adjunta - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS) - Porto Alegre - RS.
izete@puccrs.br

Resumo

A redução no custo de fabricação de células solares, mantendo a eficiência de conversão de energia solar em elétrica, é uma das principais metas de pesquisa, na área de energia solar fotovoltaica. O objetivo desse trabalho está centrado no desenvolvimento e na análise de um processo de fabricação de células solares industriais de silício, com região de campo retrodifusor, formada pela deposição de pasta de Al, por serigrafia e difusão em forno de esteira. A queima das pastas de prata e a queima de prata-alumínio, usadas para formar a malha metálica frontal e posterior das células solares e a difusão de Al foram realizadas simultaneamente. A melhor célula foi fabricada com processo de difusão/queima a temperatura de 860°C e velocidade de esteira de 150 cm/min, resultando em dispositivos de 12,8% de eficiência. A região de campo retrodifusor obtida não foi tão efetiva quanto à obtida por meio da deposição de alumínio em alto vácuo e por meio da difusão em forno convencional ou forno de esteira.

Palavras-chave: Energia solar, célula solar, campo retrodifusor de alumínio, pasta serigrafia, forno de esteira.

Abstract

Cost reduction of solar cells while maintaining high solar energy conversion efficiencies is one of the main research goals in photovoltaic solar energy. The aim of this work is centered on the development of a fabrication process of industrial silicon solar cells with a back surface field region obtained by Al deposited by screen-printing and diffused into silicon wafer in a belt furnace. Ag and Ag-Al pastes were fired to establish the metallic contacts simultaneously to the Al diffusion. The best cell was processed at a temperature of 860°C and belt speed of 150 cm/min, achieving an efficiency of 12.8%. The BSF region was not as effective as that obtained from Al deposited at high vacuum and diffused in standard tube furnaces or belt furnaces.

Keywords: Solar energy, solar cells, aluminum back surface field, screen printing paste, belt furnace.

1. Introdução

A principal estrutura básica das células solares de silício é n^+pp^+ , isto é, com a região frontal dopada com fósforo, para se formar a junção pn, e com a região posterior dopada com alumínio, para se formar o campo retrodifusor, também denominado de BSF (*back surface field*). Essa última região atua como refletor dos portadores minoritários, permitindo que estes se desloquem no material por um maior tempo, antes de se recombinarem, aumentando, principalmente, a tensão de circuito aberto. A difusão de alumínio apresenta as seguintes vantagens para a formação da região p^+ : 1) o alumínio pode ser depositado por evaporação, por serigrafia, a partir de uma pasta, ou por *spin-on*, na forma de solução líquida e, depois, difundido nas lâminas de silício, sem a necessidade de proteção da face frontal dopada com fósforo; 2) o alumínio, quando processado na temperatura acima da temperatura do ponto eutético Si-Al, produz *gettering*, isto é, há atração e captura de impurezas indesejadas, melhorando o tempo de vida dos portadores minoritários na lâmina de silício (Lagos et al. 1994; Luque et al., 1996). Depois da deposição da camada de alumínio, as lâminas podem ser processadas em fornos

2. Materiais e métodos

Para a obtenção de células solares com estrutura n^+pp^+ , as lâminas de Si passam por uma série de processos químicos e físicos. Na Figura 1, apresenta-se um esquema do processo desenvolvido para fabricação das células solares. Inicialmente, as lâminas foram submetidas ao processo de texturação, que consiste em submetê-las a um ataque químico anisotrópico, responsável pela obtenção de micropirâmides de base quadrada em Si monocristalino com orientação $\langle 100 \rangle$. Em seguida, foram realizados passos de limpezas químicas RCA (Kern, 1993), para se eliminarem contaminantes que possam afetar a qualidade do dispositivo e, então, as lâminas foram oxidadas em um passo térmico a 1000°C . A difusão de fósforo deve ser implementada em uma das faces para a formação da região n^+ e é necessária a remoção do óxido somente nessa face da lâmina. Por isso, depois da oxidação, foi depositada uma resina fotossensível, em uma face. Posteriormente à deposição e à secagem da resina, realizou-se um ataque em solução de HF tam-

convencionais com tubo de quartzo, fornos de processamento térmico rápido ou fornos de esteira, sendo que estes últimos possibilitam a obtenção de elevadas escalas de produção (Narasimha & Rohatgi, 1997; Zanesco et al., 2010).

Atualmente, o processo de formação da região p^+ mais utilizado pela indústria de células solares é a deposição de pastas de Al por serigrafia, seguida da difusão em forno de esteira. Com esse processo e com lâminas de silício monocristalino, crescido pela técnica Czochralski (Cz) de $156\text{ mm} \times 156\text{ mm}$, foram obtidas eficiências de 18% (Münzer et al., 2011), para emissores n^+ homogêneos, e de 18,6% (Lai et al., 2011), com emissores seletivos dopados com fósforo. Em ambos os casos, a superfície frontal era muito bem passivada com filme de nitreto de silício depositado por PECVD (*plasma enhanced chemical vapor deposition*).

Nos processos de difusão de alumínio, a temperaturas maiores que 800°C , uma fase líquida de Al-Si está formada e o Si inicia o processo de difusão, para a camada de Al e vice-versa (Uruena et al., 2009; Meemongkolkiat et al., 2006; Rauer et al., 2011). Quando o Al atinge a sua saturação com o Si, a dissolu-

ção do Si, para a região líquida de Al-Si, reduz-se, resultando em um “consumo” moderado de Si. Quando se inicia o resfriamento, três novas camadas são formadas, na face posterior. Uma camada de Si dopada com Al cresce, epitaxialmente, na lâmina, formando a camada de BSF, que consiste de Si dopado com 1% de Al, cuja espessura varia entre $1\text{ }\mu\text{m}$ e $5\text{ }\mu\text{m}$ (Chalfoun, 1996; Narasimha e Rohatgi, 1999; Uruena et al., 2009). O líquido remanescente, na temperatura abaixo da temperatura do ponto de eutético, solidifica com a composição eutética, formando uma fina camada de Al, com 12% de Si, com espessura que varia entre $2\text{ }\mu\text{m}$ e $5\text{ }\mu\text{m}$, dependendo da espessura da pasta de alumínio depositada (Bähr et al., 2005; Huster, 2005; Uruena et al., 2009).

do que a velocidade da esteira (V_E) define o tempo de processamento térmico. Para se estabelecerem os contatos, na região frontal n^+ e posterior p^+ , depositaram-se malhas de metalização, por serigrafia. Na face frontal, se depositou uma pasta contendo Ag, que deve perfurar o filme de TiO_2 , para contatar o silício, no processo chamado de queima de pastas (*firing*). Na face posterior, usou-se uma pasta de Ag/Al. Por fim, para se evitar o curto-circuito entre as faces da lâmina, foi realizado o corte das bordas das células solares com feixe de radiação *laser*. Nesse trabalho, realizou-se o processo de difusão de Al e efetuou-se a queima das pastas de Ag e Ag/Al, na mesma etapa, e, depois, compararam-se os resultados com células solares com difusão de Al e queima das pastas em etapas independentes. Utilizaram-se lâminas de Si-Cz, tipo p, orientação $\langle 100 \rangle$, resistividade de base entre $7\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ e $13\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$, espessura de $(300 \pm 20)\text{ }\mu\text{m}$ e 100 mm de diâmetro. Após o processo de corte com laser, quatro setores circulares foram retirados

ção do Si, para a região líquida de Al-Si, reduz-se, resultando em um “consumo” moderado de Si. Quando se inicia o resfriamento, três novas camadas são formadas, na face posterior. Uma camada de Si dopada com Al cresce, epitaxialmente, na lâmina, formando a camada de BSF, que consiste de Si dopado com 1% de Al, cuja espessura varia entre $1\text{ }\mu\text{m}$ e $5\text{ }\mu\text{m}$ (Chalfoun, 1996; Narasimha e Rohatgi, 1999; Uruena et al., 2009). O líquido remanescente, na temperatura abaixo da temperatura do ponto de eutético, solidifica com a composição eutética, formando uma fina camada de Al, com 12% de Si, com espessura que varia entre $2\text{ }\mu\text{m}$ e $5\text{ }\mu\text{m}$, dependendo da espessura da pasta de alumínio depositada (Bähr et al., 2005; Huster, 2005; Uruena et al., 2009).

O objetivo desse trabalho é apresentar o desenvolvimento e a análise de um processo de fabricação de células solares com região p^+ formada por pasta de alumínio e difusão em forno de esteira. Os resultados obtidos foram comparados aos resultados de células com região p^+ formada por alumínio evaporado em alto vácuo e difundido em forno convencional e de esteira.

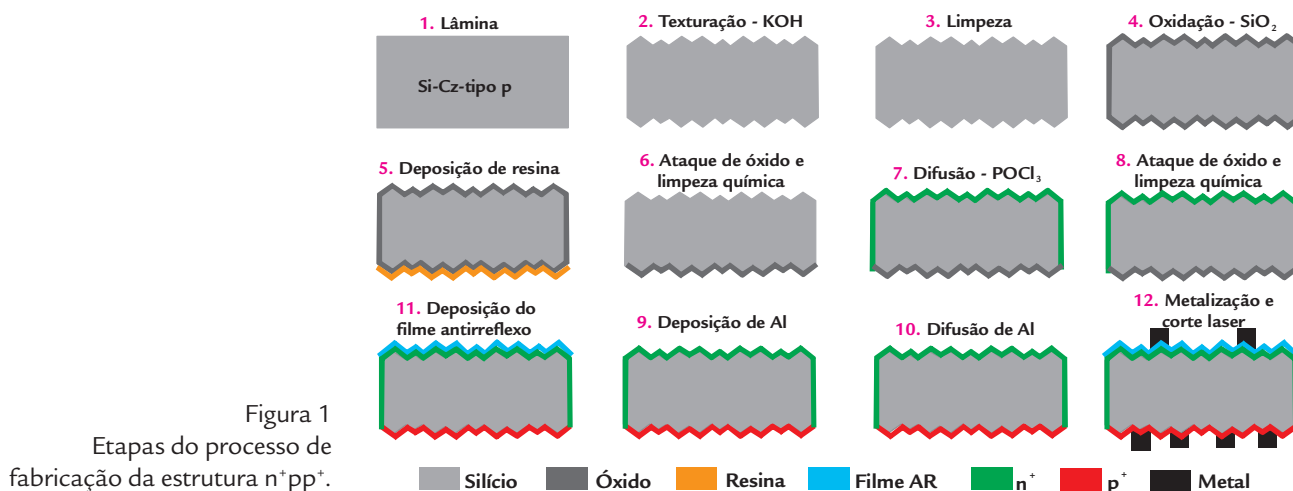
ção do Si, para a região líquida de Al-Si, reduz-se, resultando em um “consumo” moderado de Si. Quando se inicia o resfriamento, três novas camadas são formadas, na face posterior. Uma camada de Si dopada com Al cresce, epitaxialmente, na lâmina, formando a camada de BSF, que consiste de Si dopado com 1% de Al, cuja espessura varia entre $1\text{ }\mu\text{m}$ e $5\text{ }\mu\text{m}$ (Chalfoun, 1996; Narasimha e Rohatgi, 1999; Uruena et al., 2009). O líquido remanescente, na temperatura abaixo da temperatura do ponto de eutético, solidifica com a composição eutética, formando uma fina camada de Al, com 12% de Si, com espessura que varia entre $2\text{ }\mu\text{m}$ e $5\text{ }\mu\text{m}$, dependendo da espessura da pasta de alumínio depositada (Bähr et al., 2005; Huster, 2005; Uruena et al., 2009).

e se obtiveram células solares pseudoquadradas de 80 mm x 80 mm, com área de 6158 mm².

Considerando-se que o fabricante da pasta de alumínio sugere temperaturas de difusão/queima da ordem de 880°C (DuPont, 2007), a temperatura de queima das pastas metálicas e de difusão do Al, em passo térmico simultâneo, foi variada de 860°C a 900°C. A velocidade de esteira foi variada de 130 cm/min a 190 cm/min. Além disto, para uma velocidade de esteira (V_E) selecionada, a temperatura de queima/difusão (T) foi variada de 830°C a 890°C. Para comparação dos resultados, foi implementado

um processo, para fabricação de células solares, com difusão de Al, na temperatura de queima de 880°C e 950°C, em passo independente da queima das pastas da malha metálica. As características elétricas das células solares foram medidas sob condições-padrão (1000 W/m², espectro AM 1,5G e 25°C), em um simulador solar desenvolvido na PUCRS. Foram determinados os seguintes parâmetros das células solares: tensão de circuito aberto (V_{oc}), densidade de corrente de curto-circuito (J_{sc}), fator de forma (FF) e eficiência (η). Cabe observar que esses parâmetros estão relacionados pela equação $\eta = FF \cdot V_{oc} \cdot J_{sc}$. Para se avaliar o

comprimento de difusão dos portadores minoritários (L_m), ou seja, o caminho médio percorrido por eles, antes de sua recombinação, foram realizadas medidas da corrente de curto-circuito com a célula iluminada por diodos laser, que emitem radiação em diferentes comprimentos de onda. Essa técnica é denominada de LBIC (*light beam induced current*) (Flohr & Helbig, 1989). No caso do equipamento SemiLab WT-2000PV utilizado, esses comprimentos de onda são de 648 nm, 845 nm, 953 nm e 973 nm e possibilitaram a obtenção do comprimento de difusão dos portadores de carga minoritários.



3. Resultados e discussões

Influência da temperatura de queima das malhas de metalização e difusão de alumínio em processo térmico simultâneo

A Tabela 1 apresenta as características elétricas médias das células solares, bem como a maior eficiência atingida, segundo as diferentes combinações de T e V_E . Ao se analisarem os resultados da Tabela 1, observam-se pequenas variações na V_{oc} e J_{sc} e constata-se que o fator de forma é o parâmetro que determina o comportamento da eficiência, em função da temperatura de queima/difusão e da velocidade da esteira. Para as temperaturas de 860°C, 870°C e 880°C, a melhor V_E foi de 150 cm/s. Porém, para as temperaturas de 890°C e 900°C, a melhor V_E desloca-se para maiores valores. Em realidade, o comportamento da eficiência determinado pelo FF, parâmetro fortemente influenciado pela resistência em série, demonstra que a malha de metalização frontal e a posterior definem a eficiência da célula solar. Considerando os valores médios

e a incerteza, três combinações de parâmetros de processo térmico apresentaram os melhores resultados: 860°C / 150 cm/min, 890°C / 180 cm/min e 900°C / 190 cm/min. A melhor célula foi fabricada com 860°C / 150 cm/min e, por isto, se explorou a possibilidade de melhorar a célula, buscando-se uma temperatura ótima para essa velocidade de esteira.

A Figura 2 apresenta as características elétricas médias e as melhores características das células solares fabricadas, em função da temperatura, para $V_E = 150$ cm/min. Novamente observa-se que o FF é o parâmetro que define o comportamento da eficiência, em função da temperatura de difusão de alumínio e queima das pastas de prata e prata/alumínio. Para temperaturas abaixo de 860°C, o FF médio permanece na faixa de 0,60 a 0,63, demonstrando a exis-

tência do contato metal-semicondutor de alta resistência. Para a temperatura de 860°C, o FF médio sobe para 0,73 e, depois, decai levemente, em função do aumento da temperatura. Esse resultado mostra que o melhor processo de queima da pasta de prata sobre o filme antirreflexo de TiO₂ ocorre na temperatura de 860°C e o aumento da temperatura pode degradar a malha de metalização. O pequeno aumento, na V_{oc} , observado na Figura 2A, com o aumento de T , que pode ser atribuído a um melhor BSF, não é suficiente para compensar a redução no FF e a eficiência que apresenta o comportamento do FF. Esse aumento na V_{oc} mostra que o substrato não é afetado negativamente pelo aumento da T , durante o processo térmico, e a redução na J_{sc} somente pode ser atribuída a um aumento da refletância na face frontal (Ly et al., 2007).

T (°C)	n° de Células	V _E (cm/min)	V _{oc} (mV)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF	η (%)	η _{Máx} (%)
860	3	130	547 ± 1	31,0 ± 0,3	0,540 ± 0,030	9,1 ± 0,5	9,7
	3	150	552 ± 7	30,6 ± 0,1	0,734 ± 0,024	12,4 ± 0,6	12,8
	2	180	545 ± 1	30,6 ± 0,1	0,628 ± 0,004	10,5 ± 0,1	10,5
870	4	130	557 ± 1	30,2 ± 0,3	0,711 ± 0,020	12,0 ± 0,3	12,3
	4	150	549 ± 7	30,3 ± 0,1	0,738 ± 0,008	12,3 ± 0,3	12,6
	4	180	550 ± 4	30,3 ± 0,2	0,736 ± 0,015	12,3 ± 0,3	12,6
880	6	130	550 ± 8	29,5 ± 0,6	0,670 ± 0,050	10,9 ± 0,8	12,1
	4	150	554 ± 5	30,2 ± 0,2	0,720 ± 0,023	12,0 ± 0,4	12,5
	5	180	551 ± 5	30,0 ± 0,3	0,735 ± 0,006	12,1 ± 0,1	12,3
890	3	130	549 ± 4	29,9 ± 0,2	0,678 ± 0,015	11,1 ± 0,3	11,5
	4	150	560 ± 1	30,2 ± 0,2	0,690 ± 0,050	11,6 ± 0,8	12,3
	4	180	557 ± 1	30,1 ± 0,1	0,747 ± 0,006	12,5 ± 0,1	12,6
	3	190	550 ± 4	30,5 ± 0,2	0,734 ± 0,015	12,3 ± 0,3	12,5
900	4	180	548 ± 3	30,3 ± 0,4	0,702 ± 0,017	11,7 ± 0,3	12,0
	4	190	554 ± 2	30,4 ± 0,1	0,735 ± 0,005	12,4 ± 0,1	12,4

Tabela 1

Valores médios das características elétricas de células solares fabricadas com região de BSF, formada por pasta de alumínio, depositada, por serigrafia, e processada em forno de esteira. $\eta_{Máx}$ é a eficiência da melhor célula fabricada.

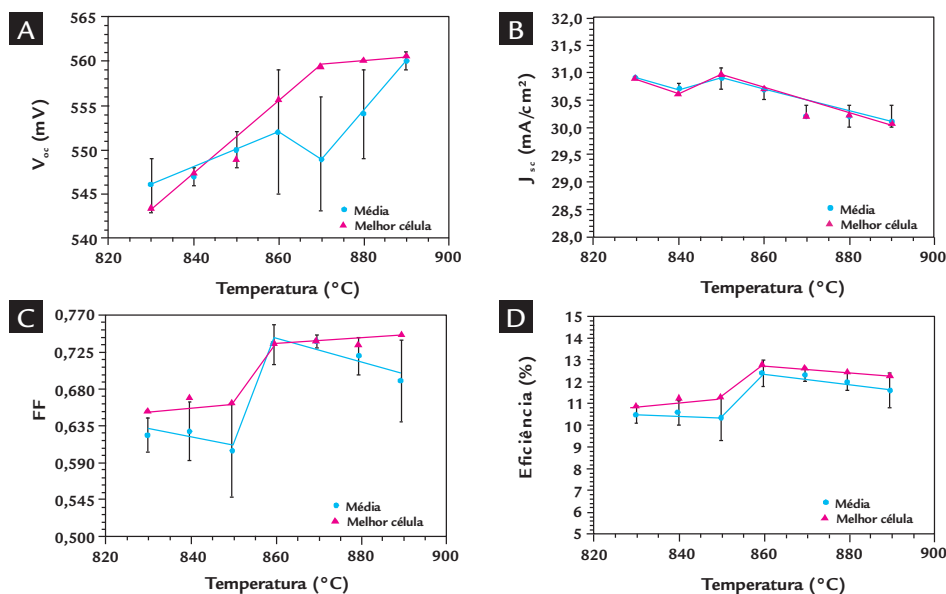


Figura 2

(A) V_{oc} , (B) J_{sc} , (C) FF e (D) η em função da temperatura de queima/difusão para $V_E = 150$ cm/min.

Difusão de alumínio e queima das pastas de Ag e Ag/Al em dois passos térmicos

Uma alternativa para avaliar, independentemente, os parâmetros de processo de difusão de Al e de queima das pastas de Ag e Ag/Al é a realização dessas etapas, independentemente. Para Duerinckx et al. (2004), a formação dos contatos frontais e posteriores, em etapas separadas, proporciona maior flexibilidade, na obtenção de processos ótimos de queima e difusão, podendo-se obter maiores eficiências. Porém pode ocorrer uma

degradação indesejável, no dispositivo, ao se submeterem as lâminas a dois passos térmicos, bem como incrementar os custos de produção. Como uma primeira aproximação, avaliou-se o processo de difusão de Al depositado, por serigrafia, na temperatura de 880°C e V_E de 110 cm/min e 130 cm/min. As pastas de Ag e Ag/Al foram processadas a 870°C e V_E de 180 cm/min. A eficiência média das células atingiu 11,3 %, com FF e J_{sc}

menores que os valores obtidos, em processo simultâneo. A melhor célula apresentou a eficiência de 12 %, valor menor que os obtidos com a difusão/queima simultânea. A temperatura da difusão de alumínio foi aumentada para 950°C, buscando-se uma região de BSF de maior concentração, em superfície e profundidade (Narasimha, Rohatgi & Weeber, 1999), e os resultados foram similares, para três V_E usadas, conforme mostra a Tabela 2.

Comparação de células solares fabricadas com diferentes técnicas de deposição e difusão de alumínio

A célula solar que apresentou a maior eficiência, de 12,8%, processada a 860°C/150 cm/min, foi caracterizada pela técnica LBIC, para análise da efetividade da região do campo retrodifusor, formado por deposição da pasta de Al, por serigrafia, e queima/difusão em

forno de esteira. Essa célula foi comparada com células n⁺pp⁺, fabricadas no mesmo tipo de substrato, com diferentes formas de deposição e difusão do alumínio. Nestas últimas, foram depositados, por evaporação em alto vácuo, filmes de alumínio de alta pureza (99,999%). Em

um processo, a difusão foi realizada em forno convencional e, no outro processo, em forno de esteira. Na Figura 3, compara-se o comprimento de difusão dos portadores minoritários das células solares, fabricadas com as três diferentes técnicas de deposição e difusão de Al.

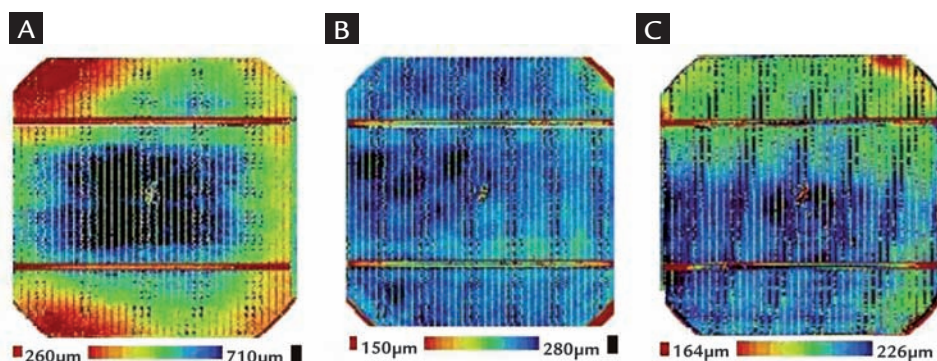
Tabela 2

Valores médios das características elétricas de células solares fabricadas com região de BSF, com alumínio difundido em processo térmico, independente da queima das pastas de Ag e Ag/Al.

T (°C)	n° de Células	V _E (cm/min)	V _{oc} (mV)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF	η (%)	η _{Máx} (%)
880	3	110	536 ± 4	28,7 ± 0,3	0,734 ± 0,002	11,3 ± 0,1	11,3
	4	130	543 ± 12	29,6 ± 2,3	0,700 ± 0,040	11,3 ± 0,5	12,0
950	3	130	560 ± 4	30,3 ± 0,8	0,664 ± 0,012	11,3 ± 0,3	11,4
	3	150	559 ± 1	30,3 ± 0,2	0,670 ± 0,001	11,4 ± 0,3	11,6
	2	180	558 ± 3	28,9 ± 2,3	0,660 ± 0,060	10,6 ± 0,1	10,7

Figura 3

Mapas dos comprimentos de difusão obtidos de uma (A) célula solar com Al de alta pureza, depositado por evaporação, em alto vácuo, e de difusão, em forno convencional, com tubo de quartzo (Moehlecke & Zanescio, 2010), (B) célula com Al depositado em alto vácuo e de difusão em forno de esteira (Zanescio, Moehlecke & Veleda, 2010) e (C) célula com Al depositado por serigrafia e queima/difusão em forno de esteira.



A célula solar n⁺pp⁺ com Al depositado por evaporação e de difundido em forno convencional, com tubo de quartzo, apresentou um valor médio de comprimento de difusão de 486 μm, com uma grande variação, sendo de 260 μm nas bordas e maior que 700 μm no centro (Moehlecke & Zanescio, 2010). O dispositivo fabricado com Al, depositado por evaporação e processado em forno de esteira, apresentou L_m de 260 μm, com uma distribuição mais uniforme na célula. Para a melhor célula desenvolvida, o L_m foi de 204 μm. Para esse dispositivo, o menor valor de L_m foi de 164 μm, nas bordas da célula. Pôde-se observar que o processamento, em forno de esteira, é o responsável pelo baixo valor do comprimento de difusão dos portadores minoritários e não o tipo de Al usado para formar a região p⁺ de BSF.

A Tabela 3 apresenta as características elétricas das melhores células solares produzidas com diferentes técnicas de deposição e difusão de Al, para formação da região p⁺. Nas células solares com Al depositado por evaporação e difusão em

forno de esteira, a difusão de Al foi realizada a 900°C (Veleda, 2009; Zanescio, Moehlecke & Veleda, 2010). Ao se compararem as características elétricas das melhores células solares, observa-se uma significativa diferença nos valores de V_{oc}, indicando que a região p⁺ foi pouco eficaz nos dispositivos com pasta de Al.

Para se identificarem os principais fatores que limitam a eficiência das células solares fabricadas, as mesmas foram simuladas com o programa computacional PC-1D (Basore & Clugston, 1997). Foram fixados os seguintes parâmetros nas simulações: espessura de 300 μm, refletância da superfície texturizada frontal com filme AR de TiO₂, fator de sombra de 9,5%, resistividade de base de 9 Ω.cm, velocidade de recombinação de 10⁷ cm/s na face posterior com pasta de Al, perfil de impurezas gaussiano com concentração de impurezas em superfície de 2×10²⁰cm⁻³ e profundidade de junção de 0,5 μm para a região n⁺. Para se ajustarem os dados obtidos das simulações com os experimentais, variaram-se o tempo de vida dos portadores minoritários (τ), a velocidade de recom-

inação na superfície n⁺ (S_f) e a resistência série específica (r_s^{*}). Para a região de BSF, considerou-se uma espessura de 9 μm, calculada a partir da densidade superficial de alumínio depositado e da temperatura do processo de difusão (Lölgen et al., 1993; Marcolino, 2011).

No caso das células solares desenvolvidas, com alumínio depositado por evaporação, e difundido em fornos com tubo de quartzo (Moehlecke & Zanescio, 2010), os valores que melhor se ajustaram aos resultados experimentais foram: τ = 60 μs, S_f = 10⁶ cm/s e r_s^{*} = 0,2 Ω.cm². Neste caso, os parâmetros elétricos obtidos por simulação foram: V_{oc} = 589 mV, J_{sc} = 33,1 mA/cm², FF = 0,79, η = 15,4%. Para as células com alumínio depositado por serigrafia e difundido em forno de esteira, os valores ajustados foram de τ=10μs, S_f = 10⁷ cm/s e r_s^{*} = 2 Ω.cm², produzindo os seguintes parâmetros elétricos: V_{oc} = 554 mV, J_{sc} = 31 mA/cm², FF=0,75, η = 12,8%. Nesse caso, os principais fatores que limitam a eficiência das células solares são o baixo tempo de vida dos portadores de carga minoritários,

Tabela 3

Características elétricas de células solares obtidas com diferentes formas de depositar e processar termicamente o alumínio, para formar a região p⁺, com função de BSF.

Características	V _{oc} (mV)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF	η%
Al depositado por evaporação + difusão em forno convencional com tubo de quartzo (Moehlecke & Zanescio, 2010)**	587	33,1	0,789	15,4
Al depositado por evaporação + difusão em forno de esteira (Veleda, 2009; Zanescio, Moehlecke & Veleda, 2010)	577	34,1	0,771	15,2
Al depositado por serigrafia + difusão em forno de esteira	556	30,7	0,750	12,8

**Medidas realizadas no Laboratório de Calibração do Instituto Fraunhofer para Sistemas de Energia Solar, Alemanha.

a ausência de passivação, na superfície frontal, e a elevada resistência em série. Para células com baixo tempo de vida, o efeito do BSF proporcionado pelo alumínio difundido é desprezível. A resistência em série elevada, observada nas células com alumínio depositado por serigrafia,

é devida à região de alumínio poroso, formada na superfície posterior (Halm et al., 2009). Com a superfície frontal passivada, com $S_f = 1000 \text{ cm}^2/\text{s}$, tempo de vida dos portadores minoritários de $100 \mu\text{s}$ e baixa resistência em série, a eficiência do dispositivo ficaria acima de 17,5% e

se aproxima das melhores células atualmente fabricadas, que atingem eficiência acima de 18%. Essas células utilizam passivação de superfície, a qual é baseada em nitreto de silício e emissores seletivos dopados com fósforo (Münzer et al., 2011; Lai et al., 2011).

4. Conclusões

Nesse trabalho, foram apresentados o desenvolvimento e a análise de um processo, para a fabricação de células solares, com pasta de Al, para a formação do campo retrodifusor, em forno de esteira. A maior eficiência, de 12,8%, ocorreu para a difusão de alumínio e queima das pastas de Ag e Ag/Al em passo simultâneo e à temperatura de 860°C e $V_E = 150 \text{ cm}/\text{min}$. Ao se compararem os parâmetros elétricos das células solares, desenvolvidas com os resultados obtidos com células solares fabricadas, no mesmo tipo de lâmina de silício, e com Al de alta pureza, depositado por evaporação em alto vácuo, observou-

se que o comprimento de difusão dos portadores minoritários, em dispositivos processados com Al, em forno de esteira, foi menor que a espessura das lâminas usadas. A tensão de circuito aberto da célula com pasta de Al foi da ordem de 20 mV menor que o resultado obtido com Al depositado por evaporação. Esse resultado indica que o processo de deposição da pasta de Al, por serigrafia e difusão em forno de esteira, não produziu uma região de BSF eficaz, o que foi verificado mediante simulações com o programa PC-1D. Tais simulações indicaram que as células apresentam reduzido tempo de vida dos portadores mino-

ritários. Embora a difusão, em passos independentes, possa permitir uma maior flexibilidade, na escolha dos parâmetros do processo, concluiu-se que a eficiência alcançada é similar aos resultados obtidos com o processamento simultâneo de difusão de Al e queima das pastas de Ag e Ag-Al, não justificando o incremento no número de passos térmicos. Com o objetivo de se produzirem células solares de menor custo, esforços deverão ser realizados para se obter um BSF eficaz, usando-se outros tipos de pastas de Al e mantendo-se o processamento térmico em fornos de esteira.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem o financiamento da pesquisa proporcionado pela PUCRS, FINEP, Eletrosul, Petrobras,

CEEE-GT e CNPq, bem como o apoio da equipe do NT-Solar/PUCRS, na fabricação e caracterização das células solares.

Os autores também agradecem a CEEE-D, contrato 9942397, pelo suporte financeiro para esse trabalho.

6. Referências bibliográficas

- BÄHR, M., DAUWE, S., LAWERENZ, A., MITTELSTÄDT, L. Comparison of bow-avoiding Al-pastes for thin, large-area crystalline silicon solar cells. In: PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE, Barcelona, 20. *Proceeding...*, Barcelona, Espanha, 2005. p. 926-929.
- BASORE, P.A., CLUGSTON, D.A. PC1D Version 5: 32-bit solar cell modeling on personal computers. In: IEEE PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE, 26. Anaheim: EUA, p. 207-210, 1997.
- CHALFOUN, L. L. *Process optimization of alloyed aluminum backside contacts for silicon solar cells*. Massachusetts Institute of Technology, 1996. (Tese de Doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais). Disponível em: <<http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/7582>>
- DUERINCKX, F., CHOULAT, P., BEAUCARNE, G., YOUNG, R.J.S., ROSE, M., RABY, J.A. Improved screen printing process for very thin multicrystalline silicon solar cells. In: EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE AND EXHIBITION, 19. *Proceedings...* Paris: França, 2004. p. 443-448.
- DUPONT MICROCIRCUIT MATERIALS. *Solamet™ PV381 p-type photovoltaic composition*. Datasheet: 2007.
- FLOHR, T., HELBIG, R. Determination of minority-carrier lifetime and surface recombination velocity by optical-beam-induced-current measurements at different light wavelengths. *Journal Applied Physics*, v. 66, n.7, p. 3060-3065, 1989.
- HALM, A., POPESCU, L.M., THEOBALD, J., PETER, K., KOPECEK, R. Low temperature pads on Al-emitter or Al-BSF. In: EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE AND EXHIBITION, 24. *Proceedings...* Hamburgo, Alemanha, 2009. p. 1019-1022.
- HUSTER, F. Aluminum - back surface field: bow investigation and elimination. In: PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE, 20. *Proceedings...* Barcelona, Espanha, 2005. p. 635-638.

- KERN, W. *Handbook of semiconductor wafer cleaning technology*. New Jersey: Noyes Publications, 1993. 623p.
- LAGOS, R., MOEHLECKE, A., ALONSO, J., TOBIAS, I., LUQUE, A. Contamination and gettering evaluation by lifetime measurements during single crystal cell processing. In: IEEE FIRST WORLD CONFERENCE ON PHOTOVOLTAIC ENERGY CONVERSION. *Proceedings...* Hawaii, 1994, p. 1629-1632.
- LAI, J.H., UPADHYAYA, A., RAMANATHAN, S., DAS, A., TATE, K., UPADHYAYA, V., KAPOOR, A., CHEN, C.W., ROHATGI, A. High-efficiency large-area rear passivated silicon solar cells with local Al-BSF and screen-printed contacts. *IEEE Journal of Photovoltaics*, v.1, n.1, p. 16-20, 2011.
- LÖLGEN, P., LEGUIJT, C., EIKELBOOM, J.A., STEEMAN, R.A., SINKE, W.C., VERHOEF, L.A., ALKEMADE, P.F.A., ALGRA, E. Aluminum back surface field doping profiles with surface recombination velocities below 200 cm/s. In: 23rd IEEE PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE, 1993, p. 236-242.
- LUQUE, A., MOEHLECKE, A., LAGOS, R., CAÑIZO, C. Segregation model for Si gettering by Al. *Physica Status Solidi A*, 155, p. 43-49, 1996.
- LY, M., EBERHARDT, D., FILOMENA, G.Z., MOEHLECKE, A., ZANESCO, I. Impact of metal grid firing on antireflection coatings. In: EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE AND EXHIBITION, 22. *Proceedings...* Milão, Italia, p. 1532-1534.
- MARCOLINO, J.B., *Desenvolvimento de células solares com campo retrodifusor formado por pasta de alumínio e difusão em forno de esteira*. PGETEMA, PUCRS, 2011. (Dissertação de Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais). Disponível em: < <http://www.pucrs.br/cbsolar/>>.
- MEEMONGKOLKIAT, V., NAKAYASHIKI, K., KIM, D.S., KOPECEK, R., ROHATGI, A. Factors limiting the formation of uniform and thick aluminum-back-surface field and its potential. *Journal of the Electrochemical Society*, v. 153, n. 1, p. G53-G58, 2006.
- MOEHLECKE, A., ZANESCO, I. Pilot production of n⁺pn⁺ and n⁺pp⁺ silicon solar cells: efficiency x yield. In: EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SPECIALIST CONFERENCE, 25. *Proceedings...* Valência: Espanha, 2010. p 2497-2500.
- MÜNZER, K.A., SCHÖNE, J., TEPPE, A., HEIN, M., SCHLOSSER, R.E., HANKE, M., VARNER, K., MÄCKEL, H., KELLER, S., FATH, P. Physical properties of industrial 19% rear side passivated Al-LBSFR- solar cells. *Energy Procedia*, v.8, p. 415-420, 2011.
- NARASIMHA, S., ROHATGI, A. Optimized aluminum back surface field techniques for silicon solar cells. In: PHOTOVOLTAIC SPECIALIST CONFERENCE, 26. *Proceedings...* Anaheim: CA, USA. 1997. p. 63-65.
- NARASIMHA, S., ROHATGI, A., WEEBER, A.W. An optimized rapid aluminum back surface field technique for silicon solar cells. *IEEE Transactions on Electron Devices*, v. 46, n.7, p. 1363-1370, 1999.
- RAUER, M., SCHMIGA, C., KRAUSE, J., WOEHL, R., HERMLE, M., GLUNZ, S.W. Further analysis of aluminum alloying for the formation of p⁺ regions in silicon solar cells. *Energy Procedia*, v. 8, p. 200-206, 2011.
- URUENA, A. et al. Local Al-alloyed contacts for next generation Si solar cells. In: EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE, 24. *Proceedings...* Hamburg, Alemanha, 2009. p. 1483-1486.
- VELEDA, P.P. *Células solares com campo retrodifusor de alumínio formado em forno de esteira*. PGETEMA, PUCRS, 2009. (Dissertação de Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais). Disponível em: < <http://www.pucrs.br/cbsolar/>>
- ZANESCO, I., MOEHLECKE, A., VELEDA, P.P. Belt furnace versus standard tube furnace to produce Al BSF. In: EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE AND EXHIBITION, 25 and WORLD CONFERENCE ON PHOTOVOLTAIC ENERGY CONVERSION, 5. *Proceedings...* 2010. p. 2501-2504.