

Células solares bifaciais industriais em lâminas de silício finas: análise de passivação de superfícies e tipo de silício

(Bifacial solar cells on thin silicon wafers: analysis of the surface passivation and type of silicon)

V. C. Osório¹, A. Moehlecke^{1*}, I. Zanesco¹

¹Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Escola de Ciências,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais,
Núcleo de Tecnologia em Energia Solar,
Av. Ipiranga 6681, 90619-900, Porto Alegre, RS, Brasil

Resumo

O objetivo deste trabalho foi analisar a passivação de superfícies com SiO₂ em células solares bifaciais fabricadas em lâminas finas bem como avaliar a influência do tipo de silício monocristalino utilizado para fabricar as células solares. A estrutura implementada foi a n⁺pp⁺, com fósforo na face frontal e boro e alumínio na face posterior, formando uma região seletiva de campo retrodifusor. Foram usadas lâminas de silício Cz (Czochralski) e FZ (*float zone*) com 145 µm de espessura e implementou-se uma etapa térmica para crescer uma camada de SiO₂ para passivar as superfícies. O óxido passivou as superfícies, proporcionando um aumento de 0,5% absolutos na eficiência das células solares fabricadas em silício FZ. As células solares produzidas em Si-Cz não obtiveram o mesmo aumento porque apresentaram uma elevada resistência em série. A célula solar fina mais eficiente foi fabricada com silício FZ e com superfícies passivadas, atingindo eficiência de 14,5% e de 11,1%, para iluminação pela face n⁺ e p⁺, respectivamente. As células em Si-Cz, mesmo com menor tempo de vida inicial dos portadores de carga minoritários, atingiram eficiências um pouco menores que estes valores.

Palavras-chave: células solares, células solares bifaciais, lâminas finas de silício, passivação de superfícies.

Abstract

The aim of this paper was to analyze the surface passivation based on SiO₂ for thin bifacial solar cells as well as to evaluate the influence of the type of substrate used to fabricate the cells. The n⁺pp⁺ structure was implemented, with phosphorus in the front face and boron and aluminum in the rear face, forming in the latter a selective back surface field. The Czochralski (Cz) and float zone (FZ) monocrystalline silicon wafers (145 µm thick) were used and a thermal step to grow a SiO₂ layer to passivate the surfaces was implemented. The oxide passivated the surfaces, providing an absolute increase of 0.5% in FZ silicon solar cell efficiency. The solar cells produced in Si-Cz did not present the same increase because they showed a high series resistance. The more efficient thin solar cell was manufactured with Si-FZ and with oxidized surfaces, reaching the efficiency of 14.5% and 11.1%, for illumination by the n⁺ and p⁺ faces, respectively. The Si-Cz solar cells, even with a lower initial lifetime of minority carriers, reached slightly lower efficiencies than Si-FZ solar cells.

Keywords: solar cells, bifacial solar cells, thin silicon wafers, surface passivation.

INTRODUÇÃO

A estrutura padrão atual das células solares industriais de silício é a n⁺pp⁺, com a face frontal n⁺ dopada com fósforo e posterior p⁺ com alumínio. O fósforo é difundido em toda a superfície da lâmina e o alumínio, depositado por serigrafia sobre a face posterior, é difundido em forno de esteira. Esta camada de Al compensa a dopagem tipo n, formando uma região p⁺ que repele portadores de carga minoritários. Esta região na face posterior é denominada de região de campo retrodifusor ou BSF, *back surface field*. As células solares com espessuras da ordem de 180 a 200 µm atingem

eficiências de 15% a 17% usando silício monocristalino [1]. Uma forma de reduzir os custos de fabricação das células solares é por meio do uso de lâminas de menor espessura, pois a lâmina corresponde a 58% do custo [1]. Porém, se for usada a tecnologia padrão baseada na deposição de alumínio na face posterior, pode ocorrer o abaulamento da lâmina durante o processo de difusão e queima da pasta metálica, conduzindo à quebra das lâminas na sequência do processamento. O abaulamento ocorre devido aos diferentes coeficientes de expansão térmica da liga Al-Si e do Si, produzindo uma contração do contato posterior [2].

Regiões p⁺ formadas pela difusão localizada de alumínio, em forma de malha, ou por boro difundido em toda a superfície posterior podem ser alternativas para evitar o problema do

*moehleck@pucrs.br

abaulamento. Além disto, como o alumínio não é depositado em toda a face posterior, permite-se que o dispositivo possa ser usado como célula solar bifacial. Este tipo de célula solar é ativo em ambas as faces e, quando aplicado em módulos concentradores de radiação ou em estruturas que permitam aproveitar a radiação de albedo, pode proporcionar ganhos de potência [3-6]. Segundo estudos recentes [7], a potência excedente proporcionada pela radiação incidente na face posterior pode viabilizar as estruturas bifaciais para a redução dos custos da eletricidade produzidas por módulos fotovoltaicos. Em lâminas de silício monocristalino tipo p, dopadas com boro, as células solares bifaciais mais eficientes foram desenvolvidas por pesquisadores da Hitachi utilizando uma estrutura do tipo triodo, tendo um contato elétrico na face frontal tipo n^+ e dois na face posterior, sobre regiões n^+ e p^+ [8]. Foram usadas lâminas de silício crescido pela técnica da fusão zonal flutuante (FZ, *float zone*), com espessura da ordem de $250\ \mu\text{m}$ e as eficiências de 21,3% e 19,8% foram obtidas para iluminação pela face frontal e posterior, respectivamente. Com estruturas simplificadas n^+pp^+ , isto é, com uma junção na face frontal e uma região de BSF na face posterior, Yang *et al.* [9] e Janßen *et al.* [10] apresentaram células solares de alta eficiência usando lâminas de silício Cz (Czochralski) com espessura da ordem de $200\ \mu\text{m}$. Os primeiros publicaram resultados de células solares de área igual a $149\ \text{cm}^2$ e com malhas metálicas obtidas por serigrafia, atingindo eficiências de 16,6% (iluminação pela face frontal) e de 12,8% (face posterior) [9]. Janßen *et al.* [10] também usaram contatos metálicos depositados por serigrafia, mas em vez de usar uma região p^+ uniforme em toda a face posterior, uma malha metálica de Al foi depositada para produzir uma região de BSF localizada. A eficiência para iluminação pela face frontal foi de 17% e pela face posterior foi de 10,3%.

Usando lâminas de silício monocristalino crescido pela técnica Cz, de $120\ \mu\text{m}$ de espessura, Recart [11] desenvolveu dispositivos n^+pp^+ bifaciais de $24,7\ \text{cm}^2$. O emissor n^+ foi obtido pela difusão de fósforo usando como fonte de dopante o POCl_3 e a região p^+ , na face posterior, foi obtida pela deposição de pastas ricas em boro e difusão em forno de esteira. As células solares n^+pp^+ com regiões n^+ e p^+ homogêneas atingiram as eficiências de 14,3% e 10,8%, com iluminação frontal (região n^+) e posterior (p^+), respectivamente [11]. Células solares bifaciais finas de $4\ \text{cm}^2$, com $130\ \mu\text{m}$ de espessura, alcançaram eficiências de 16,9% e 10,4% para iluminação pela face n^+ e p^+ . Estas células fotovoltaicas foram fabricadas com lâminas de silício crescido pela técnica FZ, com contatos metálicos obtidos por evaporação em alto vácuo, processo inviável na indústria de células solares [12]. Com estrutura n^+p , superfície frontal e posterior passivada com SiN_x e região de BSF de Al localizada somente no contato elétrico da face posterior, foram obtidas as eficiências de 14,6%/13,6% (frontal/posterior) em dispositivos de área reduzida ($4\ \text{cm}^2$) e com lâminas de silício Cz de $140\ \mu\text{m}$ de espessura [13]. Regiões de BSF seletivo também foram propostas para células solares bifaciais fabricadas em lâminas finas [14,

15]. No BSF seletivo, o boro é difundido em toda a face posterior e o Al somente no contato metálico em forma de malha, conforme esquematizado na Fig. 1. Usando lâminas de Si-Cz tipo p de $150\ \mu\text{m}$ de espessura, foram fabricados dispositivos bifaciais de $61,58\ \text{cm}^2$ com eficiências de 14,0% e de 10,4% para iluminação pela face n^+ e p^+ , respectivamente [15]. Nestas células solares, a região n^+ foi obtida mediante difusão de fósforo usando POCl_3 como fonte. A região p^+ foi produzida pela deposição de boro por *spin-on* e difusão em forno de tubo de quartzo bem como pela deposição de pasta de alumínio por serigrafia e difusão em forno de esteira. As superfícies não foram recobertas com filmes passivadores. Os mesmos autores [14] também demonstraram que as regiões localizadas de Al na face posterior somente podem ser usadas se um filme passivador de superfícies e, ao mesmo tempo, barreira para difusão de contaminantes for depositado sobre as lâminas antes do processo de metalização. Lâminas finas de silício tipo n, dopadas com fósforo, também podem ser usadas na fabricação de células bifaciais, obtendo-se a estrutura n^+np^+ ou p^+nn^+ . Por exemplo, Jimeno *et al.* [16] fabricaram dispositivos n^+np^+ com metalização por serigrafia que atingiram eficiência de 13,2% na face n^+n e 12,7% na face p^+n , usando silício Cz com $160\ \mu\text{m}$ de espessura [16]. As células bifaciais foram processadas com regiões n^+ e p^+ homogêneas obtidas a partir da deposição de pastas com dopantes e difusão em forno de esteira, processos de alta produtividade.

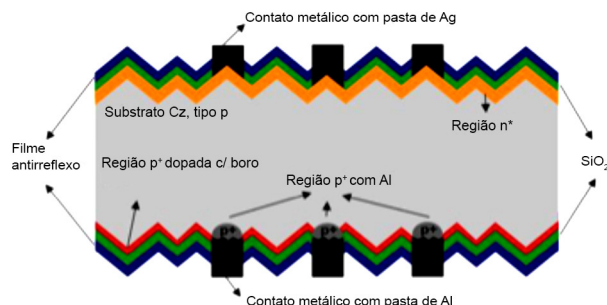


Figura 1: Esquema de célula solar bifacial fina com região p^+ seletiva.

[Figure 1: Schematic of thin bifacial solar cell with selective p^+ region.]

O objetivo deste trabalho foi analisar a influência do tipo de silício (Cz e FZ) nas características elétricas de células solares bifaciais finas bem como a passivação de superfícies com camada de SiO_2 crescido termicamente. As células solares com espessura de $145\ \mu\text{m}$ foram desenvolvidas com a estrutura n^+pp^+ , com região p^+ seletiva obtida pela difusão de boro a partir de dopante depositado por *spin-on* e pela difusão de alumínio depositado por serigrafia, sendo a área de alumínio definida por uma máscara em forma de malha.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizadas lâminas de silício monocristalino Cz (Czochralski) e FZ (*float zone*), tipo p, dopadas com

boro e orientação dos planos cristalográficos de $\{100\}$. As lâminas de silício Cz tinham resistividade de $2 \Omega \cdot \text{cm}$, espessura inicial de $535\text{-}585 \mu\text{m}$ e o tempo de vida dos portadores de carga minoritários (τ) nas lâminas, medido pela técnica do decaimento da fotocondutividade e com as lâminas imersas em HF 49%, foi da ordem de $42 \pm 5 \mu\text{s}$. As lâminas de silício FZ apresentaram resistividade de $1\text{-}5 \Omega \cdot \text{cm}$, espessura inicial de $280 \mu\text{m}$ e o τ foi de $165 \pm 12 \mu\text{s}$, evidenciando a melhor qualidade do silício FZ frente ao crescido pela técnica Cz. A espessura das lâminas foi reduzida para aproximadamente $145 \mu\text{m}$ mediante um ataque químico constituído de 210 g de KOH e $1,6 \text{ L}$ de água deionizada ($\text{H}_2\text{O}_{\text{DI}}$), mantido a $90 \text{ }^\circ\text{C}$ [17]. Para as lâminas Cz, o tempo de ataque foi de 110 min e para as FZ foi de 35 min porque as espessuras iniciais eram diferentes. Esta solução foi empregada porque não havia no mercado a disponibilidade de lâminas finas.

O processo de fabricação utilizado neste trabalho está resumido na Fig. 2. Depois da redução da espessura, realizou-se o ataque anisotrópico das superfícies em um banho de KOH, isopropanol e $\text{H}_2\text{O}_{\text{DI}}$ para formar micropirâmides na superfície da lâmina. Em seguida, realizou-se uma limpeza RCA das lâminas baseada em soluções químicas como H_2O_2 , NH_4OH , HCl e $\text{H}_2\text{O}_{\text{DI}}$. O líquido contendo boro, PBF20, da Filmtronics, foi depositado por *spin-on* sobre uma face das lâminas e estas foram introduzidas em uma estufa para evaporação dos solventes. Após a deposição do dopante, foi realizada a difusão de boro em forno com tubo de quartzo na temperatura de $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ por 20 min , seguida de processo de oxidação. A camada de silicato de boro e óxido de silício formada teve a função de proteger a face dopada com boro do processo seguinte de difusão de fósforo [18]. Após a difusão de boro, foi depositada resina fotossensível por *spin-on* na superfície com silicato de boro e a mesma foi secada em estufa. O óxido na face sem resina foi atacado em solução de HF tampão e foi realizada a limpeza da resina com acetona, álcool isopropílico e $\text{H}_2\text{O}_{\text{DI}}$. Para retirar todos os resíduos, as lâminas foram submetidas novamente à limpeza RCA. A difusão de fósforo foi realizada em um forno de alta temperatura com tubo de quartzo usando POCl_3 como fonte. O fósforo foi difundido a $875 \text{ }^\circ\text{C}$, com pré-deposição de 60 min e redistribuição de 10 min . A resistência de folha (R_{\square}) da região n^+ foi de $43 \pm 2 \Omega/\square$, com concentração de superfície (C_s) de $4,3 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ e espessura de $0,4 \mu\text{m}$ [15]. A região p^+ , também depois do processo térmico de difusão de fósforo, apresentou as seguintes características: $R_{\square} = 30 \pm 2 \Omega/\square$, $C_s = 2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ e espessura de $1 \mu\text{m}$ [15]. Na sequência, extraíram-se os silicatos de fósforo e de boro mediante um ataque químico em ácido fluorídrico e realizou-se a limpeza RCA.

Foram separadas lâminas de controle que não foram oxidadas e que passaram diretamente para a etapa de deposição de filme antirreflexo. Em um grupo de lâminas, uma camada de SiO_2 com espessura da ordem de 10 nm foi crescida a $800 \text{ }^\circ\text{C}$ para reduzir a recombinação nas superfícies. Sobre a face n^+ , depositou-se um filme antirreflexo (AR) de TiO_2 por evaporação em alto vácuo com canhão de elétrons.

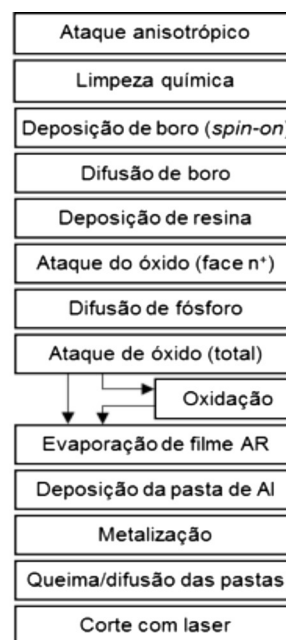


Figura 2: Processo de fabricação desenvolvido para produção de células solares bifaciais.

[Figure 2: Fabrication process developed to produce bifacial solar cells.]

Embora as células bifaciais devam receber filme AR em ambas as faces, optou-se por não depositar este filme antes da metalização posterior para não prejudicar a formação da região de BSF seletiva com a pasta de Al. Neste caso, o filme deve ser depositado depois da metalização.

A metalização posterior foi realizada por serigrafia com a pasta de alumínio PV381, da DuPont, que teve a função de formar o contato e a região de BSF. A malha metálica frontal foi implementada por serigrafia utilizando a pasta de prata PV159, da DuPont. As pastas foram secadas em forno de esteira a $200 \text{ }^\circ\text{C}$ e queimadas no mesmo forno, a $840 \text{ }^\circ\text{C}$ para lâminas sem camada de SiO_2 e $850 \text{ }^\circ\text{C}$ para lâminas com SiO_2 [14]. No processo de queima, a pasta de prata perfura as camadas de SiO_2 e TiO_2 , contactando eletricamente a região n^+ e a pasta de alumínio perfura a camada de SiO_2 , formando a região de BSF e o contato posterior. As faces frontal e posterior receberam uma malha de metal com trilhas de $100 \mu\text{m}$ de largura, duas barras coletoras de 2 mm de largura e com um fator de sombra de $9,5\%$. Para finalizar, as bordas das células solares foram cortadas por meio de um sistema com radiação laser para obter células solares pseudoquadradas de $80 \times 80 \text{ mm}$, com área de $61,58 \text{ cm}^2$.

As células solares foram caracterizadas eletricamente mediante a medida da curva corrente-tensão elétrica (I-V) nas condições padrão: 1000 W/m^2 , espectro solar AM1,5 G e $25 \text{ }^\circ\text{C}$. As medidas foram realizadas com iluminação pela face n^+ e p^+ . A partir da curva I-V, determinaram-se os seguintes parâmetros: a) V_{OC} , tensão de circuito aberto; b) J_{SC} , densidade de corrente de curto-circuito; c) FF, fator de forma; e d) η , eficiência. Nas células solares mais eficientes foi depositado o filme AR sobre a face p^+ , depois do processo de metalização e da primeira caracterização

elétrica. As células solares de maior eficiência foram analisadas pela técnica LBIC (*light beam induced current*) [19], com o equipamento WT 2000 PV da Semilab, em quatro comprimentos de onda: 648, 845, 953 e 973 nm. Com a medida da corrente de curto-circuito nestes quatro comprimentos de onda foi possível estimar o comprimento de difusão (L_p) dos portadores de carga minoritários.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela I apresenta os parâmetros elétricos médios das células solares fabricadas. Em relação ao tipo de lâmina utilizado, observou-se que a melhor qualidade da lâmina FZ (*float zone*), comprovada pelo maior tempo de vida dos portadores de carga minoritários, resultou em células solares com maiores valores médios de parâmetros elétricos. Os dispositivos em lâminas FZ com SiO_2 , em relação às de silício Cz (Czochralski), apresentaram V_{OC} , J_{SC} e η maiores em 12 mV, 2,2 mA/cm² e 2,5% (absolutos), respectivamente. Nas células solares sem passivação (sem SiO_2), a diferença entre os parâmetros elétricos dos dispositivos com Si-FZ e Cz foi menor. Neste caso, ao usar Si-FZ, os parâmetros V_{OC} , J_{SC} e η foram incrementados em +10 mV, +0,6 mA/cm² e +0,6% (absolutos), respectivamente. Com iluminação pela região de BSF seletivo, a diferença em eficiência entre células solares FZ e Cz foi de 0,9% e 2% absolutos para células sem e com SiO_2 , respectivamente. A maior diferença observada nos dispositivos com SiO_2 era esperada, pois como houve passivação de superfícies, a influência do τ tornou-se mais evidente nas características elétricas. O FF (fator de forma) foi relativamente baixo em todas as células solares, evidenciando a existência de resistência em série elevada. Para as lâminas FZ, observou-se que o SiO_2 proporcionou um aumento na eficiência para ambos os modos de

iluminação. Por outro lado, nas células com lâminas Cz, a oxidação final não acarretou em melhoria dos dispositivos devido ao menor FF. No entanto, as lâminas foram oxidadas no mesmo processo térmico e não houve razão para as Cz terem maior espessura de SiO_2 , o que dificultaria o contato elétrico. Uma hipótese para esta redução no FF é a geração de defeitos localizados no processo térmico de oxidação, tais como a precipitação de oxigênio, pois em lâminas de silício Cz a concentração de oxigênio pode ser de até duas ordens de magnitude acima da encontrada em lâminas FZ. No entanto, este comportamento pode ser diferente se forem usadas lâminas de Si-Cz de outros fabricantes.

A Tabela II resume os resultados das células solares fabricadas que apresentaram a maior eficiência e os valores obtidos por simulação com o programa computacional PC-1D [20]. Foram fixados os seguintes parâmetros nas simulações: espessura de 145 μm , refletância da superfície texturada frontal com filme AR de TiO_2 , fator de sombra de 9,5% e resistividade de base de 2 $\Omega\cdot\text{cm}$ para lâminas Cz e FZ. Para ajustar os resultados obtidos das simulações com os experimentais, variou-se o τ , a velocidade de recombinação na superfície n^+ (S_f), a velocidade de recombinação na superfície posterior com BSF (S_p) e a resistência em série específica (r_s^*). Para ambos os tipos de substrato, a camada de SiO_2 reduziu a S_f e S_p em duas ordens de magnitude, de 10^7 para 10^5 cm/s. Para superfícies n^+ , o valor foi acima do previsto em [21], de $4,3 \cdot 10^4$ cm/s para $C_s = 4,3 \cdot 10^{20}$ cm⁻³. Em regiões p^+ com $C_s = 1,6 \cdot 10^{19}$ cm⁻³, o valor de S_p esperado seria, para superfícies texturadas, de $5,2 \cdot 10^4$ cm/s (o valor correspondente a uma superfície polida, $4,7 \cdot 10^3$ cm/s, multiplicado por um fator de 11 para ajustar a recombinação relativa a superfícies texturadas) [22]. Assim, embora a camada de SiO_2 tenha passivado as superfícies, sua qualidade não foi elevada. A redução na velocidade de recombinação em superfície para os

Tabela I - Parâmetros elétricos médios de células solares fabricadas com lâminas de silício Cz e FZ, com e sem camada de SiO_2 . O filme AR foi depositado somente sobre a face n^+ . [Table I - Average electrical parameters of solar cell fabricated by using Cz and FZ silicon, with and without SiO_2 layer. The ARC was deposited only on the n^+ face.]

Substrato	SiO_2	V_{OC} (mV)	J_{SC} (mA/cm ²)	FF	η (%)
Iluminação pela face n^+					
Cz	Sem	591 ± 17	31,6 ± 1,0	0,71 ± 0,01	13,4 ± 1,0
	Com	592 ± 12	31,0 ± 2,0	0,67 ± 0,02	12,0 ± 1,0
FZ	Sem	601 ± 1	32,2 ± 0,1	0,72 ± 0,01	14,0 ± 0,1
	Com	604 ± 1	33,2 ± 0,2	0,72 ± 0,01	14,5 ± 0,1
Iluminação pela face p^+ , com região de BSF de boro e Al					
Cz	Sem	582 ± 18	20,6 ± 2,6	0,73 ± 0,01	8,8 ± 1,5
	Com	582 ± 13	22,0 ± 2,0	0,7 ± 0,1	8,4 ± 1,5
FZ	Sem	592 ± 1	22,2 ± 0,2	0,73 ± 0,01	9,7 ± 0,1
	Com	595 ± 1	23,7 ± 0,3	0,73 ± 0,01	10,4 ± 0,2

Tabela II - Características elétricas das células solares mais eficientes e valores obtidos mediante simulação com o programa PC-1D.

[Table II - Electrical parameters of the best solar cells and results from simulation by means of the PC1D device-modeling program.]

Subst.	Parâmetros ajustados por simulação	SiO ₂	Ilum.	Resultado	V _{OC} (mV)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF	η (%)
Cz	S _f = 4.10 ⁵ cm/s	Com	n ⁺	Exp.*	603	33,1	0,673	13,4
	Sim.º			603	33,2	0,669	13,4	
	S _p = 1.10 ⁵ cm/s		p ⁺	Exp.	595	23,7	0,706	10,0
	τ = 22 μs			Sim.	595	23,7	0,707	10,0
	r _s * = 3,3 Ω.cm ²	Sem	n ⁺	Exp.	602	32,3	0,719	14,0
	S _f = 1.10 ⁷ cm/s			Sim.	602	32,6	0,713	14,0
	S _p = 1.10 ⁷ cm/s		p ⁺	Exp.	594	22,2	0,739	9,7
	τ = 55 μs			Sim.	592	22,3	0,750	9,8
r _s * = 2,4 Ω.cm ²	FZ	Com	n ⁺	Exp.	605	32,9	0,729	14,5
S _f = 1,5.10 ⁵ cm/s				Sim.	605	33,6	0,717	14,6
S _p = 1.10 ⁵ cm/s			p ⁺	Exp.	596	23,6	0,740	10,4
τ = 19 μs				Sim.	596	23,2	0,752	10,4
r _s * = 2,2 Ω.cm ²		Sem	n ⁺	Exp.	600	32,3	0,726	14,1
S _f = 1.10 ⁷ cm/s,				Sim.	600	32,6	0,740	14,0
S _p = 1.10 ⁷ cm/s			p ⁺	Exp.	590	22,0	0,734	9,5
τ = 45 μs				Sim.	591	22,1	0,750	9,8
r _s * = 2,3 Ω.cm ²								

Notas: * - experimental; º - simulado.

níveis previstos poderia subir a J_{sc} em aproximadamente 1 mA/cm² e a eficiência dos dispositivos passivados em até 0,9% absolutos, mantidas as demais características (τ e r_s*). Ao ajustar o tempo de vida dos portadores minoritários, tanto para o silício Cz como para o FZ, verificou-se que o valor ajustado foi menor para células solares que passaram pelo processo de oxidação. Neste caso, embora o óxido de silício passive as superfícies, o processo térmico introduziu contaminantes ou produziu defeitos nas lâminas. Notou-se que as lâminas FZ apresentaram um τ menor que o inicial de 165±12 μs, mas no caso das lâminas de silício Cz, houve uma melhora neste parâmetro, de 42 para 55 μs (antes da oxidação), atribuída ao processo de *gettering* com fósforo [15]. Quando se compararam as células solares mais eficientes, observou-se que as diferenças entre as fabricadas com silício Cz e FZ são pequenas no que se refere a V_{OC} e J_{sc}. Somente no caso dos dispositivos passivados com SiO₂ houve uma diferença na resistência em série e consequentemente no FF. O valor da resistência em série foi elevado para todas as células, mas principalmente para células Cz com SiO₂, com FF abaixo de 0,7 e r_s* = 3,3 Ω.cm². Os elevados valores de r_s* para todas as células solares foram atribuídos à malha posterior de alumínio.

A Tabela III apresenta as características elétricas das células solares mais eficientes e com filme AR sobre a face p⁺, depositado depois do processo de metalização. Notou-se que para ambos os substratos a eficiência obteve um aumento de aproximadamente 0,7% absolutos após a deposição do

filme AR. O aumento da J_{sc} de 2 mA/cm² deveu-se ao maior número de fótons absorvidos pela célula fotovoltaica. As células solares mais eficientes processadas com lâminas Cz não possuíram a camada de SiO₂ e atingiram a eficiência de 14% quando iluminadas pela face n⁺ e de 10,4% quando iluminadas pela face p⁺. O dispositivo mais eficiente foi fabricado com silício FZ e com a passivação de SiO₂, alcançando as eficiências de 14,5% e 11,1% com iluminação

Tabela III - Características elétricas das células solares mais eficientes, iluminadas pela face p⁺, com e sem filme antirreflexo de TiO₂.[Table III - Electrical characteristics of the most efficient solar cells, illuminated by p⁺ face, with and without TiO₂ ARC.]

Subst.	SiO ₂	Filme AR	V _{OC} (mV)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF	η (%)
Cz	Com	Sem	595	23,7	0,706	10,0
		Com	593	25,7	0,702	10,7
	Sem	Sem	594	22,2	0,739	9,7
		Com	592	24,2	0,728	10,4
FZ	Com	Sem	596	23,6	0,740	10,4
		Com	594	25,4	0,735	11,1
	Sem	Sem	590	22,0	0,734	9,5
		Com	590	24,1	0,726	10,3

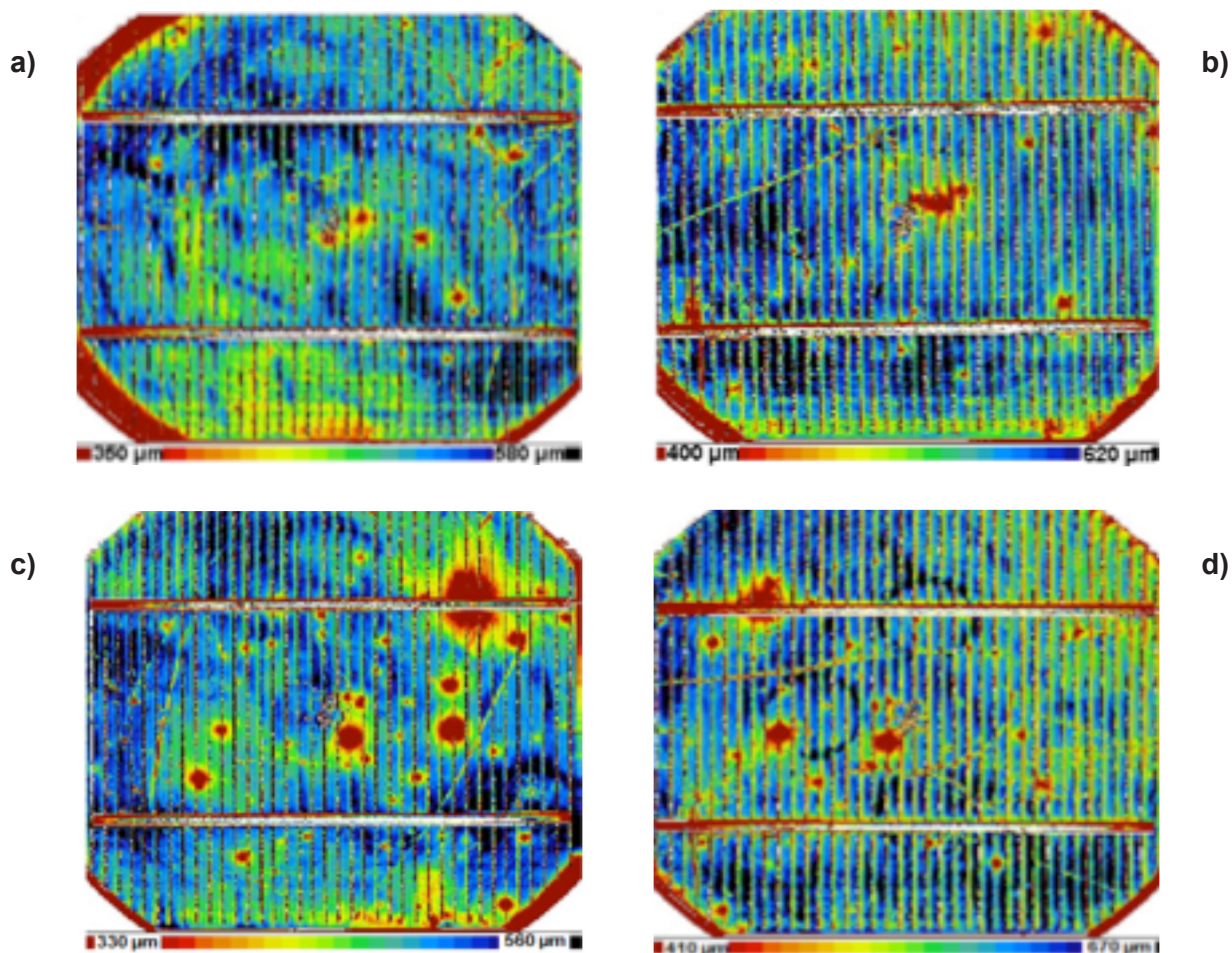


Figura 3: Mapas do comprimento de difusão dos portadores minoritários das melhores células solares em Si-Cz: (a) sem óxido, com $L_{D\text{médio}} = 507 \mu\text{m}$; e (b) com óxido e $L_{D\text{médio}} = 556 \mu\text{m}$; e fabricadas com Si-FZ: (c) sem óxido, com $L_{D\text{médio}} = 490 \mu\text{m}$; e (d) com SiO_2 e $L_{D\text{médio}} = 582 \mu\text{m}$. [Figure 3: Two-dimensional distribution of the minority carrier diffusion length of the best Cz-Si solar cells: (a) without oxide, with $L_{D\text{average}} = 507 \mu\text{m}$; and (b) with oxide and $L_{D\text{average}} = 556 \mu\text{m}$; and of the best FZ-Si solar cells: (c) without oxide, with $L_{D\text{average}} = 490 \mu\text{m}$; and (d) with oxide and $L_{D\text{average}} = 582 \mu\text{m}$.]

pela face n^+ e p^+ , respectivamente. Estes resultados foram semelhantes aos obtidos em [11], no entanto neste trabalho o processo de fabricação tem um menor número de passos, as células solares bifaciais são de maior área e considerou-se a barra coletora na área ativa do dispositivo. Considerando os valores de velocidade de recombinação em superfície anteriormente citados e previstos em [17, 18], um τ de $55 \mu\text{s}$ no final do processamento e a r_s^* reduzida para $1,0 \Omega\cdot\text{cm}^2$ (valor que pode ser obtido em células solares com malha metálica otimizada), a eficiência na face n^+ obtida mediante simulação com o programa PC-1D seria de 16,2% e a da face p^+ seria de 13,3%, sendo estes os limites práticos para a estrutura estudada neste trabalho.

A Fig. 3 apresenta a distribuição do comprimento de difusão dos portadores de carga minoritários obtida pela técnica LBIC para os dispositivos mais eficientes em lâminas Cz e FZ, com e sem óxido. Embora o tempo de vida inicial dos portadores de carga minoritários nas lâminas FZ seja quatro vezes o valor das lâminas Cz no início do processamento, o que indicaria que da mesma forma o L_D deveria ser quatro vezes maior, os valores médios do

comprimento de difusão ($L_{D\text{médio}}$) foram relativamente muito próximos. Para células Cz, sem SiO_2 , $L_{D\text{médio}} = 507 \mu\text{m}$ e com SiO_2 , $L_{D\text{médio}} = 556 \mu\text{m}$. Em dispositivos com silício FZ, sem SiO_2 , $L_{D\text{médio}} = 490 \mu\text{m}$ e com SiO_2 , $L_{D\text{médio}} = 582 \mu\text{m}$.

CONCLUSÕES

Foram fabricadas e caracterizadas células solares bifaciais em substratos finos com o objetivo de analisar a passivação de superfícies com SiO_2 crescido termicamente e avaliar a influência do tipo de lâmina utilizado no processamento. Constatou-se que o óxido de silício reduziu a recombinação nas superfícies tipo n e tipo p dos dispositivos processados com lâminas de silício FZ (*float zone*) e Cz (Czochralski), mas os valores da velocidade de recombinação em superfície foram uma ordem de magnitude acima dos valores publicados por outros autores. Em relação ao tipo de substrato, embora as lâminas de silício FZ tivessem maior tempo de vida dos portadores de carga minoritários no início do processamento que as lâminas Cz, a tensão de circuito aberto e a densidade de corrente de curto-circuito

dos dispositivos fabricados foram similares. Isto ocorreu porque o processo introduziu limitações para as lâminas FZ. No caso das lâminas que não passaram por oxidação, o processamento incrementou o tempo de vida dos portadores minoritários nas lâminas Cz. A célula solar bifacial fina mais eficiente foi fabricada com silício FZ e superfícies oxidadas, atingindo eficiência de 14,5% e 11,1%, para iluminação pela face n^+ e p^+ , respectivamente. A melhor célula solar com Si-Cz não foi processada com a camada de SiO_2 e atingiu a eficiência de 14% quando iluminada pela face n^+ e de 10,4% quando iluminada pela face p^+ . Da comparação dos resultados das células solares bifaciais finas fabricadas com silício Cz e FZ pôde-se concluir que não houve vantagem em usar substratos de maior tempo de vida dos portadores de carga minoritários inicial com o processo desenvolvido. No que se refere à camada de SiO_2 , observou-se que ocorreu passivação das superfícies tanto em dispositivos com silício FZ como Cz. Porém, os resultados para o silício Cz foram pouco significativos e faz-se necessária a otimização do processo térmico de crescimento da camada de óxido de silício.

AGRADECIMENTOS

O trabalho foi realizado no âmbito do projeto “Células solares bifaciais em substratos finos e com região p^+ localizada”, Contrato PUCRS-CEEE 9942397. Os autores agradecem também o apoio do CNPq e FINEP, por meio do projeto “Desenvolvimento de células solares eficientes em lâminas de silício tipo n ” e à equipe do NT-Solar/PUCRS pelo apoio na fabricação das células solares.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Goodrich, P. Hacke, Q. Wang, S.B.R. Margolis, T. James, M. Woodhouse, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **114** (2013) 110.
- [2] L. Janßen, M. Rinio, D. Borchert, H. Windgassen, D. Bätzner, H. Kurz, *Prog. Photovolt. Res. Appl.* **15** (2007) 469.
- [3] A. Cuevas, *in Proc. 20th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf. Exhib., WIP, Barcelona, Espanha (2005)* 801.
- [4] I. Zanesco, E. Lorenzo, *Prog. Photovolt. Res. Appl.* **10** (2002) 361.
- [5] A. Moehlecke, F.S. Febras, I. Zanesco, *Solar Energy* **96** (2013) 253.
- [6] R. Guerro-Lemus, R. Vega, T. Kim, A. Kimm, L.E. Shephard, *Renew. Sust. Energ. Rev.* **60** (2016) 1533.
- [7] F. Fertig, S. Nold, N. Wohrle, J. Greulich, I. Hädrich, K. Krauß, M. Mittag, D. Biro, S. Rein, R. Preu, *Prog. Photovolt. Res. Appl.* **24** (2016) 800.
- [8] H. Ohtsuka, M. Sakamoto, K. Tsutsui, Y. Yazawa, *Prog. Photovolt. Res. Appl.* **8**, 4 (2000) 385.
- [9] L. Yang, Q.H. Ye, A. Ebong, W.T. Song, G.J. Zhang, J.X. Wang, Y. Ma, *Prog. Photovolt. Res. Appl.* **19** (2011) 275.
- [10] L. Janßen, H. Windgassen, D.L. Bätzner, B. Bitnar, H. Neuhaus, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **93** (2009) 1435.
- [11] F. Recart, “Evaluación de la serigrafía com técnica de metalización para células solares eficientes”, Tese Dr., Un. País Vasco, Bilbao, Espanha (2001).
- [12] L. Pérez, J. Coello, I. Freire, K. Varner, R. Lago, G. Bueno, C. Cañizo, A. Luque, *in Proc. 20th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf. Exhib., WIP, Barcelona, Espanha (2005)* 891.
- [13] S. Steckemetz, A. Metz, R. Hezel, *in Proc. 17th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf. Exhib., WIP, Munique, Alemanha (2001)* 1902.
- [14] A. Moehlecke, V.C. Osório, I. Zanesco, *Mater. Res.* **17**, 5 (2014) 1328.
- [15] V.C. Osório, A. Moehlecke, I. Zanesco, *Mater. Res. Express* **3** (2016) 1.
- [16] J.C. Jimeno, G. Bueno, R. Lago, I. Freire, L. Pérez, F. Recart, I. Hoces, N. Azkona, J. Alonso, P. Sánchez-Friera, S.W. Glunz, G. Emanuel, R. Ruiz, A. Pohl, W. Wolke, M. Schubert, I. Gavilanes, M. Ezker, E. Zugasti, A. Turumbay, H. Sato, J. Bragagnolo, P.M. Nasch, S. Ostapenko, A. Belyaev, W. Dallas, O. Polupan, K. Albertsen, A. Shaikh, H. Kerp, J. Salami, *in Proc. 22nd Eur. Photovolt. Solar Energy Conf. Exhib., WIP, Milão, Itália (2007)* 875.
- [17] V.C. Osório, A. Moehlecke, I. Zanesco, *Rev. Bras. Energia Solar* **III**, 2 (2012) 86.
- [18] I. Zanesco, A. Moehlecke, J.L. Pinto, M. Ly, *in Conf. Record 38th Photovolt. Special. Conf., IEEE, Austin, EUA (2012)* 2284.
- [19] WT-2000PV, “User manual: measurement tool for solar cell manufacturing”, <http://www.semilab.com>, acesso 4 abril 2017.
- [20] P.A. Basore, D.A. Clugston, *in Conf. Record 26th Photovolt. Spec. Conf., IEEE, Anaheim, EUA (1995)* 207.
- [21] A. Cuevas, G. Giroult-Matlakowski, P.A. Basore, C. Dubois, R.R. King, *in Conf. Record First World Conf. Photovolt. Energy Convers., IEEE, Hawai, EUA (1994)* 1446.
- [22] A. Das, “Development of high-efficiency boron diffused silicon solar cells”, PhD dissert., Georgia Inst. Techn., Atlanta, EUA (2012).

(Rec. 24/04/2017, Rev. 06/07/2017, Ac. 22/08/2017)