

INFLUÊNCIA DA PASSIVAÇÃO EM CÉLULAS SOLARES DE SILÍCIO COM CAMPO RETRODIFUSOR SELETIVO DE ALUMÍNIO E BORO

Thais Crestani ¹
Izete Zanesco ¹
Adriano Moehlecke ¹

Resumo

O campo retrodifusor seletivo em células solares processadas em lâminas de silício tipo p possibilita aumentar a eficiência, ao mesmo tempo em que evita o abaulamento, típico em células solares com campo retrodifusor homogêneo formado por pasta de alumínio. O objetivo deste trabalho é analisar a influência da passivação com SiO₂ no emissor de fósforo e no campo retrodifusor seletivo de alumínio e boro de células solares n⁺pp⁺ processadas em lâminas de silício Czochralski tipo p, grau solar. O campo retrodifusor seletivo foi formado pela difusão de boro em toda a face posterior da lâmina de silício e por serigrafia foi depositada a pasta de alumínio, somente nas trilhas metálicas. Para a temperatura de difusão de boro (T_B) de 950°C, observou-se que a passivação resultou em um aumento da eficiência devido ao aumento da tensão de circuito aberto e que a passivação somente foi eficaz no emissor n⁺. Para a T_B de 970°C, as células solares com passivação alcançaram a eficiência de 16,0%, devido ao aumento no fator de forma e a passivação foi eficaz na região p⁺ dopada com boro e no emissor de fósforo.

Palavras-chave: Células solares; Campo retrodifusor seletivo; Passivação.

INFLUENCE OF THE PASSIVATION IN SILICON CELLS SOLAR WITH SELECTIVE BACK SURFACE FIELD OF ALUMINIUM AND BORON

Abstract

The selective back surface field in solar cells processed in p-type silicon wafers enables the increasing of the efficiency and avoids the typical bowing in solar cells with homogeneous back surface field formed by aluminum paste. The goal of this paper is to analyze the influence of passivation with SiO₂ in the phosphorus emitter and in the selective back surface field of aluminum and boron of n⁺pp⁺ solar cells processed in p-type Czochralski silicon wafers, solar grade. The selective back surface field was formed by boron diffusion in whole rear face of the silicon wafer and the aluminum paste was deposited by screen printing to form the metal grid and the selective emitter. Solar cells were processed with boron diffusion temperature (T_B) of 950°C. The passivation enhanced the efficiency due to the increase of the open circuit voltage and the passivation is effective only in the emitter. The solar cells produced with T_B of 970°C and passivation achieved the efficiency of 16.0%, due to the increasing of the fill factor. Analyzing these devices, we also concluded that the passivation was effective in the p⁺ region, doped with boron, as well as in the phosphorus emitter.

Keywords: Solar cells; Selective BSF; Passivation.

1 INTRODUÇÃO

As células solares fabricadas em lâminas de silício cristalino tipo p dominam o mercado mundial. As células típicas da indústria possuem uma junção pn em uma das faces e na outra face é formado o campo retrodifusor, também denominado de BSF (*back surface field*), que tem a função de diminuir a recombinação em superfície na face posterior da célula solar e, conseqüentemente, aumentar a tensão de

circuito aberto e a corrente de curto-circuito [1]. Simulações mostraram que em células solares com BSF a V_{OC} é pouco dependente da resistividade, mas a J_{SC} aumenta com o aumento da resistividade da lâmina de silício [2].

O campo retrodifusor é formado por meio da difusão de boro ou alumínio em lâminas de silício tipo p, que forma um campo elétrico que repele os portadores de

¹Núcleo de Tecnologia em Energia Solar, Programa de Pós-graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Faculdade de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUCRS, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: izete@puhrs.br



carga minoritários que se aproximam da superfície posterior, impedindo que se recombinem.

Em células solares com estrutura n^+pp^+ e com BSF homogêneo, a formação de uma região p^+ altamente dopada na superfície posterior depende dos seguintes parâmetros [3]:

- Da concentração superficial do dopante na região p^+ e da concentração do dopante em função da profundidade;
- Da recombinação na própria camada p^+ ; e
- Da relação entre o comprimento de difusão dos portadores de carga minoritários e a espessura da lâmina de silício.

O desenvolvimento do campo retrodifusor seletivo de alumínio e boro em células solares processadas em lâminas de silício tipo p possibilita aumentar a eficiência, ao mesmo tempo em que evita o abaulamento, típico em células solares com BSF homogêneo formado por pasta de alumínio [4]. A face posterior da célula solar típica da indústria é completamente recoberta com pasta de alumínio, que provoca o abaulamento, devido aos diferentes coeficientes de dilatação do silício e da pasta de alumínio. Neste caso, tem-se uma superfície com alta velocidade de recombinação dos portadores de carga minoritários, devido ao contato metal-semicondutor [5].

A formação do emissor seletivo pode proporcionar um aumento de 0,3% a 2% na eficiência em relação ao padrão de células solares com emissor homogêneo, dependendo de outras etapas do processo, tais como passivação e metalização, entre outras. A eficiência das células solares com emissor seletivo também é maior, se comparada com a eficiência de dispositivos com emissor localizado [6].

Para se obter uma célula solar de silício com alta eficiência (maior ou igual a 20%) é importante passar ambas as faces do dispositivo. A passivação consiste em diversos métodos que têm como objetivo reduzir a recombinação dos portadores de carga minoritários nas superfícies. Portanto, a passivação eficaz é uma forma de reduzir o custo das células solares por meio do aumento da eficiência. Atualmente, um dos desafios para a produção de células solares comerciais é baixar o custo de produção. Neste sentido, os métodos de passivação a baixas temperaturas estão se tornando cada vez mais utilizados [7]. Na indústria utiliza-se o nitreto de silício.

O óxido de silício é um dielétrico eficaz para passar a superfície de células solares de silício, porém o processo a alta temperatura para crescer SiO_2 pode provocar a contaminação do substrato por metais, degradando o tempo de vida dos portadores minoritários. Uma alternativa é depositar uma fina camada de nitreto de silício (SiN_x) por PECVD (*plasma-enhanced chemical vapor deposition*) com temperaturas menores que 500°C [8]. O SiN_x serve como filme antirreflexo em células solares, e também como material para passar a superfície de silício do tipo n. Porém, a passivação com SiN_x é menos eficiente para a superfície de silício tipo p. Recentemente a utilização de deposição de camadas atômicas (ALD - atomic layer

deposition) de um filme fino de Al_2O_3 tem se mostrado mais eficiente em lâminas de silício tipo p [9]. Dispositivos com área de 156 mm × 156 mm foram desenvolvidos com deposição por ALD de Al_2O_3 em células solares do tipo PERC (*passivated emitter and rear contacts*) e foi obtido um aumento na eficiência de 0,7% absoluto [10].

Um método padrão de passivação da superfície de lâminas de silício é a oxidação térmica a alta temperatura (~1000°C). O óxido de silício formado termicamente proporciona excelente passivação de superfície em lâminas de silício tipo n e tipo p de alta resistividade (> 100 Ω.cm). Contudo, para resistividades baixas (~1 Ω.cm) a qualidade da passivação depende do tipo de dopagem que a lâmina foi submetida [8].

Células solares com 20% de eficiência, com BSF de boro, foram obtidas no trabalho desenvolvido por Das et al. [11], no qual foi realizada a formação de uma camada dielétrica de SiO_2 , por *spin-on*, que realiza tanto *gettering* de impurezas indesejadas quanto a passivação de superfície em uma única etapa térmica. Alta densidade superficial de cargas elétricas, da ordem de 10^3 cm⁻², foi encontrada o que explica a qualidade da passivação na superfície [11]. Yang et al. [12] analisaram a influência da passivação formada por uma camada de SiO_2/a -Si:H em células solares IBC (*interdigitated back contact*) base n com dopagem a laser nas regiões p^+ e n^+ e obtiveram a eficiência de 23% em lâminas de Si crescido por fusão zonal flutuante (Si-FZ). Nestes dispositivos, o alumínio foi depositado pelo método de evaporação em alto vácuo [12].

O óxido de silício pode ser depositado em ambas as faces da lâmina no mesmo processo térmico e foi comprovado que este dielétrico é eficaz na passivação de regiões altamente dopadas tipo n e tipo p. Em trabalhos anteriores foi constatado que uma camada de 10 nm de SiO_2 é eficaz em passar a região altamente dopada n^+ com fósforo [13].

O objetivo deste trabalho é analisar a influência da passivação com SiO_2 em ambas as faces de células solares com campo retrodifusor seletivo de alumínio e boro processadas em lâminas de silício Czochralski (Si-Cz) tipo p, grau solar. Para formar o campo retrodifusor seletivo, a difusão de boro foi implementada em toda a face posterior da lâmina de silício e por serigrafia foi depositada a pasta de alumínio, somente nas trilhas metálicas [14]. A inovação está focada na eficácia da passivação do campo retrodifusor p^+ por meio de uma fina camada de 10 nm de SiO_2 , produzida por oxidação seca. Portanto, este processo pode ser facilmente adaptado à indústria atual de células solares.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O processo de fabricação das células solares com passivação está resumido na Figura 1 e consistiu basicamente nas seguintes etapas: texturação das superfícies das lâminas de Si, limpeza química RCA2 [15], difusão de boro e oxidação na mesma etapa térmica [16], ataque em ácido fluorídrico

e limpeza RCA, difusão de fósforo, ataque do silicato de boro e de fósforo e limpeza química RCA2, crescimento de SiO_2 (oxidação térmica seca), deposição do filme antirreflexo (AR), metalização na face frontal e posterior por serigrafia e isolamento das bordas. As células solares sem passivação foram produzidas pelo mesmo processo, porém sem a etapa de crescimento de SiO_2 . Destaca-se que está sendo solicitada a patente, junto ao INPI (Instituto Nacional de Propriedade Industrial) de etapas deste processo de produção de células solares [17]. Utilizaram-se substratos de Si-Cz tipo p, grau solar, com 100 mm de diâmetro, espessura de $(200 \pm 30) \mu\text{m}$, orientação dos planos cristalinos $\{100\}$ e resistividade de base entre $1 \Omega\cdot\text{cm}$ e $20 \Omega\cdot\text{cm}$.

Neste caso, o campo retrodifusor seletivo na face posterior foi formado por boro entre as trilhas metálicas e alumínio sob as trilhas metálicas. A difusão de alumínio ocorreu durante o processo de queima simultâneo das pastas metálicas depositadas em ambas as faces. A região p^+ com boro foi formada pela deposição do líquido dopante PBF20 e a difusão foi realizada em forno com tubo de quartzo. A difusão de boro foi realizada para a temperatura (T_B) de 950°C e 970°C , que resultou na resistência de folha da região p^+ ($R_{\square\text{Boro}}$) entre $52 \Omega/\square$ e $56 \Omega/\square$, para a $T_B = 950^\circ\text{C}$, como mostra a Tabela I. A resistência de folha foi medida em 13 regiões da lâmina de silício. Com o aumento da T_B para 970°C , a resistência de folha diminuiu e foi de $42\text{-}43 \Omega/\square$. Para os processos com passivação de superfícies a resistência de folha foi medida antes da oxidação seca.

No campo retrodifusor seletivo foi formada uma região menos dopada entre as trilhas metálicas, reduzindo-se a recombinação dos portadores de carga minoritários e uma região mais dopada sob as trilhas metálicas, que

reduz a resistência de contato. Ao mesmo tempo, o campo retrodifusor seletivo de boro e alumínio evita o abaulamento das células solares.

Após a difusão de boro e oxidação, limpeza química em ácido fluorídrico e em solução RCA2, foi implementada a difusão de fósforo na face frontal em forno com tubo de quartzo com o dopante POCl_3 . Como se pode ver na Tabela I, a resistência de folha do emissor de fósforo variou de $54 \Omega/\square$ a $60 \Omega/\square$.

O filme antirreflexo de TiO_2 na face frontal foi depositado em vácuo pela técnica de canhão de elétrons, após a limpeza química RCA2 e antes do processo de deposição das pastas metálicas para a formação do BSF seletivo e da malha metálica frontal. A espessura do filme AR de dióxido de titânio na face frontal foi de 60 nm.

A malha metálica posterior, que forma o BSF seletivo, foi depositada por serigrafia. O recobrimento da malha de pasta de alumínio foi de 18,5% da área. A malha metálica frontal foi formada com pasta de prata e o fator de sombra foi de 7,9%. A secagem e queima das pastas metálicas foi realizada em forno de esteira. A temperatura de queima (*firing*) das pastas metálicas e difusão de Al foi variada de 850°C a 890°C .

A estrutura n^+pp^+ formada por esse processo de produção de células solares com campo retrodifusor seletivo é mostrada na Figura 2, onde se destaca que a região p^+ seletiva foi formada pela difusão de boro e alumínio e o emissor n^+ foi formado pela difusão de fósforo.

As células solares foram caracterizadas por meio da medição da densidade de corrente em função da tensão elétrica aplicada (curva J-V) em condições padrão de medição: irradiância de $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$, espectro solar AM1,5G e temperatura

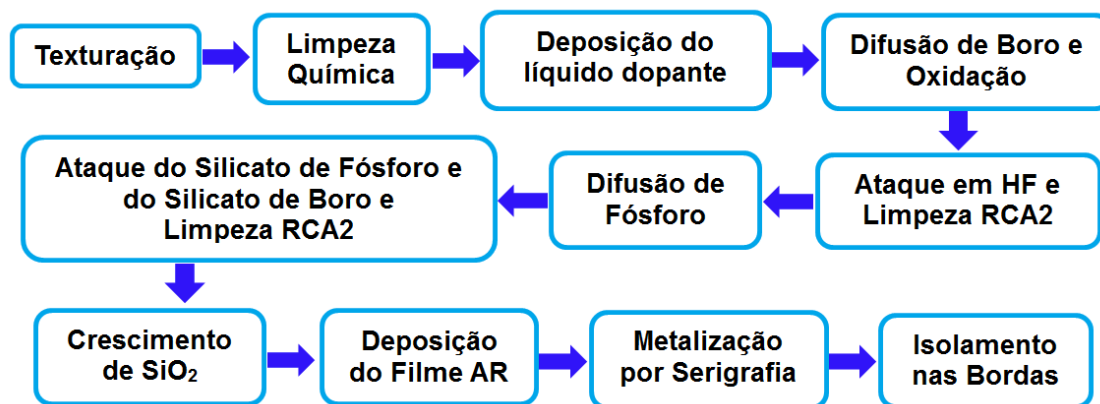


Figura 1. Etapas do processo de fabricação das células solares com passivação por dióxido de silício crescido termicamente.

Tabela I. Resistência de folha da região p^+ com a temperatura de difusão de boro de 950°C e 970°C para as células solares processadas com e sem passivação

T_B ($^\circ\text{C}$)	Sem Passivação		Com Passivação	
	$R_{\square\text{Boro}}$ (Ω/\square)	$R_{\square\text{Fósforo}}$ (Ω/\square)	$R_{\square\text{Boro}}$ (Ω/\square)	$R_{\square\text{Fósforo}}$ (Ω/\square)
950	56 ± 2	60 ± 4	52 ± 3	54 ± 6
970	43 ± 2	57 ± 7	42 ± 2	60 ± 4

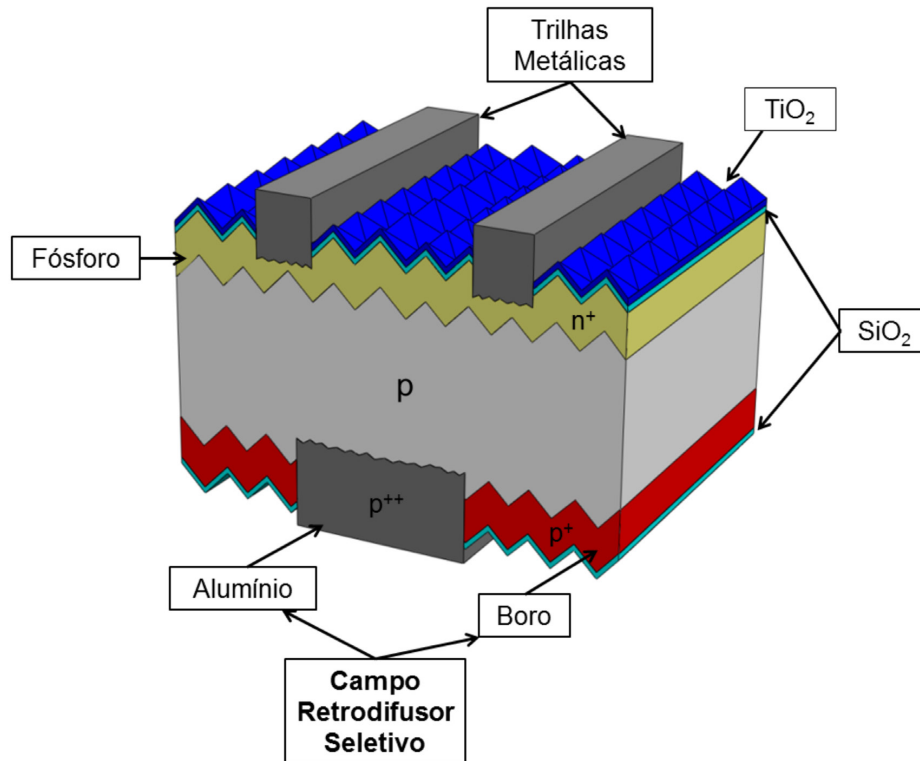


Figura 2. Estrutura da célula solar com campo retrodifusor seletivo de alumínio e boro.

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 resposta espectral e a refletância para avaliar a eficiência quântica interna.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Temperatura de Difusão de Boro de 950°C

Para comparar os parâmetros elétricos de células solares com e sem passivação com SiO_2 , primeiramente realizou-se a difusão de boro a 950°C durante 20 minutos [15]. Os valores médios da tensão de circuito aberto (V_{oc}), da densidade de corrente de curto-circuito (J_{sc}), do fator de forma (FF) e da eficiência (η) são apresentados na Tabela 2, onde T_Q é a temperatura de queima simultânea da pasta de alumínio que forma a malha na face posterior e da pasta de prata, que forma a malha metálica na face frontal.

Da Tabela 2 pode-se observar que as células solares com passivação resultaram em um aumento da eficiência devido ao aumento da V_{oc} em todas as temperaturas de queima/difusão. Sem passivação, a melhor eficiência média foi de $(15,1 \pm 0,4) \%$ e foi obtida para a temperatura de queima de 880°C, com V_{oc} média de $(584,0 \pm 1,4) \text{ mV}$. Para os dispositivos com passivação, a maior eficiência média, de $(15,6 \pm 0,1) \%$, também foi obtida para a

temperatura de queima de 880°C. Neste caso, a V_{oc} média foi de $(593,1 \pm 1,1) \text{ mV}$. Também se nota que o desvio padrão da eficiência diminuiu um pouco com a passivação. Nos dispositivos sem passivação o fator de forma aumentou com o aumento da temperatura de queima. Porém, nas células solares com passivação não se observou esta dependência, pois o fator de forma foi maior, da ordem de 0,77. A J_{sc} praticamente não foi afetada pela passivação.

Na Figura 3 apresenta-se a eficiência quântica interna (EQI) das células solares com maior eficiência de conversão de energia solar em elétrica. Neste caso, a eficiência foi de 15,6% para a célula solar com e sem passivação. Observa-se que o processo com passivação com SiO_2 promoveu um aumento da EQI principalmente para comprimentos de onda menores que 600 nm. Este resultado indica que a passivação é mais efetiva no emissor de fósforo que na região p^+ do campo retrodifusor seletivo, para a temperatura de difusão de boro de 950°C.

3.2 Temperatura de Difusão de Boro de 970°C

Para comparar a influência da passivação em células solares com a região p^+ mais profunda entre as trilhas metálicas, processaram-se dispositivos com temperatura de difusão de boro de 970°C durante 20 minutos. Os parâmetros elétricos médios das células solares com e sem passivação são mostrados na Tabela 3.

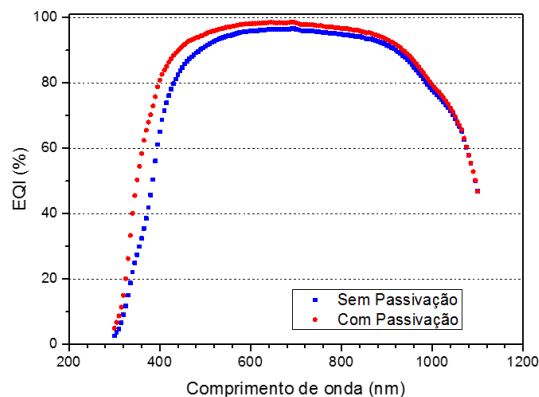
Tabela 2. Parâmetros elétricos médios das células solares com e sem passivação com SiO₂ processadas com temperatura de difusão de boro de 950°C em função da temperatura de queima das pastas metálicas

Passivação	Nº de células	T _Q (°C)	V _{OC} (mV)	J _{SC} (mA/cm ²)	FF	η (%)
Sem SiO ₂	2	850	587,6 ± 0,5	33,8	0,749 ± 0,001	14,9*
	4	860	585,9 ± 0,6	33,7 ± 0,1	0,759 ± 0,007	15,0 ± 0,1
	5	870	583,5 ± 1,4	33,9 ± 0,1	0,752 ± 0,009	14,9 ± 0,2
	4	880	584,0 ± 1,4	33,8 ± 0,1	0,767 ± 0,016	15,1 ± 0,4
Com SiO ₂	5	860	593,0 ± 0,7	33,7 ± 0,1	0,771 ± 0,013	15,4 ± 0,2
	5	870	594,0 ± 1,1	33,7 ± 0,2	0,777 ± 0,003	15,5 ± 0,1
	4	880	593,1 ± 1,1	33,8 ± 0,2	0,774 ± 0,005	15,6 ± 0,1

* As duas células solares apresentam o mesmo valor de eficiência e J_{SC}.

Tabela 3. Parâmetros elétricos médios das células solares com e sem passivação com SiO₂ processadas com temperatura de difusão de boro de 970°C em função da temperatura de queima das pastas metálicas

Passivação	Nº de células	T _Q (°C)	V _{OC} (mV)	J _{SC} (mA/cm ²)	FF	η (%)
Sem SiO ₂	4	850	592,5 ± 0,6	33,9 ± 0,1	0,737 ± 0,035	14,3 ± 0,6
	4	860	591,8 ± 1,0	33,7 ± 0,1	0,762 ± 0,010	14,7 ± 0,2
	5	870	590,0 ± 1,6	33,9 ± 0,1	0,762 ± 0,018	14,8 ± 0,4
	4	880	588,7 ± 0,4	33,8 ± 0,1	0,758 ± 0,006	14,6 ± 0,2
Com SiO ₂	3	850	591,0 ± 0,1	33,6 ± 0,1	0,789 ± 0,026	15,7 ± 0,6
	3	860	590,8 ± 0,4	33,7 ± 0,1	0,793 ± 0,015	15,8 ± 0,4
	3	870	590,5 ± 0,4	33,8 ± 0,1	0,790 ± 0,008	15,8 ± 0,1
	3	880	589,1 ± 0,5	33,8 ± 0,1	0,780 ± 0,005	15,6 ± 0,1
	3	890	589,6 ± 0,5	33,9 ± 0,1	0,790 ± 0,002	15,8 ± 0,1

**Figura 3.** Eficiência quântica interna das células solares produzidas com temperatura de difusão de boro de 950°C, com e sem passivação das superfícies com SiO₂.

A maior eficiência média medida em dispositivos sem passivação foi de (14,8 ± 0,4) %, obtida com a temperatura de queima de 870°C. Novamente, verifica-se que o menor FF ocorreu para a menor T_Q. Com a passivação, a eficiência média aumentou para 15,8% e ocorreu para as temperaturas de queima de 860°C, 870°C e 890°C. Comparando a Tabela 3 com a Tabela 2, nos dispositivos sem passivação, a V_{OC} aumentou devido a maior profundidade da região p⁺ formada pela difusão de boro.

A célula de maior eficiência sem passivação apresentou V_{OC} = 590,0 mV, J_{SC} = 33,9 mA/cm²,

FF = 0,779 e η = 15,6%. Com passivação, o dispositivo mais eficiente apresentou os seguintes parâmetros elétricos: V_{OC} = 590,9 mV, J_{SC} = 33,5 mA/cm², FF = 0,806 e η = 16,0%. Neste caso, a eficiência aumentou devido ao aumento do fator de forma. A V_{OC} aumentou pouco. Portanto, comprova-se que além de aumentar a V_{OC}, a passivação também aumenta o fator de forma.

A eficiência quântica interna para as células solares com maior eficiência, com e sem passivação com SiO₂, é comparada na Figura 4a. Na Figura 4b mostra-se a refletância das mesmas células solares. Observa-se que a passivação promove um aumento da EQI, tanto para comprimentos de onda curtos, quanto para comprimentos de onda maiores que 900 nm. Portanto, pode-se concluir que quando a região p⁺ dopada com boro do BSF seletivo tem menor resistência de folha (maior profundidade) a passivação com SiO₂ nesta região é eficaz.

A J_{SC} da célula com maior eficiência e sem passivação foi de 33,9 mA/cm² e para a célula com passivação foi de 33,5 mA/cm², devido ao aumento da refletância para comprimentos de onda menores que 600 nm, como mostra a Figura 4b. Este resultado indica que o filme de dióxido de titânio deve ser otimizado para dispositivos com passivação. A espessura do filme AR para a célula sem passivação foi de 65 nm e para a célula com passivação (SiO₂ e TiO₂) foi de 73 nm. Estes valores foram estimados a partir da medida da refletância.

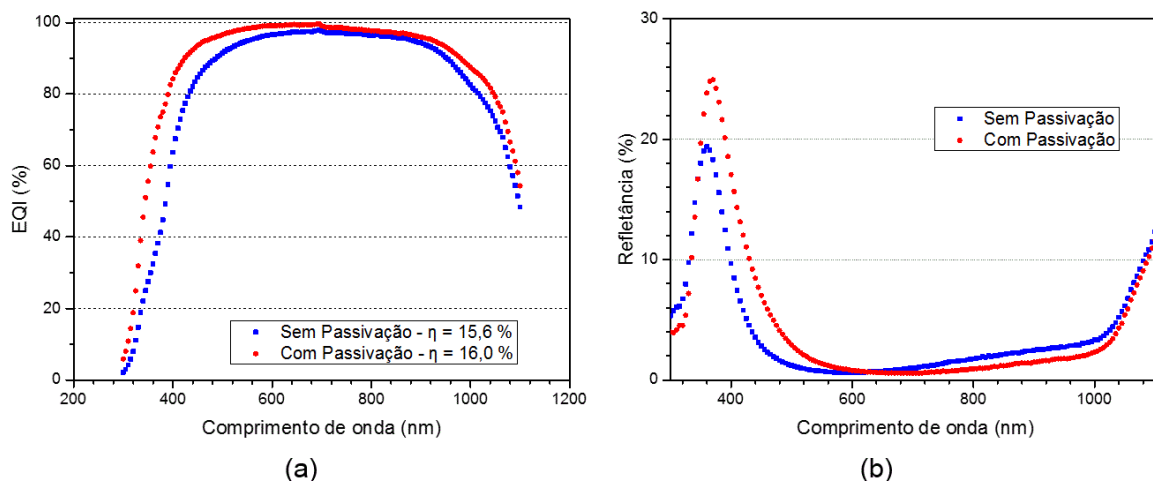


Figura 4. (a) Eficiência quântica interna; e (b) refletância das células solares produzidas com temperatura de difusão de boro de 970°C, com e sem passivação de superfícies com SiO₂.

A refletância média ponderada (ρ_w) considera a sensibilidade espectral da célula solar e o espectro solar e é calculada como segue [18]:

$$\rho_w = \left(\frac{\int E_s(\lambda) RE(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda}{\int E_s(\lambda) RE(\lambda) d\lambda} \right) \quad (1)$$

onde, $E_s(\lambda)$ é o espectro solar AM1,5G, $RE(\lambda)$ é a resposta espectral e $\rho(\lambda)$ é a refletância. A refletância média ponderada foi de 2,5% e 2,6% para a célula sem e com passivação, respectivamente, justificando a menor J_{sc} para a célula solar com passivação. Considerou-se a refletância em amostras sem metalização.

4 CONCLUSÕES

Foram fabricadas e caracterizadas células solares em lâminas de Si Czochralski tipo p, grau solar, com o objetivo de analisar a influência da passivação no emissor e no campo retrodifusor seletivo de alumínio e boro.

Para a temperatura de difusão de boro de 950°C, em células solares com passivação observou-se o aumento da eficiência devido ao aumento da V_{oc} para todas as temperaturas de queima/difusão. Em células solares processadas sem passivação a melhor eficiência média foi de $(15,2 \pm 0,3) \%$

e em dispositivos com passivação a eficiência média foi de $(15,5 \pm 0,1) \%$. Também se constatou- que a passivação é mais eficaz no emissor n⁺ que na região p⁺ dopada com boro.

Para a temperatura de difusão de boro de 970°C, comparando os resultados com e sem passivação, observou-se o aumento da eficiência devido principalmente ao aumento do fator de forma. As células solares com passivação alcançaram a eficiência de 16,0%, ou seja, 0,7% (absoluto) maior que a eficiência dos dispositivos sem passivação. Para a região p⁺ dopada com boro com maior profundidade, constatou-se que o processo com passivação com SiO₂ promoveu um aumento da eficiência quântica interna, tanto para comprimentos de onda curtos, quanto para comprimentos de onda maiores que 900 nm, indicando que para a região p⁺ com maior dopagem, a passivação com SiO₂ é eficaz.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Eletrosul pela subvenção do projeto de P&D intitulado "Desenvolvimento de Processos Industriais para Fabricação de Células Solares com Pasta de Alumínio e Passivação", Convênio ELETROSUL n° 1110140010 e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

- 1 Roos VO. A simple theory of back surface field (BSF) solar cells. *Journal of Applied Physics*. 1978;49(6):3503-3511. <http://dx.doi.org/10.1063/1.325262>.
- 2 Park S, Park H, Kang Y, Lee HS, Kim D. Analysis of aluminum back surface field at different wafer specifications in crystalline silicon solar cells. *Current Applied Physics*. 2016;16(9):1062-1068. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cap.2016.05.016>.
- 3 Gu X, Yu X, Yang D. Efficiency improvement of crystalline silicon solar cells with a back surface field produced by boron and aluminum co-doping. *Scripta Materialia*. 2012;66:394-397.

- 4 Hilali MM, Gee JM, Hacke P. Bow in screen-printed back-contact industrial silicon solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2007;91:1228-1233.
- 5 Green MA. *Solar cells: operating principles, technology and system applications*. Kensington: NSW; 1992.
- 6 Rahman MZ. Status of selective emitters for p-type c-Si solar cells. *Optics and Photonics Journal*. 2012;2(02):129-134. <http://dx.doi.org/10.4236/opj.2012.22018>.
- 7 Green MA. The path to 25% silicon solar cell efficiency: history of silicon cell evolution. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2009;17(3):183-189. <http://dx.doi.org/10.1002/pip.892>.
- 8 Aberle AG. Surface passivation of crystalline silicon solar cells: a review. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 1999;8:362-376.
- 9 Lei D, Yu X, Song L, Gu X, Li G, Yang D. Modulation of atomic-layer-deposited Al₂O₃ film passivation of silicon surface by rapid thermal processing. *Applied Physics Letters*. 2011;99(5):1-4. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3616145>.
- 10 Cho YJ, Shin WC, Chang HS. Selective deposition contact patterning using atomic layer deposition for the fabrication of crystalline silicon solar cells. *Thin Solid Films*. 2014;568:1-5. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2014.07.054>.
- 11 Das A, Meemongkolkiat V, Kim DS, Ramanathan S, Rohatgi A. 20% efficient screen-printed cells with spin-on-dielectric-passivated boron back-surface field. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2010;57(10):2462-2469. <http://dx.doi.org/10.1109/TED.2010.2057010>.
- 12 Yang X, Bullock J, Xu L, Bi Q, Surve S, Ernst M, et al. Passivated contacts to laser doped p⁺ and n⁺ regions. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2015;40:38-44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2015.03.026>.
- 13 Zanesco I, Moehlecke A. Analysis of the silicon dioxide passivation and forming gas annealing in silicon solar cells. In: *Proceedings of the SWC 2015 ISES Solar World Congress*; 2015; Daegu, Coreia do Sul. Germany: ISES; 2015. p. 1-9.
- 14 Crestani T, Zanesco I, Moehlecke A, Razera R A Z, Aquino J, Model JCM, et al. Desenvolvimento do campo retrodifusor seletivo de alumínio e boro em células solares de silício. In: *Anais VI Congresso Brasileiro de Energia Solar (VI CBENS)*; 2016; Belo Horizonte. Belo Horizonte: ABENS; 2016.
- 15 Kern W. The evolution of silicon wafer cleaning technology. *Journal of the Electrochemical Society*. 1990;137:1887-1891.
- 16 Costa RC. *Desenvolvimento de processos industriais de fabricação de células solares bifaciais em silício CZ [dissertação de mestrado]*. Porto Alegre: Programa de Pós-graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul; 2009.
- 17 Zanesco I, Moehlecke A. Processo de difusão de dopantes em lâminas de silício para a fabricação de células solares. Patente P112030606, BR 10 2012 030606 9. 2012 Nov. 30.
- 18 Zhao J, Green MA. Optimized antireflection coatings for high-efficiency silicon solar cells. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 1991;38(8):1925-1934. <http://dx.doi.org/10.1109/16.119035>.

Recebido em: 8 Set. 2016

Aceito em: 23 Nov. 2016