

ANÁLISE DA JUNÇÃO FLUTUANTE NO CAMPO RETRODIFUSOR DE BORO EM CÉLULAS SOLARES PERT BIFACIAIS

Thais Crestani – realthaiscrestani@gmail.com

Izete Zanescio – izete@pucrs.br

Adriano Moehlecke – moehleck@pucrs.br

Moussa Ly – moussa.ly@pucrs.br

Matias Freiberger – matias_freiberger@hotmail.com

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), Escola Politécnica,
Núcleo de Tecnologia em Energia Solar (NT-Solar)

Resumo. As células solares bifaciais convertem a irradiância solar incidente em ambas as faces e as configurações da família PERC têm potencial de aumento da eficiência devido a passivação das duas faces. Em dispositivos base p, a passivação do campo retrodifusor (BSF - back surface field) de boro é um desafio. Uma alternativa aos métodos convencionais para passivação é a formação da junção flutuante. O objetivo desse artigo é analisar a formação da junção flutuante no campo retrodifusor de boro em células solares bifaciais PERT base p, com diferentes resistências de folha do BSF. Os dopantes foram depositados pelo método spin-on para formar o BSF e a junção flutuante. Constatou-se que a eficiência com irradiância no emissor diminuiu com o aumento da resistência de folha do BSF de boro de (28 ± 2) a $(53 \pm 3) \Omega/\square$ e que a junção flutuante reduziu parâmetros elétricos. A maior eficiência da célula solar com passivação somente com SiO_2 foi de 16,9 % enquanto que com junção flutuante a eficiência alcançada foi de 15,9 %. Quando a irradiância incidiu no BSF, observou-se uma maior redução da densidade de corrente de curto-circuito (J_{sc}) e da tensão de circuito aberto nas células solares com junção flutuante. No entanto, a partir da eficiência quântica, verificou-se que a junção flutuante passivou a superfície dopada com boro. Porém, provavelmente o substrato de silício grau solar degradou ao ser submetido a etapa térmica para formar a junção flutuante. A eficiência das células solares com irradiância no BSF foi menor que a eficiência no emissor para dispositivos com e sem junção flutuante. A eficiência média ponderada da célula solar sem e com junção flutuante foi de 15,8 % e de 14,2 %, respectivamente. O ataque químico superficial para aumentar a resistência de folha do BSF reduziu a eficiência da célula solar em ambas as faces.

Palavras-chave: Células Solares, Campo Retrodifusor, Junção Flutuante.

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Para reduzir os custos na produção, onde as lâminas de Si representam aproximadamente 52 % do custo da célula solar, os fabricantes atualizaram as linhas de produção existentes para aumentar a eficiência dos dispositivos (ITRPV, 2021). Com a intenção de ultrapassar a eficiência de conversão de energia de 20 %, os fabricantes investiram na produção de células solares da família PERC (célula solar com emissor e face posterior passivada - *passivated emitter and rear cell*). Em 2014, as células solares PERC se tornaram a segunda maior tecnologia de produção, sendo a primeira, a tecnologia com campo retrodifusor de alumínio (Al-BSF) (Green, 2015). Em 2020, a tecnologia PERC dominou a produção de células solares comerciais, com 80% do mercado mundial (ITRPV, 2021).

A primeira publicação da célula PERC foi em 1989 (Blakers *et al.*, 1989). Uma das características da configuração PERC é a redução da recombinação da superfície posterior por uma combinação de passivação e redução da área de contato metal/semicondutor. Para produzir as células com tecnologia PERC, a difusão de boro está sendo aperfeiçoada. As primeiras células PERC de alta eficiência foram fabricadas em 1988, com 21,8 % de eficiência. Desde então, esta tecnologia está sendo desenvolvida e observou-se que o trióxido de alumínio é um excelente material para passivação do campo retrodifusor de boro. Em 2006 foi desenvolvida a célula solar PERC com eficiência de 23,4 % em substratos de Si tipo n com passivação eficiente da superfície p^+ com Al_2O_3 . Na família das células PERC estão as seguintes configurações: PERC simples (célula com emissor passivado diretamente contatado - *passivated emitter rear directly-contacted*), célula PERL (célula com emissor passivado com difusão posterior localizada - *passivated emitter and rear locally diffused*), célula PERT (célula de emissor passivado com região posterior totalmente difundida - *passivated emitter rear totally diffused*), célula PERF (célula de emissor passivado com junção flutuante posterior - *passivated emitter rear floating-junction*). As configurações PERC mais amplamente implementadas são a PERL e a PERT (Green, 2015).

Até 2029, a expectativa é que sejam produzidas células solares com eficiência de 23,5 % e 24,1 % em silício cristalino tipo p e tipo n, com as configurações PERC, PERL ou PERT. A tecnologia das células solares bifaciais PERC vem melhorando devido a possibilidade do dispositivo absorver radiação solar tanto na face frontal como na face posterior e com isso produzem mais energia do que as células solares monofaciais. Além disso, o custo de produção dos módulos fotovoltaicos com células solares bifaciais é semelhante ao de módulos monofaciais (Appelbaum, 2016). Espera-se que

o mercado de módulos fotovoltaicos bifaciais aumente significativamente para mais de 55 % nos próximos 10 anos (ITRPV 2021).

A fonte mais comumente utilizada para formar a região altamente dopada p^+ é o líquido tribrometo de boro (Nursman *et al.*, 2010). Porém, diferentes técnicas podem ser utilizadas para implementar a difusão de boro em lâminas de silício visando a redução do custo do processo. Um método, denominado de *spin-on*, consiste na deposição de líquido dopante com boro na superfície da lâmina e difusão em forno convencional (Zanescio e Moehlecke, 2012^a; Crestani *et al.*, 2017; Singha e Solanki, 2017). Este método produz dopagem com boa uniformidade (Taon, 1999). Ao comparar os parâmetros elétricos das células solares produzidas com BBr_3 e deposição do dopante por *spin-on*, para formar o emissor p^+ em células solares com estrutura p^+nn^+ , foi observado que a célula solar formada por BBr_3 apresentou eficiência inferior (Garcia *et al.*, 2018).

Com a possibilidade de passivação de ambas as superfícies das células solares bifaciais com tecnologia PERC, a passivação se tornou peça fundamental de estudo no desenvolvimento de células solares de alta eficiência. Foi constatado que a passivação é mais eficaz no emissor n^+ que na região p^+ dopada com boro e que para a região p^+ com maior dopagem, a passivação com SiO_2 é eficaz (Crestani *et al.*, 2017). As células solares apresentaram a eficiência de 16,0 %, representando um aumento de 1,2 % (absoluto) na eficiência em relação às células sem passivação com SiO_2 (Zanescio *et al.*, 2017).

A junção flutuante vem sendo estudada como forma de passivação, principalmente em superfícies p^+ (Moehlecke *et al.*, 1998^a). A junção flutuante é uma junção não contatada, que se comporta como uma junção iluminada em condições de circuito aberto (Moehlecke *et al.*, 1998^b). Para reduzir a recombinação dos portadores de carga moniritários em superfícies dopadas com boro, uma junção flutuante pode ser implementada na região p^+ , resultando na estrutura $(n)p^+nn^+$. Lopes *et al.* (2014) analisaram a influência da junção flutuante na superfície p^+ com a deposição de um líquido dopante, tipo n e observaram que apesar de comprovar a formação dessa junção, as células solares produzidas apresentaram baixa eficiência porque a célula apresentou uma baixa resistência em paralelo devido a correntes de fuga na região n sobre o emissor p^+ .

Em células solares bifaciais PERT base p, com estrutura n^+pp^+ , a eficiência medida com irradiância solar no campo retrodifusor (BSF – *back surface field*) de boro é baixa, em comparação ao valor medido com irradiância incidente no emissor de fósforo, devido ao baixo valor da corrente de curto-circuito (Moehlecke *et al.*, 1995). Portanto, para desenvolver uma célula solar bifacial PERT com alta eficiência nas duas faces, a passivação do BSF de boro é um desafio. Neste sentido, o objetivo desse artigo é analisar a formação da junção flutuante no campo retrodifusor de boro em células solares bifaciais PERT base p, com estrutura n^+pp^+ com diferentes resistências de folha do BSF de boro. Também foi avaliada a influência de ataque químico para aumentar a resistência de folha do BSF. Os dopantes foram depositados pelo método de *spin-on* para formar o campo retrodifusor de boro e a junção flutuante com fósforo.

2. METODOLOGIA

Para produzir as células solares bifaciais PERT, foram utilizadas lâminas de silício crescido pelo método Czochralski (Si-Cz), tipo p, grau solar, com 100 mm de diâmetro, espessura de $(200 \pm 30) \mu m$, orientação dos planos cristalinos $\{100\}$ e resistividade de base entre $1 \Omega \cdot cm$ e $20 \Omega \cdot cm$. O processo apresentado na Fig. 1, iniciou com a texturação das lâminas de silício em uma solução de hidróxido de potássio e álcool isopropílico, para formar micropirâmides e diminuir a reflexão. Na sequência, as lâminas de Si-Cz foram submetidas à limpeza química RCA (Kern, 1993) e na face posterior foi depositado por *spin-on* o líquido contendo boro (PBF20, da *Filmtronics*). A difusão de boro foi realizada em forno com tubo de quartzo para formar o campo retrodifusor p^+ e, na mesma etapa térmica, foi realizada a oxidação para proteger a face dopada com boro da difusão de fósforo. Foram produzidas lâminas de Si com BSF de boro com diferentes valores de resistência de folha de 28 a $55 \Omega/\square$. Em um grupo de células solares foi realizado um ataque químico, composto de água deionizada, ácido nítrico e ácido fluorídrico, na superfície dopada com boro para diminuir a dopagem na superfície e aumentar a resistência de folha. Após ataque em ácido fluorídrico e limpeza química RCA foi realizada a difusão de fósforo para formar o emissor n^+ (Zanescio e Moehlecke, 2015). O processo de difusão dos dopantes em ambas as faces com redução de etapas térmicas e limpezas químicas está sendo patenteado (Zanescio e Moehlecke, 2012^b).

O silicato de fósforo e de boro formados durante as difusões foram atacados e, após uma nova limpeza química RCA, foi implementada a junção flutuante no BSF de boro com deposição do líquido com fósforo (P507 da *Filmtronics*) por *spin-on* (Lopes *et al.*, 2014). Desta forma, formou-se uma fina camada homogênea do dopante sobre a superfície e realizou-se a difusão em forno com tubo de quartzo na temperatura de $845 \text{ }^\circ C$ durante 10 minutos. Após o ataque do silicato de fósforo e limpeza RCA, a oxidação seca foi realizada na temperatura de $800 \text{ }^\circ C$ durante 45 (Zanescio *et al.*, 2017).

O filme antirreflexo de TiO_2 foi depositado em ambas as faces por evaporação em alto vácuo com feixe de elétrons. Para produzir as células solares bifaciais foi depositada por serigrafia a malha metálica de Ag na face com o emissor e de Ag/Al na região do BSF e o processo de queima foi realizado em uma única etapa térmica. Na última etapa, as lâminas foram cortadas com radiação laser em células solares com $61,58 \text{ cm}^2$ de área. A estrutura das células solares bifaciais é mostrada na Fig. 2 (a).

Com este processo para comparação, também foram produzidas células solares bifaciais sem junção flutuante e com passivação com SiO_2 crescido por oxidação seca, como mostrado na Fig. 2 (b). Neste caso, a espessura da camada de SiO_2 no emissor e no campo retrodifusor de boro foi de 53 nm e de 10 nm, respectivamente (Zanescio *et al.*, 2017).

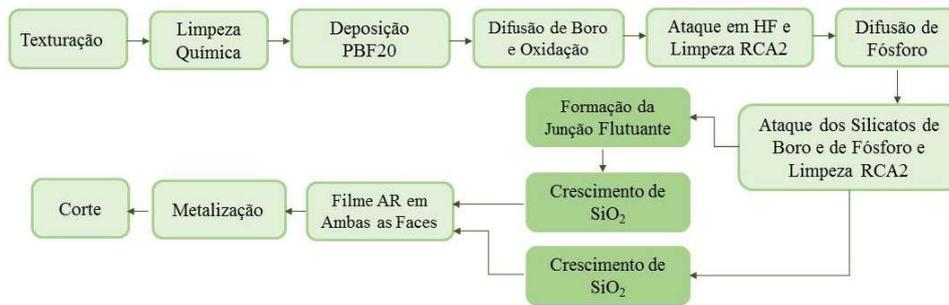


Figura 1 – Processo de fabricação de células solares bifaciais com passivação com crescimento de SiO₂ ou junção flutuante.

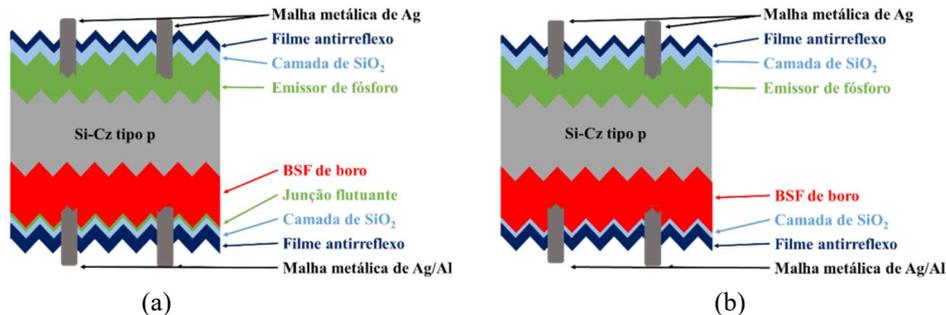


Figura 2 – Esquema com a estrutura das células solares bifaciais com (a) junção flutuante no campo retrodifusor de boro e passivação com dióxido de silício e (b) com apenas passivação com SiO₂.

Para caracterização das regiões altamente dopadas foi realizada a medição da resistência de folha do emissor de fósforo ($R_{\square P}$) e do campo retrodifusor de boro ($R_{\square B}$) em 13 regiões da lâmina de silício com o método denominado de “quatro-pontas” e foi calculada a média e o desvio padrão.

Após o processamento, todas as células solares bifaciais foram caracterizadas por meio da medição da corrente elétrica em função da tensão aplicada (curva I-V) com auxílio de um simulador solar, sob condições padrão de medição: temperatura da célula solar de 25 °C, irradiância de 1000 W/m² e espectro AM1,5G. Primeiramente, mediu-se a célula solar com incidência de irradiância solar no emissor de fósforo e em seguida com irradiância solar no campo retrodifusor de boro.

Para avaliar e comparar a passivação na superfície mediu-se a refletância e a resposta espectral com o equipamento PVE300, da empresa Bentham e calculou-se a eficiência quântica externa (EQE) das células solares. A resposta espectral foi medida na região sem malha metálica para desconsiderar o efeito desta na reflexão da superfície. A refletância média ponderada das células solares com maior eficiência foi calculada, considerando a refletância medida e a resposta espectral da célula solar (Zhao e Green, 1991). A largura das trilhas da malha metálica de prata e da malha de prata/alumínio foi avaliada no microscópio óptico BX51M, da marca Olympus.

Para comparar a eficiência das células solares bifaciais determinou-se a eficiência média ponderada, na qual se considera que a incidência de irradiância solar na face posterior é 20 % do valor que chega na face frontal (Yusufoglu *et al.* 2015). Considerou-se como face frontal, o lado da célula solar com maior eficiência, que neste caso foi a face com o emissor de fósforo. Portanto, a eficiência média ponderada foi determinada conforme a Eq. 1, onde $\eta_{emissor}$ e η_{BSF} são a eficiência com irradiância incidente no emissor de fósforo e no BSF de boro, respectivamente.

$$\eta_w = \frac{(\eta_{emissor} \cdot 1 + \eta_{BSF} \cdot 0,2)}{(1+0,2)} \quad (1)$$

3. RESULTADOS E ANÁLISES

3.1 Resistência de folha das regiões altamente dopadas

Na Tab. 1 apresentam-se os valores médios da resistência de folha do campo retrodifusor de boro ($R_{\square B}$) e do emissor de fósforo ($R_{\square P}$) de cada processo. As células solares do grupo A foram utilizadas como referência e foram passivadas por SiO₂ crescido com oxidação seca. A resistência de folha na região altamente dopada com boro e fósforo foram: $R_{\square B} = (44 \pm 3) \Omega/\square$ e $R_{\square P} = (62 \pm 2) \Omega/\square$. Nos dispositivos do grupo B, C e D, com resistência de folha do BSF de boro de (28 ± 2) a $(53 \pm 3) \Omega/\square$, foi implementada a junção flutuante. A resistência de folha do emissor variou de 56 a 64 Ω/\square .

Em uma lâminas de Si com $R_{\square B}$ de $(30 \pm 3) \Omega/\square$ foi realizado um ataque químico somente na superfície dopada com boro e aumentou-se a $R_{\square B}$ para $(44,5 \pm 0,9) \Omega/\square$, com a retirada da camada superficial. Os resultados são resumidos na Tab. 2. Nota-se que o desvio padrão da $R_{\square B}$ diminuiu com o ataque químico, indicando que a menor uniformidade da dopagem de boro ocorre principalmente na superfície.

Tabela 1 – Resistência de folha do campo retrodifusor de boro ($R_{\square B}$) e do emissor de fósforo ($R_{\square P}$) para cada grupo de células solares, antes da formação da junção flutuante.

Grupo	Célula	$R_{\square B}$ (Ω/\square)	$R_{\square P}$ (Ω/\square)
A	P1C12	44 ± 3	62 ± 2
	P1C15		
B	P7C11	28 ± 2	56 ± 6
	P7C12		
C	P12C13	39 ± 2	62 ± 3
	P12C17		
D	P9C9	53 ± 3	64 ± 3
	P9C10		

Tabela 2 – Resistência de folha do BSF de boro ($R_{\square B}$) antes e após o ataque químico para aumentar a resistência de folha e resistência de folha do emissor de fósforo ($R_{\square P}$) da célula solar do grupo E.

Grupo	Célula	Ataque	$R_{\square B}$ (Ω/\square)	$R_{\square P}$ (Ω/\square)
E	P8C12	Antes	30 ± 3	57 ± 2
		Depois	45 ± 1	

3.2 Comparação das características elétricas de células solares bifaciais

3.2.1 Características elétricas com irradiância no emissor de fósforo

A densidade de corrente de curto-circuito (J_{sc}), a tensão de circuito aberto (V_{oc}), o fator de forma (FF) e a eficiência (η) das células solares com irradiância incidente na face com o emissor de fósforo é mostrada na Tab. 3. Estes parâmetros elétricos são obtidos a partir da curva J-V, onde a densidade de corrente de curto-circuito é a razão da I_{sc} pela área da célula solar. As maiores eficiências das células solares de cada grupo são destacadas na Tab. 3. A eficiência média das células solares de referência, sem junção flutuante e com passivação com SiO_2 foi de (16,6 ± 0,5) %. Com a implementação da junção flutuante no BSF de boro, a eficiência diminuiu devido principalmente a redução na J_{sc} .

Comparando as células solares do grupo B, C e D, verifica-se que a eficiência diminuiu com o aumento da resistência de folha do campo retrodifusor de boro. Para as células solares do grupo B, com a menor $R_{\square B}$, observou-se um aumento da tensão de circuito aberto, que pode ser resultado do BSF mais profundo. Comparando as células solares do Grupo C com as de referência (grupo A), com $R_{\square B}$ similares, nota-se que a implementação da junção flutuante não melhorou os parâmetros elétricos. O fator de forma praticamente não foi afetado pela junção flutuante, porém a densidade de corrente de curto-circuito e a tensão de circuito aberto sofreram uma redução da ordem de 2 mA/cm² e 9 mV, respectivamente. A maior eficiência da célula solar com passivação com SiO_2 foi de 16,9 % enquanto que com junção flutuante no BSF de boro a eficiência alcançada foi de 15,9 %.

Tabela 3 - Parâmetros elétricos das células solares bifaciais com irradiância incidente no emissor de fósforo em função da resistência de folha do BSF de boro. Em destaque as células solares com maior eficiência.

	Grupo	$R_{\square B}$ (Ω/\square)	Célula	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF	η (%)
Sem junção flutuante	A	44 ± 3	P1C12	36,4	599,8	0,776	16,9
			P1C15	36,7	598,9	0,740	16,3
		Média		36,6 ± 0,3	599,4 ± 0,7	0,758 ± 0,025	16,6 ± 0,5
Com junção flutuante	B	28 ± 2	P7C11	34,6	605,5	0,759	15,9
			P7C12	34,4	600,0	0,748	15,4
		Média		34,5 ± 0,2	603 ± 4	0,754 ± 0,008	15,7 ± 0,4
Com junção flutuante	C	39 ± 2	P12C13	34,5	585,0	0,752	15,2
			P12C17	34,3	594,8	0,748	15,3
		Média		34,4 ± 0,1	590 ± 7	0,750 ± 0,003	15,2 ± 0,1
Com junção flutuante	D	53 ± 3	P9C9	35,0	576,9	0,722	14,6
			P9C10	35,2	582,9	0,748	15,4
		Média		35,1 ± 0,2	580 ± 4	0,735 ± 0,018	15,0 ± 0,4

A eficiência quântica externa (EQE) e a refletância das células solares com maior eficiência do grupo A, B, C e D são mostradas na Fig. 3 (a) e (b), respectivamente. Destaca-se que a EQE inclui as perdas ópticas como transmissão e reflexão, desconsiderando a malha metálica. Comparando a eficiência quântica externa observa-se uma redução para comprimentos de onda maiores que 800 nm somente para a célula solar com a menor resistência de folha do BSF. Esta redução indica que há uma elevada recombinação dos portadores de carga minoritários nesta região, devido a elevada dopagem com boro e, portanto, os portadores de carga minoritários recombinaem antes de chegar na superfície. A formação do campo retrodifusor mais profundo aumentou a tensão de circuito aberto, mas reduziu a EQE correspondente a esta região altamente dopada.

Em relação a formação da junção flutuante, não se observa uma influência na passivação da superfície com o BSF, independente da dopagem, pois para comprimentos de onda mais longos, a eficiência quântica externa é similar para as células solares dos grupos A, C e D. Portanto, a diferença na densidade de corrente de curto-circuito é devido a maior área recoberta pela malha metálica na face do emissor de fósforo, que aumenta a refletância bem como a maior refletância da dupla camada de $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$, como indica a Fig. 3 (b). A refletância média ponderada da célula solar do grupo A, de 2,9 %, foi menor que a refletância dos dispositivos do grupo B, C e D, que foi de 5,6 %, 4,8 % e 3,8 %, respectivamente. Na Fig. 4 compara-se a largura das trilhas metálicas das células solares e verifica-se que a largura das trilhas das células do grupo B e C (da ordem de 140 – 150 μm) é maior que as do grupo A (aproximadamente 120 μm), fato que contribui para a menor J_{SC} .

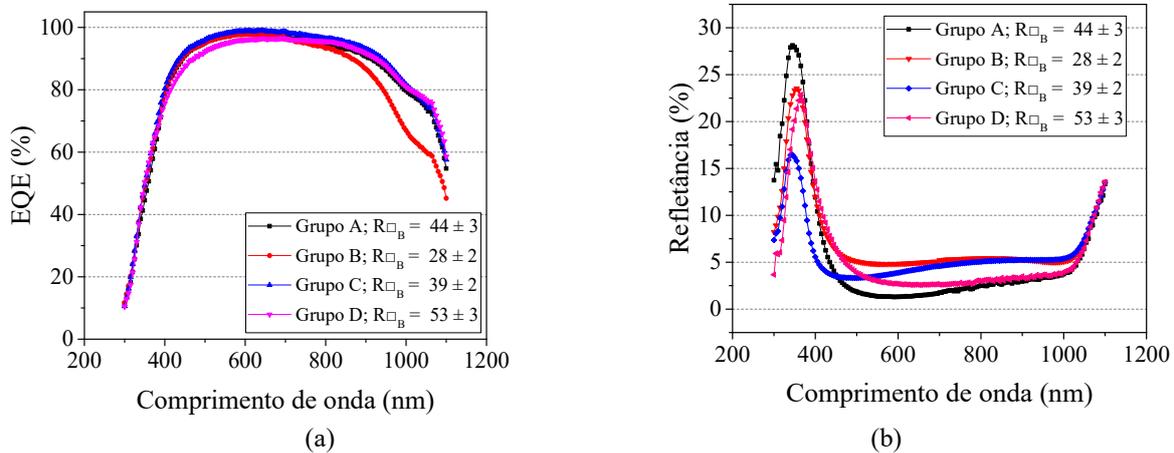


Figura 3 – Eficiência quântica (a) externa e (b) refletância das células solares, com e sem junção flutuante, com maior eficiência e irradiância incidente na face com o emissor.

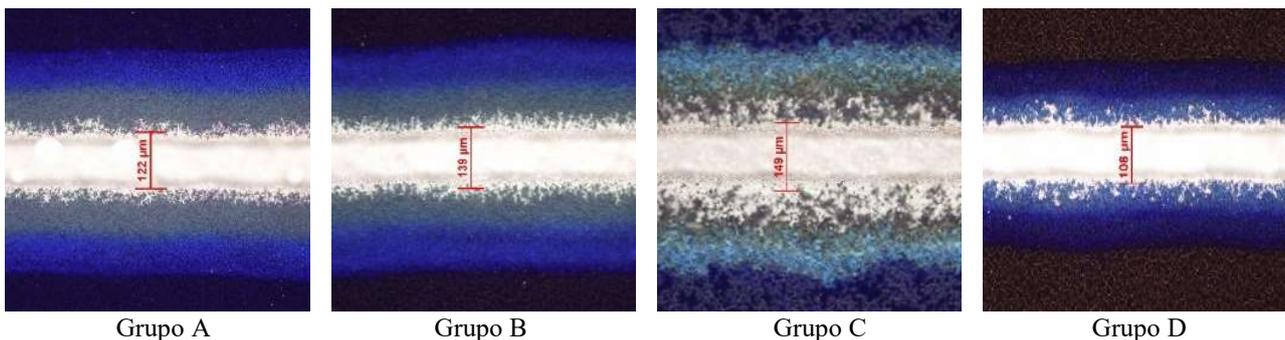


Figura 4 – Comparação da largura (L) das trilhas de pasta condutiva de Ag formadas no emissor de fósforo das células solares do grupo A ($L = 122 \mu\text{m}$, $h = 25 \mu\text{m}$), B ($L = 139 \mu\text{m}$, $h = 26 \mu\text{m}$), C ($L = 149 \mu\text{m}$, $h = 27 \mu\text{m}$) e D ($L = 108 \mu\text{m}$, $h = 30 \mu\text{m}$).

3.2.2 Características elétricas com irradiância no campo retrodifusor de boro

Na Tab. 4 apresentam-se os parâmetros elétricos das células solares bifaciais obtidos com irradiância incidente no BSF de boro em função da resistência de folha desta região altamente dopada. As maiores eficiências de cada grupo de células solares estão em destaque na Tab. 4. Novamente, observa-se que a densidade de corrente de curto-circuito e a tensão de circuito aberto foram menores nas células solares com junção flutuante. Comparando os parâmetros elétricos médios do grupo A e do grupo C mostrados na Tab. 4 com aqueles apresentados na Tab. 3, verifica-se que a redução na J_{SC} e V_{OC} foi maior, de aproximadamente 5 mA/cm^2 e 17 mV, quando a medição foi realizada na face com o BSF de boro. As células solares com $R_{\square} = 53 \Omega/\square$ apresentaram o menor fator de forma médio, indicando que este valor da resistência de folha é alto e pode aumentar a resistência de contato das trilhas metálicas de Ag/Al. A maior eficiência da célula solar do grupo C, com junção flutuante e resistência de folha similar aos dispositivos do grupo A, foi de 9,6 %. Este valor é da ordem de 2 % (absoluto) menor que a maior eficiência, de 11,9 %, das células solares com passivação somente com SiO_2 . Este resultado pode ser devido à formação da junção flutuante ou à degradação do substrato de silício grau solar por ser submetido a mais uma etapa térmica em alta temperatura para a formação da junção flutuante.

O menor valor médio da densidade de corrente de curto-circuito foi medido nas células solares do grupo B, com menor resistência de folha do BSF de boro, devido a alta recombinação dos minoritários nesta região. Este resultado é confirmado pela menor eficiência quântica externa da célula solar com menor resistência de folha do campo retrodifusor em todos os comprimentos de onda, como mostra a Fig 5 (a). Comparando as células solares com resistência de folha similar (grupo A e grupo C) nota-se que a EQE da célula solar com junção flutuante é maior em comprimentos de onda menores que 400 nm, indicando que o método de passivação proposto contribuiu na passivação da superfície altamente

dopada com boro. O dispositivo do grupo C possui $J_{SC} = 20,2 \text{ mA/cm}^2$, que é menor que a J_{SC} de $26,1 \text{ mA/cm}^2$ do dispositivo do grupo A, devido a menor EQE da célula solar do grupo C. Este resultado também é afetado pela maior refletância, como mostra a Fig. 5 (b). Neste caso, a refletância média ponderada foi de 3,1 %, 5,7 %, 4,9 % e 6,1 % para as células solares do grupo A, B, C e D, respectivamente. Portanto, em média, a refletância das células solares com junção flutuante é maior, pois se depositou o mesmo filme de TiO_2 que no emissor, porém a espessura da camada de SiO_2 foi maior, pois a taxa de crescimento do dióxido de silício é maior em superfícies dopadas com fósforo do que dopadas com boro (Ho e Plummer, 1979). Neste caso, a largura das trilhas da malha de Ag/Al foi similar, da ordem de 130 – 140 μm para as células solares dos grupos avaliados, como mostra a Fig. 6.

Tabela 4 - Parâmetros elétricos das células solares bifaciais com e sem junção flutuante em função da resistência de folha do BSF de boro e irradiância incidente no BSF de boro. Em destaque as células solares com maior eficiência.

	Grupo	$R_{\square B}(\Omega/\square)$	Célula	$J_{SC} \text{ (mA/cm}^2\text{)}$	$V_{oc} \text{ (mV)}$	FF	$\eta \text{ (%)}$
Sem junção flutuante	A	44 ± 3	P1C12	25,2	594,6	0,767	11,5
			P1C15	26,1	595,7	0,765	11,9
		Média		$25,6 \pm 0,6$	$595,2 \pm 0,8$	$0,766 \pm 0,002$	$11,7 \pm 0,3$
Com junção flutuante	B	28 ± 2	P7C11	15,6	585,2	0,758	6,9
			P7C12	13,6	574,4	0,712	5,6
		Média		$14,6 \pm 1,4$	580 ± 8	$0,74 \pm 0,03$	$6,2 \pm 1,0$
	C	39 ± 2	P12C13	19,5	572,5	0,761	8,5
			P12C17	22,0	584,4	0,748	9,6
		Média		$20,8 \pm 1,8$	579 ± 8	$0,755 \pm 0,009$	$9,1 \pm 0,8$
D	53 ± 3	P9C9	17,6	559,3	0,696	6,9	
		P9C10	20,2	571,1	0,741	8,6	
	Média		$18,9 \pm 1,8$	565 ± 8	$0,72 \pm 0,03$	$7,8 \pm 1,2$	

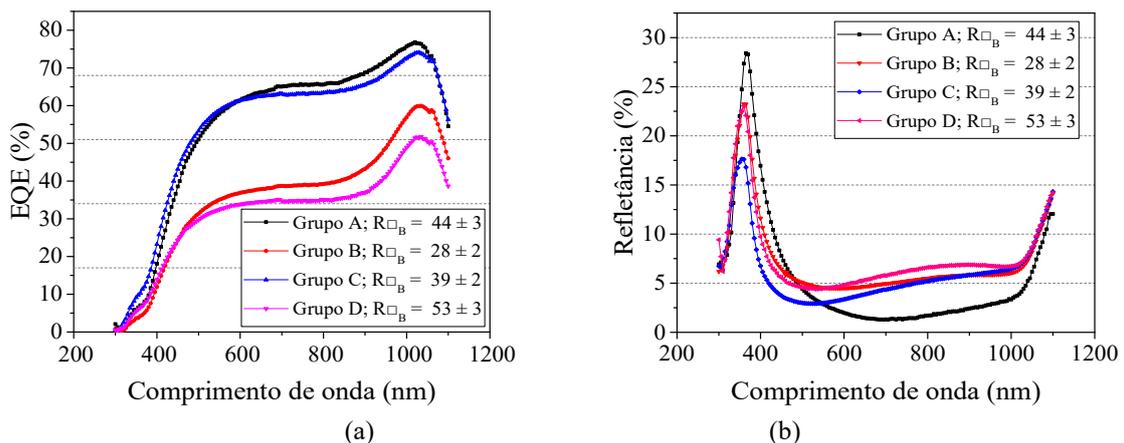


Figura 5 – (a) Eficiência quântica externa e (b) refletância das células solares, com e sem junção flutuante, com maior eficiência e irradiância incidente na face com o campo retrodifusor de boro.

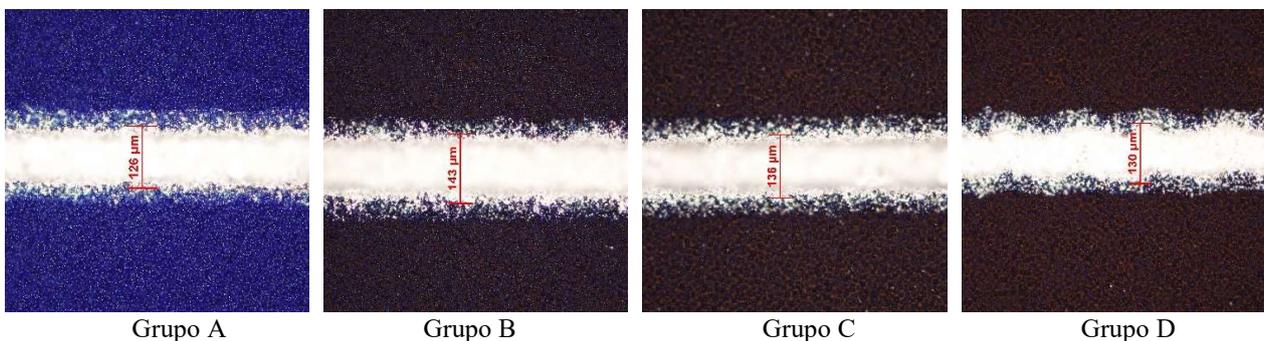


Figura 6 – Comparação da largura das trilhas de pasta condutiva de Ag/Al formadas no campo retrodifusor de boro das células solares do grupo A ($L = 126 \mu\text{m}$, $h = 24 \mu\text{m}$), B ($L = 143 \mu\text{m}$, $h = 22 \mu\text{m}$), C ($L = 136 \mu\text{m}$, $h = 29 \mu\text{m}$) e D ($L = 130 \mu\text{m}$, $h = 25 \mu\text{m}$).

3.2.3 Comparação dos parâmetros elétricos e da eficiência média ponderada

Na Tab. 5 comparam-se as eficiências médias ponderadas das células com e sem junção flutuante em função da resistência de folha do BSF de boro. Para todos os grupos de células solares, observa-se que a eficiência das células solares com irradiância incidente no campo retrodifusor é menor que a eficiência no emissor de fósforo, devido a redução

na tensão de circuito aberto e, principalmente, na densidade de corrente de curto-circuito. Comparando estes parâmetros elétricos apresentados na Tab. 3 e Tab. 4 e as curvas J-V mostradas na Fig. 7, nota-se que nas células solares com junção flutuante a J_{SC} descreceu de 34 - 35 mA/cm² para 14 - 21 mA/cm². Nos dispositivos passivados somente com dióxido de silício, a redução foi um pouco menor. Neste caso, a densidade de corrente de curto-circuito diminuiu de 36,6 mA/cm² para 25,6 mA/cm². Nas células solares com junção flutuante a redução da tensão de circuito aberto foi de 603 – 580 mV para 580 – 565 mV. Nos dispositivos sem junção flutuante a redução na V_{OC} foi da ordem de 4 mV. Estes resultados estão relacionados com a alta recombinação dos portadores de carga minoritários na região altamente dopada pp⁺ (Moehlecke *et al.*, 1995) e ocorrem nas células solares com junção flutuante e sem junção flutuante. Como consequência, a eficiência média ponderada (η_w) da célula solar com maior eficiência sem junção flutuante foi de 15,8 % enquanto que a η_w das células solares com junção flutuante foi menor, de 14,2 %. Da Tab. 5, observa-se que as células solares com junção flutuante que resultaram na maior eficiência média ponderada são do grupo C, com resistência de folha da ordem de 40 Ω/\square e apresentaram a maior eficiência no campo retrodifusor de boro.

Tabela 5 – Eficiência média ponderada (η_w) das células solares bifaciais, com e sem junção flutuante, em função da resistência de folha do BSF de boro. As maiores eficiências de cada grupo estão destacadas.

	Grupo	$R_{\square B}(\Omega/\square)$	Célula	$\eta_{emissor} (\%)$	$\eta_{BSF} (\%)$	$\eta_w (\%)$
Sem junção flutuante	A	44 ± 3	P1C12	16,9	11,5	16,0
			P1C15	16,3	11,9	15,6
	Média		16,6 ± 0,5	11,7 ± 0,3	15,8 ± 0,2	
Com junção flutuante	B	28 ± 2	P7C11	15,9	6,9	14,4
			P7C12	15,4	5,6	13,8
	Média		15,7 ± 0,4	6,2 ± 1,0	14,1 ± 0,3	
Com junção flutuante	C	39 ± 2	P12C13	15,2	8,5	14,1
			P12C17	15,3	9,6	14,3
	Média		15,2 ± 0,1	9,0 ± 0,8	14,2 ± 0,1	
Com junção flutuante	D	53 ± 3	P9C9	14,6	6,9	13,3
			P9C10	15,4	8,6	14,2
	Média		15,0 ± 0,4	7,8 ± 1,2	13,8 ± 0,5	

Comparando as Fig. 7 (a) e Fig. 7 (b) verifica-se que as curvas J-V das células solares com maior eficiência de cada grupo, medidas com irradiância no emissor são mais similares do que as obtidas com iluminação no campo retrodifusor, devido a menor variação na densidade de corrente de curto-circuito. A variação da J_{SC} mostrada na Fig. 7 (b) deve-se principalmente às diferentes dopagem do BSF de boro. Porém, a J_{SC} medida no campo retrodifusor é 35 % e 31 % menor que a medida no emissor para dispositivos com e sem junção flutuante, respectivamente. Também se pode verificar que a formação da junção flutuante reduz a densidade de corrente de curto-circuito quando a célula solar bifacial é medida com irradiância no campo retrodifusor, como mostra a Fig. 7 (b).

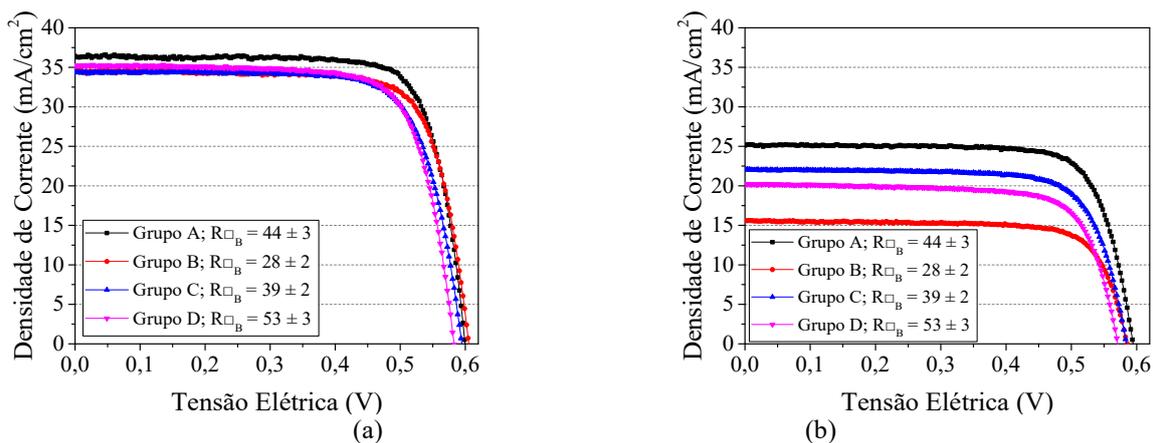


Figura 7 - Curva J-V das células solares com maior eficiência com e sem junção flutuante medida na face: (a) com emissor de fósforo e (b) com BSF de boro.

Na Fig. 8 compara-se a eficiência média no emissor e no campo retrodifusor bem como a eficiência média ponderada em função da resistência de folha do BSF de boro. Nota-se que a eficiência média ponderada tende a descrecer com o aumento da resistência de folha do campo retrodifusor, sendo afetada principalmente pela eficiência no emissor. Também se pode verificar que a eficiência no BSF (7,7 %) é, em média, a metade da eficiência no emissor (15,3 %). Este fato está associado a alta recombinação dos portadores de carga minoritários na região altamente dopada pp⁺ (Moehlecke *et al.*, 1995). Portanto, produzir a região altamente dopada pp⁺ com qualidade é um desafio.

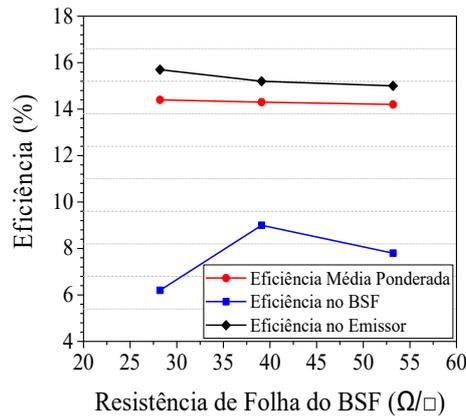


Figura 8 – Eficiência média ponderada e eficiência média das células solares bifaciais com irradiância incidente no emissor de fósforo e no campo retrodifusor em função da resistência de folha do BSF de boro.

3.3 Influência do ataque químico superficial no campo retrodifusor

O ataque químico foi realizado apenas na face com campo retrodifusor de boro para aumentar o valor da resistência de folha de $(30 \pm 3) \Omega/\square$ para $(44,5 \pm 0,9) \Omega/\square$. Na Tabela 6, apresentam-se os parâmetros elétricos das células solares com junção flutuante e, com e sem ataque químico para aumento da resistência de folha. Nota-se que o aumento da $R_{\square B}$ obtido por ataque químico reduziu, da ordem de 0,5 % (absoluto), a eficiência da célula solar quando foi iluminada pelo emissor de fósforo. Como mostra a Fig. 9, a eficiência quântica externa diminuiu em comprimentos de onda maiores que 800 nm, ou seja, na região em que foi implementado o ataque químico. Uma possibilidade é que o processo do ataque químico tenha contaminado a superfície.

Tabela 6 - Parâmetros elétricos das células solares bifaciais com irradiância incidente no emissor de fósforo com e sem ataque químico para aumentar a resistência de folha do campo retrodifusor.

	Grupo	$R_{\square B}(\Omega/\square)$	Célula	$J_{SC} (mA/cm^2)$	$V_{oc} (mV)$	FF	$\eta (%)$
Sem ataque	B	28 ± 2	P7C11	34,7	605,5	0,759	15,9
			P7C12	34,4	600,0	0,748	15,4
			Média	$34,5 \pm 0,2$	$602,8 \pm 3,9$	$0,734 \pm 0,008$	$15,7 \pm 0,4$
Com ataque	E	45 ± 1	P8C12	34,3	598,5	0,733	15,1

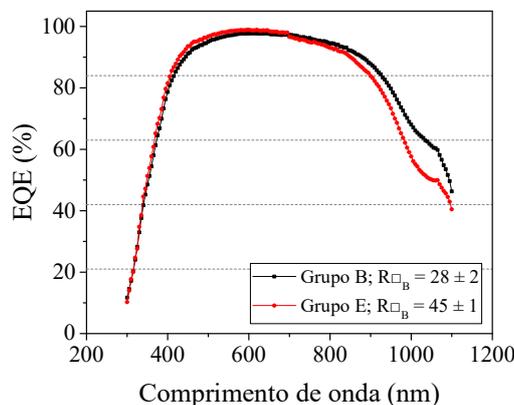


Figura 9 – Eficiência quântica externa das células solares com maior eficiência medida, irradiância incidente no emissor e com e sem ataque químico para aumento da resistência de folha do campo retrodifusor.

Os parâmetros elétricos das células solares com e sem ataque químico e com irradiância incidente no BSF de boro são apresentadas na Tab. 7. Novamente, verifica-se que a retirada da camada superficial do campo retrodifusor de boro para aumentar a resistência de folha reduziu a eficiência da célula. A J_{SC} foi o parâmetro elétrico que sofreu a maior redução. O valor médio da J_{SC} das células sem ataque químico foi de $(14,6 \pm 1,0) mA/cm^2$ e para a célula submetida ao ataque químico a J_{SC} foi de $10,4 mA/cm^2$, pois a eficiência quântica externa foi menor em todos os comprimentos de onda, como mostra a Fig. 10 (a). Os menores valores da EQE indicam que o tempo de vida dos portadores de carga minoritários na base é baixo e afetou a densidade de corrente de curto-circuito, pois a refletância é similar nos dois dispositivos, como ilustra a Fig. 10 (b). Com o ataque químico a eficiência média ponderada caiu de 14,1 % para 13,3 %. Portanto, o ataque químico no BSF de boro não contribuiu para melhorar a eficiência das células solares com junção flutuante nesta região.

Tabela 7 - Parâmetros elétricos das células solares bifaciais com e sem ataque químico para aumentar a resistência de folha do campo retrodifusor e irradiância incidente no BSF de boro.

	Grupo	$R_{\square B}(\Omega/\square)$	Célula	$J_{sc} (mA/cm^2)$	$V_{oc} (mV)$	FF	$\eta (%)$
Sem Ataque	B	28 ± 2	P7C11	15,6	585,2	0,758	6,9
			P7C12	13,6	574,4	0,712	5,6
		Média		$14,6 \pm 1,0$	$579,8 \pm 7,6$	$0,735 \pm 0,033$	$6,3 \pm 0,9$
Com Ataque	E	45 ± 1	P8C12	10,4	567,8	0,750	4,4

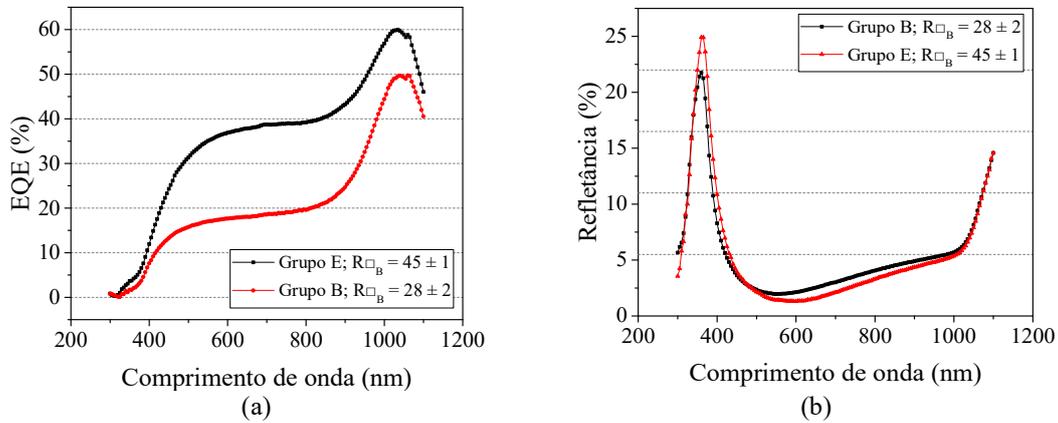


Figura 10 – (a) Eficiência quântica interna e (b) refletância das células solares com maior eficiência e com e sem ataque químico para aumentar a resistência de folha do campo retrodifusor, medidas com incidência de irradiância no BSF.

4. CONCLUSÕES

Nas células solares bifaciais PERT base p com junção flutuante no campo retrodifusor de boro constatou-se que a eficiência diminuiu com o aumento da resistência de folha do BSF de boro de (28 ± 2) a $(53 \pm 3) \Omega/\square$, quando os dispositivos foram iluminados no emissor. Também se constatou que a formação da junção flutuante não melhorou os parâmetros elétricos das células solares. O fator de forma praticamente não foi afetado pela junção flutuante, porém a densidade de corrente de curto-circuito e a tensão de circuito aberto diminuíram. Pela análise da eficiência quântica externa, verificou-se que a junção flutuante não afetou a passivação da superfície com o BSF, independente da dopagem. A maior eficiência da célula solar com passivação com SiO_2 foi de 16,9 % enquanto que com junção flutuante no BSF de boro a eficiência alcançada foi de 15,9 %.

Quando as células solares foram caracterizadas com irradiância no campo retrodifusor de boro, novamente observou-se que a densidade de corrente de curto-circuito e a tensão de circuito aberto foram menores nas células solares com junção flutuante, porém a redução na J_{sc} e V_{oc} foi maior, do que quando a medição foi realizada no emissor. A maior eficiência da célula solar com junção flutuante foi da ordem de 2 % (absoluto) menor que a maior eficiência das células solares com passivação somente com SiO_2 . Este resultado foi influenciado pela degradação do substrato de silício grau solar por ser submetido a mais uma etapa térmica em alta temperatura para a formação da junção flutuante. Verificou-se que a junção flutuante passivou a superfície dopada com boro a partir da eficiência quântica externa, que apresentou maiores valores em comprimentos de onda menores que 400 nm. Em média, a refletância das células solares com junção flutuante foi maior, por causa da maior espessura da camada de passivação de SiO_2 .

Constatou-se que a eficiência das células solares com irradiância incidente no campo retrodifusor é menor que a eficiência no emissor de fósforo, devido a redução na tensão de circuito aberto e, principalmente, na densidade de corrente de curto-circuito. Este resultado é consequência da alta recombinação dos portadores de carga minoritários na região altamente dopada pp^+ . A eficiência média ponderada da célula solar com maior eficiência sem junção flutuante foi de 15,8 % enquanto que a η_w das células solares com junção flutuante foi de 14,2 %.

Das curvas J-V das células solares com maior eficiência verificou-se que estas são mais parecidas quando medidas com irradiância no emissor, devido a menor variação na densidade de corrente de curto-circuito. A J_{sc} medida no campo retrodifusor é 35 % e 31 % menor que a medida no emissor para dispositivos com e sem junção flutuante, respectivamente. Portanto, a junção flutuante tende a reduzir a densidade de corrente de curto-circuito no campo retrodifusor.

A eficiência média ponderada tende a decrescer com o aumento da resistência de folha do campo retrodifusor, e a eficiência no BSF (7,7 %) é, em média, a metade da eficiência no emissor (15,3 %). O ataque químico superficial para aumentar a resistência de folha do campo retrodifusor reduziu a eficiência da célula solar em ambas as faces e a eficiência média ponderada caiu de 14,1 % para 13,3 %.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS

- Appelbaum, J., 2016. Bifacial photovoltaic panels field. *Renewable Energy*, v. 85, p. 338-343. [http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.050]
- Blakers, A.W., Wang, A., Milne A.M., Zhao, J., Green, M.A., 1989. 22.8 % Efficient Silicon Solar Cell, *Applied Physics Letter*, 55, 1363 - 1365.
- Crestani, T., Zanesco, I., Moehlecke, A. 2017. Influência da Passivação em Células Solares de Silício com Campo Retrodifusor Seletivo de Alumínio e Boro. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, São Paulo, v. 14, n. 3, p. 236-242.
- Garcia, S. B., Moehlecke, A., Zanesco, I. 2018. Análise de Células Solares $p^{+}nn^{+}$ em Silício Grau Solar com Emissor Obtido por BBr_3 . In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, p.1-10.
- Green, M. A., 2015. The passivated emitter and rear cell (PERC): From conception to mass production, *Solar Energy Materials and Solar Cells*. v.143, p. 190-197.
- Ho, C.P., Plummer, J.D. Si/SiO₂ interface oxidation kinetics: A physical model for the influence of high substrate doping levels. *Journal of the Electrochemical Society*, v. 126, n. 9, pp.1523-1530, Jan. 1979.
- ITRPV – International Technology Roadmap for Photovoltaic – 12 Edition, April 2021. Disponível em: <https://itrvp.vdma.org/>. Acesso em maio 2021.
- Kern, W., 1993. *Handbook of semiconductor wafer cleaning technology*, New Jersey, Noyes Publications, 634 p.
- Lopes, N. F., Moehlecke, A., Zanesco, I., 2014. Análise da implementação de junção flutuante frontal em células solares $p^{+}nn^{+}$ industriais. In: V Congresso Brasileiro de Energia Solar, Recife. V Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2014.
- Moehlecke, A., Zanesco, I., Luque, A. 1994. Practical High Efficiency Bifacial Solar Cells. In: IEEE 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Waikoloa, HI, v. 2, p. 1663-1666.
- Moehlecke, A., Zanesco, I., Cañizo, C. del., Luque, A. 1995. Experimental Comparison Between p and n Bases for Bifacial Solar Cells. In: 13th Europeans Photovoltaic Solar Energy Conference, Nice, França, p. 1242-1245.
- Moehlecke, A., Zanesco, I., Cañizo, C. del., Luque, A. 1998^a. Stability Problems in (n) $p^{+}nn^{+}$ Silicon Solar Cells. In: 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, Austria, p. 1386-1389.
- Moehlecke, A., Cañizo, C. del, Zanesco, I., Luque, A. 1998^b. Floating Junction Passivation Of p^{+} Emitters. In: 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, Austria, p. 1551-1554.
- Nursam, N.M., Ren, Y., Weber, K.J. 2010. PECVD silicon nitride passivation on boron emitter: the analysis of electrostatic charge on the interface properties, *Adv. Optoelectron.* (487406), 1–8. DOI: 10.1155/2010/487406.
- Singha, B., Solanki, C. S. 2017. Boron-rich layer properties formed by boron spin on dopant diffusion in n-type silicon. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 57, 83-89. DOI: 10.1016/j.mssp.2016.09.034.
- Taon, N.N. (1999). Spin on Glass Materials and Applications in Advanced IC Technologies (Ph.D. thesis), International training Institute for Materials Science (ITIMS), Hanoi, Vietnam.
- Yusufoglu, U. A., Pletzer, T. M., Koduvelikulathu, L. J., Comparotto, C., Kopecek, R., Kurz, H. Analysis of the annual performance of bifacial modules and optimization methods. *IEEE Journal of Photovoltaics*, v. 5, n. 1, p. 320-328, 2015.
- Zhao J., Green M., 1991. Optimized antireflection coatings for high-efficiency silicon solar cells. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 38(8), 1925-1934.
- Zanesco, I., Moehlecke, A. 2012^a. Desenvolvimento de tecnologias industriais de fabricação de células solares e módulos fotovoltaicos. Relatório Final de Projeto FINEP, Convênio FINEP 01.080635.00, ref 1359/08.
- Zanesco, I., Moehlecke, A., 2012^b. Processo de difusão de dopantes em lâminas de silício para a fabricação de células solares, BR Patent PI12 030 606, BR 10 2012 030 606 9.
- Zanesco, I., Moehlecke, A., 2015. Células Solares de Alta Eficiência com Emissores Seletivos. Relatório Final de Projeto de P&D, Convênio CEEE-D nº 9942400, 210 p.
- Zanesco, I., Razera, R. A. Z., Moehlecke, A. 2017. Análise da passivação com SiO₂ na face posterior e frontal de células solares com campo retrodifusor seletivo. *Revista Matéria* [10.1590/S1517-707620170005.0260].

ANALYSIS OF THE FLOATING JUNCTION FORMED IN THE BORON BACK SURFACE FIELD IN PERT BIFACIAL SOLAR CELLS

Abstract. Bifacial solar cells convert the solar irradiance on both faces and the PERC configurations have the potential to increase the efficiency due to passivation of both faces. In p-type devices, the passivation of the boron back surface field (BSF) is a challenge. An alternative to the conventional passivation methods is the floating junction. The goal of this paper is to analyze the floating junction formed in the boron surface field of p-type PERT bifacial solar cells, with different BSF sheet resistances. The dopants were deposited by the spin-on method to form the BSF and the floating junction. The efficiency in the emitter decreased with the increasing of the boron-BSF sheet resistance from (28 ± 2) to $(53 \pm 3) \Omega/\square$ and the floating junction did not improve the electrical parameters. The highest efficiency of the solar cell with only SiO₂ passivation was 16.9 % and with floating junction the efficiency reached was 15.9 %. With irradiance on the BSF, the reduction of the short circuit current density (J_{sc}) and open circuit voltage increased in the floating junction solar cells. However, the quantum efficiency shows that the floating junction passivated the boron-doped surface, but the solar grade

silicon substrate probably degraded with the thermal step to form the floating junction. The efficiency with irradiance on the BSF was lower than the emitter efficiency for devices with and without floating junction. The weighted average efficiency of solar cell without and with floating junction was 15.8 % and 14.2 %, respectively. The surface chemical etch-back to increase the BSF sheet resistance reduced the solar cell efficiency on both sides.

Keywords: *Solar Cells, Back Surface Field, Floating Junction.*