

INFLUÊNCIA DO EMISSOR PRODUZIDO COM REDUÇÃO DE ETAPAS TÉRMICAS NOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DE CÉLULAS SOLARES BIFACIAIS BASE N

Izete Zanesco – izete@puhrs.br

Fábio André Biazetto – fabio.biazetto@edu.puhrs.br

Andrielen Braz Vanzetto – andrielen.vanzetto@edu.puhrs.br

Augusto dos Santos Kochenborger – augustokochen@gmail.com

Estéfane Pereira dos Reis – estefane.reis@edu.puhrs.br

Adriano Moehlecke – moehleck@puhrs.br

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

Resumo. As células solares bifaciais fabricadas em lâminas de silício cristalino tipo n apresentam potencial de obtenção de maior eficiência e bifacialidade próxima a um. Com este foco, o objetivo deste artigo é analisar a influência do método de formação do emissor produzido na mesma etapa térmica que o campo retrodifusor nos parâmetros elétricos de células solares bifaciais base n com estrutura PERT e passivação das superfícies com SiO₂. Foi utilizado o método de spin-on e a difusão do boro foi realizada em forno convencional, seguida da difusão do fósforo com POCl₃. Variou-se a temperatura de difusão de boro e analisou-se a resistência de folha do emissor e do campo retrodifusor dopado com fósforo bem como a influência nos parâmetros elétricos das células solares bifaciais. Verificou-se que a resistência de folha do emissor de boro diminuiu de $(116 \pm 6) \Omega/\text{sq}$ para $(64 \pm 2) \Omega/\text{sq}$ com o aumento da temperatura de difusão de boro de 940 °C a 980 °C. Porém, a resistência de folha do campo retrodifusor de fósforo aumentou, indicando que a difusão de boro afeta a região dopada com fósforo. As maiores eficiências, de 15,3% e 15,5 % com irradiância no emissor e campo retrodifusor, respectivamente, foi alcançada com a temperatura de difusão de 960 °C. Neste dispositivo, a bifacialidade foi de 0,987. Constatou-se que a tensão de circuito aberto foi maior com irradiância no emissor, independente da temperatura de processamento. Também se concluiu que a tensão de circuito aberto e o fator de forma cresceram até a temperatura de processamento de 960 °C, independente do modo de iluminação. Porém, a densidade de corrente de curto-circuito com irradiância no emissor tendeu a diminuir, devido ao aumento da recombinação dos portadores de carga minoritários. O fator de forma foi o parâmetro elétrico que mais influenciou na eficiência.

Palavras-chave: Células solares bifaciais, Estrutura PERT base n, Redução de etapas térmicas

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO

Na última década constatou-se um aumento da demanda por células solares de alta eficiência e passíveis de fabricação em massa a medida em que o mercado cresceu. O aumento da eficiência está sendo alcançado por meio de melhorias incrementais e com diferentes ou novas estruturas de células solares. Dentre estas, a célula solar com emissor e face posterior passivadas (PERC – *passivated emitter and rear cell*) tem se destacado na produção industrial por resultar em alta eficiência e robustez (Sugiura *et al.*, 2020). Uma das características da configuração PERC é a redução da recombinação dos portadores de carga minoritários na superfície posterior proporcionada pela passivação e a redução da área de contato metal/semicondutor. Cabe lembrar que o conceito do dispositivo PERC foi proposto nos anos 80, porém a produção industrial iniciou em 2014 e está dominando o mercado (Green, 2015; Boukourt e Hadri, 2019). Atualmente, as células solares de silício cristalino representam aproximadamente 90% do mercado mundial e a eficiência alcançada é de 26,7 % (Green *et al.*, 2021). Em 2020, as estruturas da configuração PERC representaram 80 % do mercado de células solares (ITRPV, 2021).

Dentre as estruturas da família PERC, a célula solar com emissor passivado e região posterior totalmente difundida (PERT – *passivated emitter and rear totally diffused*) é a mais viável para produção em escala de dispositivos bifaciais (Yin *et al.*, 2020). Por outro lado, os dispositivos bifaciais base n podem apresentar bifacialidade próxima a um (Biazetto, 2019; Xia *et al.*, 2020), ou seja, eficiência similar quando a irradiância incide na face frontal e na face posterior. A principal vantagem das células solares fabricadas em lâminas de silício tipo n, dopadas com fósforo, é o potencial de obtenção de maior eficiência, quando comparadas às de base p, devido ao maior valor do tempo de vida dos portadores de carga minoritários. Nos últimos anos, a produção industrial de células base n está crescendo. Em 2020, o mercado relativo à dispositivos base n foi da ordem de 6 % a 7 % e a previsão é que aumente para 40 % em uma década. No entanto, quase 30% do mercado foi suprido com células solares bifaciais (ITRPV, 2021).

Para produzir a célula solar PERT base n, ou seja, com estrutura p⁺nn⁺, é necessária a difusão de fósforo em uma face e de boro na outra face. Nestes dispositivos, o emissor é formado pela difusão de boro e o campo retrodifusor (BSF

– *back surface field*) pela difusão de fósforo, sendo necessária a passivação nas duas faces. Em células solares bifaciais base n com estrutura PERT foi alcançada a eficiência de 21,4 % na face frontal (Yan *et al.*, 2019). Ding *et al.* (2019) alcançaram a eficiência de 21,1 % na face frontal de dispositivos PERT base n com passivação dos contatos produzida por nanocamadas de SiO_x e de polisilício dopado com fósforo. A eficiência de 22 % (Yin *et al.*, 2020) foi obtida em dispositivos PERT com campo retrodifusor frontal seletivo formado pela difusão convencional de fósforo e radiação laser. Com inovação na passivação e na formação do emissor de boro, Chen *et al.* (2020) desenvolveram uma célula solar bifacial base n com eficiência de 24,6 % com irradiância no emissor e de 19,5 % no campo retrodifusor. Em Si-Cz, tipo n grau solar, foi obtida a eficiência de 15,5% com iluminação na face com o emissor e de 16,6 % na face com o campo retrodifusor (Biazetto, 2019).

A passivação das superfícies pode ser implementada com diferentes filmes finos, tais como nitreto de silício, dióxido de silício, dióxido de titânio, óxido de alumínio, entre outros (Boukourt e Hadri, 2019). A passivação do emissor n^+ com nitreto de silício é o principal método utilizado pela indústria e proporciona uma interface com cargas elétricas positivas, formando a passivação com efeito de campo elétrico. O óxido de alumínio é usualmente utilizado para a passivação da superfície na região p^+ porque apresenta alta densidade de cargas elétricas negativas. O dióxido de titânio pode não proporcionar suficiente passivação, mas é usado para formar o filme antirreflexo, pois apresenta baixa absorção em comprimentos de onda curtos e tem alto índice de refração. Este material é mais eficaz para passivar superfícies dopadas com boro, mas a técnica da deposição influencia na passivação (Bonilla *et al.*, 2017).

Na estrutura PERC os materiais mais utilizados para a passivação das superfícies em células solares são o nitreto de silício e o dióxido de silício. No entanto, a técnica mais efetiva para passivar as superfícies de lâminas de Si é o dióxido de silício crescido termicamente. Porém, este material tem um baixo índice de refração e, conseqüentemente, não é indicado para formar o filme antirreflexo (Glunz e Feldmann, 2018; Green, 2009). Desta maneira, o SiO_2 geralmente é usado em combinação com outras camadas dielétricas para formar o filme antirreflexo (Huang *et al.*, 2018; Zanesco e Moehlecke, 2015^a; Zanesco *et al.*, 2018). Camadas de óxido de silício ultrafino também estão sendo estudadas para passivação dos contatos com polisilício (Huang *et al.*, 2020; Ding *et al.*, 2019).

O emissor em lâminas de Si tipo n pode ser formado por meio de diferentes processos, como difusão de boro em forno de quartzo usando tribrometo de boro (BBr_3), implantação iônica de imersão em plasma a partir do precursor gasoso B_2H_6 (Lanterne *et al.*, 2019) e deposição de líquido dopante contendo boro por *spin-on* seguido de difusão por radiação laser para formar regiões seletivas ou difusão em forno convencional para formar regiões homogêneas (Fernandez-Robledo *et al.*, 2017; Zanesco *et al.*, 2018).

Outro tema de pesquisa é a diminuição de etapas térmicas no processo de fabricação de células solares para evitar a degradação do substrato e reduzir os custos de produção. Yin *et al.* (2021) apresentaram uma seqüência para o processamento de células solares bifaciais base n, em que o emissor dopado com boro e o campo retrodifusor dopado com fósforo são formados na mesma etapa de alta temperatura. Neste processo foi realizada a deposição de silicato de boro por deposição química em fase vapor à pressão atmosférica (APCVD - *atmospheric pressure chemical vapor deposition*). Com a formação do emissor seletivo foi alcançada a eficiência de 21,9%. Em substratos de menor qualidade de Si-Cz tipo p grau solar foram desenvolvidas células solares bifaciais com difusão de boro e de fósforo na mesma etapa térmica e foi obtida a eficiência de 16,6 % e de 12,7 % com irradiância na face com o emissor e campo retrodifusor, respectivamente (Crestani, 2021). Neste processo, o líquido com boro foi depositado por *spin-on* e a difusão foi realizada em forno de quartzo convencional.

Neste contexto, o objetivo deste artigo é analisar a influência do método de formação do emissor produzido na mesma etapa térmica que o campo retrodifusor na resistência de folha das regiões altamente dopadas e nos parâmetros elétricos de células solares bifaciais base n com estrutura PERT e com passivação com dióxido de silício nas duas superfícies. Especificamente, avalia-se a influência da temperatura de difusão de boro na resistência de folha do emissor de boro e do campo retrodifusor dopado com fósforo e nos parâmetros elétricos das células solares.

2. METODOLOGIA

2.1. Processo de fabricação das células solares bifaciais e otimização experimental do emissor de boro

Para produzir as células solares bifaciais base n foram utilizadas lâminas de silício crescido pela técnica Czochralski (Si-Cz) tipo n, grau solar, orientação dos planos cristalinos $\{100\}$, espessura de $(200 \pm 30) \mu\text{m}$, diâmetro de $(100 \pm 0,5) \text{mm}$ e resistividade de base variando de $1 \Omega\cdot\text{cm}$ a $20 \Omega\cdot\text{cm}$. O processo foi desenvolvido em trabalhos anteriores para a produção de dispositivos monofaciais base p (Zanesco e Moehlecke, 2016) e é resumido nas seguintes etapas:

- texturação das superfícies em solução com KOH;
- limpeza química com solução RCA;
- deposição do líquido com boro pelo método de *spin-on* em uma face da lâmina de silício;
- difusão de boro e de fósforo na mesma etapa térmica;
- ataque do silicato de boro e de fósforo e limpeza química RCA;
- crescimento da camada de SiO_2 nas duas faces da lâmina de silício para passivação das superfícies;
- deposição do filme antirreflexo (AR) de TiO_2 em ambas as faces com espessura ajustada a espessura da camada de dióxido de silício;

- deposição por serigrafia e secagem da malha metálica com a pasta de Ag na face com o campo retrodifusor de fósforo;
- deposição por serigrafia e secagem da malha metálica com a pasta de Al/Ag na face com o emissor de boro;
- queima simultânea das pastas metálicas e
- isolamento de bordas com radiação laser.

O processo de difusão de boro em uma face da lâmina de silício e de fósforo na outra face foi realizado com base na solicitação de patente BR 10 2018 008576 0, intitulada “Processo de Difusão de Dopante Tipo p e Tipo n em Lâminas de Silício na Mesma Etapa Térmica”. Desta forma, com a difusão de boro e de fósforo na mesma etapa térmica são evitadas três etapas térmicas e dois processos químicos, quando se compara o processo com o padrão com difusão de boro a partir de BBr_3 . Como mostra a Fig. 1 com o processo convencional com BBr_3 , são necessárias catorze etapas para produzir as células solares bifaciais, sendo cinco processos a alta temperatura: duas oxidações, duas difusões e passivação das superfícies com o crescimento de camada de dióxido de silício. No entanto, com o método utilizado neste trabalho realizaram-se apenas duas etapas em alta temperatura: 1) a difusão de boro e fósforo e 2) o crescimento de SiO_2 para a passivação.

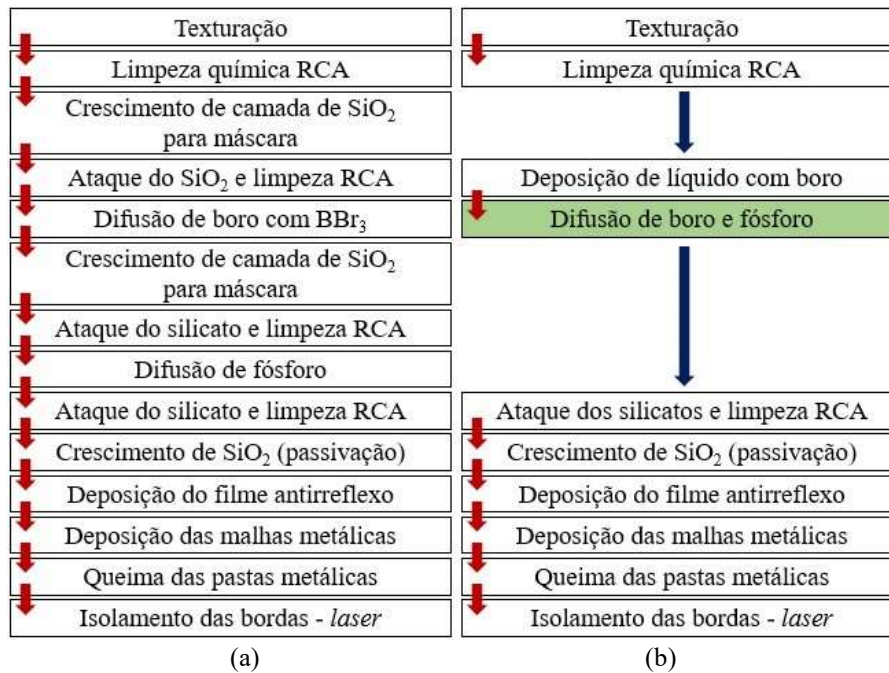


Figura 1. Comparação do processo de fabricação de células solares bifaciais com redução de etapas de processamento e passivação com SiO_2 em ambas as faces: a) processo convencional com BBr_3 e POCl_3 e b) processo com difusão de boro e fósforo na mesma etapa térmica.

Para a texturação das superfícies as lâminas de silício foram imersas em solução alcalina composta por hidróxido de potássio, álcool isopropílico e água deionizada (Jiang *et al.*, 2015; Ho *et al.*, 2018). Ocorre o ataque químico anisotrópico, que resulta na exposição dos planos cristalinos com orientação $\{111\}$ e formam-se micropirâmides de base quadrada (Green, 1982). Com o processo de texturação, a refletância nas superfícies é reduzida da ordem de 30 % para 10 %. Na continuação do processo, foi realizada a limpeza química RCA para a remoção de impurezas indesejadas nas superfícies, tais como resíduos orgânicos e alguns metais (Kern, 1993).

O líquido com boro PBF20, produzido pela empresa Filmtronics, foi depositado em uma das superfícies da lâmina de silício com a técnica de *spin-on*. O líquido foi depositado no centro da lâmina de silício e a mesma foi submetida a rotação para formar um filme fino com o dopante na superfície.

Após a evaporação dos solventes, as lâminas de silício foram introduzidas no forno com tubo de quartzo. A difusão de boro e de fósforo foi realizada na mesma etapa térmica, na qual a difusão de fósforo foi implementada a $845\text{ }^\circ\text{C}$ com POCl_3 (Zanesco e Moehlecke, 2015^b). Durante a difusão, forma-se o silicato de boro e de fósforo, os quais foram removidos por ataque químico em solução com ácido fluorídrico. Para preparar as lâminas de silício para a passivação das superfícies, as mesmas foram submetidas novamente à limpeza química RCA2.

Dando continuidade, as amostras foram submetidas ao segundo processo térmico, que é a oxidação seca a $800\text{ }^\circ\text{C}$ para crescer uma camada de dióxido de silício nas superfícies para a passivação. Neste caso, a espessura da camada de SiO_2 no campo retrodifusor de fósforo e no emissor de boro foi de aproximadamente 50 nm e de 10 nm, respectivamente (Zanesco *et al.*, 2018).

Para formar o filme antirreflexo (AR), foi depositado um filme de dióxido de titânio nas duas superfícies das lâminas por evaporação com feixe de elétrons. A espessura do filme AR foi ajustada considerando a diferente espessura da camada de SiO_2 em cada face a fim de obter a menor refletância ponderada considerando a resposta espectral da célula solar (Zhao e Green, 1991). Na face com o emissor e campo retrodifusor a espessura do filme AR foi de aproximadamente 50 nm e 25 nm, respectivamente (Zanesco *et al.*, 2019).

As malhas metálicas foram produzidas pelo método de serigrafia com duas barras coletoras e 35 trilhas. Na face com o emissor p^+ foi depositada a pasta de prata e alumínio PV32N produzida pela DuPont, enquanto que na face do campo retrodifusor n^+ foi utilizada a pasta de prata PV17F do mesmo fabricante. Após a impressão dos contatos metálicos e secagem das pastas metálicas, implementou-se o processo de queima no forno de esteira na temperatura de 860 °C. Na última etapa, foi realizado o isolamento das bordas com uso de radiação laser e posterior clivagem manual. Como resultado, produziu-se a célula solar bifacial PERT base n, com 61,58 cm² de área, cuja estrutura está representada na Fig. 2.

O processo completo de produção das células solares bifaciais foi aplicado em cinco lotes para otimizar experimentalmente o emissor. Para isso, variou-se a temperatura para difusão do boro (T_B) de 940 °C a 980 °C, com incremento da temperatura de 10 °C. Em cada lote foram processadas de 4 a 6 células solares bifaciais. Para avaliar a resistência de folha foram produzidos 10 lotes de células solares, ou seja, para cada temperatura de difusão de boro foram processados dois lotes, denominados de A e B.

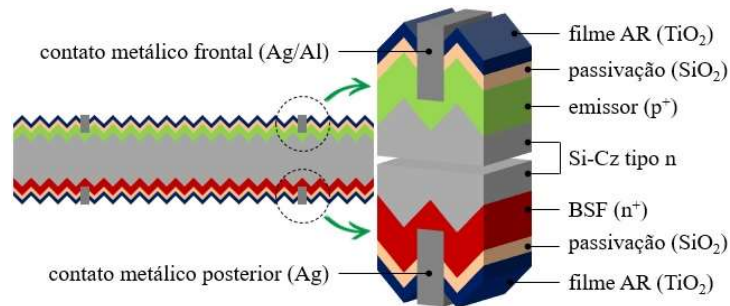


Figura 2. Seção transversal da célula solar bifacial PERT base n, com emissor p^+ de boro e campo retrodifusor n^+ de fósforo, passivação com SiO_2 e filme antirreflexo de TiO_2 em ambas as faces.

2.2. Caracterização das células solares bifaciais

As regiões altamente dopadas com boro foram caracterizadas pela medição da resistência de folha das regiões altamente dopadas em 13 regiões em uma lâmina de Si de referência, para cada lote de células solares produzido com uma determinada temperatura de difusão de boro. A resistência de folha foi medida antes do crescimento da camada de dióxido de silício para a passivação das superfícies. Como o processo foi realizado na mesma etapa térmica, o aumento da temperatura de difusão de boro pode provocar a difusão deste dopante na face dopada com fósforo e afetar a resistência de folha e os parâmetros elétricos das células solares bifaciais. Portanto, foi caracterizada também a resistência de folha do campo retrodifusor em função da T_B .

Para caracterizar as células solares desenvolvidas, foi medida a curva da corrente elétrica em função da diferença de potencial (curva I-V) nas condições padrão de medição: irradiância de 1000 W/m², espectro solar AM1,5G e temperatura da célula solar de 25 °C. Para esta medição utilizou-se o simulador solar modelo CT150AAA, fabricado pela empresa PET - Photo Emission Tech., Inc. e uma célula solar calibrada no CalLab - FhG-ISE (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme). Mediu-se a curva I-V com irradiância em uma face e manteve-se a outra face no escuro. Desta forma, foi possível medir a eficiência das células solares bifaciais independentemente em cada face. A partir da curva I-V de cada célula solar compararam-se os parâmetros elétricos, que são: corrente elétrica (I_{sc}) e densidade (J_{sc}) de corrente elétrica de curto-circuito, tensão de circuito aberto (V_{oc}), fator de forma (FF) e eficiência (η).

3. RESULTADOS E ANÁLISES

3.1 Análise da resistência de folha do emissor e do campo retrodifusor

Na Fig. 3 e na Tab. 1 mostram-se os valores da resistência de folha do emissor de boro (R_{SQ-B}) e do campo retrodifusor de fósforo (R_{SQ-P}) obtidos no intervalo de temperatura de difusão do boro (T_B) de 940 °C a 980 °C. Da Fig. 3 observa-se que, conforme esperado, a resistência de folha do emissor diminuiu com o aumento da temperatura de difusão de boro. A variação observada nos valores da resistência de folha do emissor é típica e depende de pequenas alterações nos parâmetros de processo e na resistividade de base das lâminas de silício tipo n. Porém, a resistência de folha do campo retrodifusor de fósforo tende a aumentar, indicando que a temperatura de difusão de boro está influenciando na formação do campo retrodifusor de fósforo. Provavelmente, ocorre a difusão de boro na face dopada com fósforo com o aumento da T_B .

Como mostra a Tab.1, a resistência de folha média do emissor diminuiu de $(116 \pm 6) \Omega/sq$ para $(64 \pm 2) \Omega/sq$ com o aumento da T_B de 940 °C a 980 °C e o desvio padrão tende a diminuir. Este resultado indica que nas maiores temperaturas de difusão de boro ocorre uma maior uniformidade da resistência de folha em uma lâmina de silício. No entanto, o comportamento contrário foi observado na resistência de folha média do campo retrodifusor de fósforo. Neste

caso, a R_{SQ-P} aumentou de $(51,4 \pm 0,1) \Omega/sq$ a $(72 \pm 3) \Omega/sq$ com o aumento da temperatura de difusão de boro de $940 \text{ }^\circ\text{C}$ a $980 \text{ }^\circ\text{C}$. Também se verifica um aumento do desvio padrão, que pode ser provocado pela influência da difusão de boro.

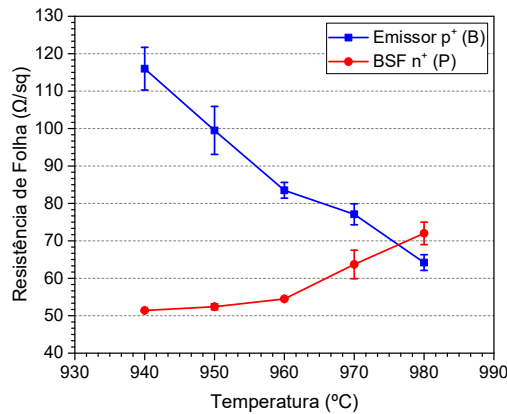


Figura 3 - Resistência de folha do emissor de boro e do campo retrodifusor de fósforo em função da temperatura de difusão de boro.

Tabela 1 - Resistência de folha do emissor de boro (R_{SQ-B}) e do campo retrodifusor de fósforo (R_{SQ-P}) em função da temperatura de difusão de boro (T_B). A difusão de boro e de fósforo foi realizada na mesma etapa térmica e a temperatura do processo de crescimento de SiO_2 para a passivação foi de $800 \text{ }^\circ\text{C}$.

T_B (°C)	Lote	R_{SQ-B} (Ω/sq)	R_{SQ-B} Média (Ω/sq)	R_{SQ-P} (Ω/sq)	R_{SQ-P} Média (Ω/sq)
940	A	120 ± 3	116 ± 6	$51,5 \pm 0,6$	$51,4 \pm 0,1$
	B	112 ± 6		$51,3 \pm 2,4$	
950	A	104 ± 4	100 ± 6	$51,8 \pm 0,8$	$52,4 \pm 0,8$
	B	95 ± 4		53 ± 3	
960	A	$84,9 \pm 2,5$	$83,5 \pm 2,1$	$54,6 \pm 1,2$	$54,5 \pm 0,2$
	B	82 ± 6		$54,3 \pm 2,8$	
970	A	$75,1 \pm 2,8$	$77,1 \pm 2,8$	61 ± 3	64 ± 4
	B	79 ± 3		$66,4 \pm 2,1$	
980	A	$64,2 \pm 2,1$	$64,2 \pm 2,1$	72 ± 3	72 ± 3

3.2 Otimização do emissor de boro e comparação dos parâmetros elétricos

Na Tab. 2 e Tab. 3 apresenta-se a densidade de corrente elétrica de curto-circuito (J_{SC}), a tensão de circuito aberto (V_{OC}), o fator de forma (FF) e a eficiência (η) das células solares bifaciais base n com irradiância no emissor de boro e no campo retrodifusor de fósforo, respectivamente.

Tabela 2 - Parâmetros elétricos das células solares bifaciais base n com irradiância incidente no **emissor** de boro em função da temperatura de difusão de boro. A difusão de boro e de fósforo foi realizada na mesma etapa térmica.

T_B (°C)	R_{SQ-B} (Ω/sq)	Célula	Emissor de Boro			
			J_{SC} (mA/cm ²)	V_{OC} (mV)	FF	η (%)
940	112 ± 6	7	35,2	579,8	0,65	13,3
950	95 ± 4	19	34,2	579,6	0,75	14,8
960	82 ± 6	9	34,5	587,5	0,76	15,3
970	79 ± 3	4	33,5	585,8	0,74	14,6

Tabela 3 - Parâmetros elétricos das células solares bifaciais base n com irradiância incidente no **campo retrodifusor** de fósforo em função da temperatura de difusão de boro e da resistência de folha do BSF. A difusão de boro e de fósforo foi realizada na mesma etapa térmica.

T_B (°C)	R_{SQ-P} (Ω/sq)	Célula	Campo Retrodifusor de Fósforo			
			J_{SC} (mA/cm ²)	V_{OC} (mV)	FF	η (%)
940	$51,3 \pm 2,4$	7	34,2	577,3	0,71	14,0
950	53 ± 3	19	32,7	577,4	0,75	14,3
960	$54,3 \pm 2,8$	9	34,6	586,1	0,77	15,5
970	$66,4 \pm 2,1$	4	33,8	584,3	0,76	14,9

Comparando a Tab. 2 com a Tab. 3 constata-se que a maior eficiência foi alcançada com a T_B de 960 °C, independente da face com incidência de irradiância. A eficiência alcançada foi de 15,3% e 15,5 % com irradiância no emissor e BSF, respectivamente. Portanto, a eficiência no campo retrodifusor é 0,2 % (absoluto) maior que o valor com irradiância no emissor.

Na Fig. 4 e na Fig. 5 mostram-se as curvas J-V das células solares produzidas com as diferentes temperaturas de processamento e com irradiância no emissor de boro e no campo retrodifusor de fósforo, respectivamente. Observa-se que para a menor T_B , a resistência em série é a maior, com os dois modos de iluminação. Este resultado é confirmado comparando os valores do fator de forma apresentados na Tab. 2 e Tab. 3. Nos dispositivos processados com T_B de 940 °C, o fator de forma foi o menor, de 0,65 e 0,71, com irradiância no emissor e BSF, respectivamente. Este resultado pode estar associado à maior resistência de contato entre o emissor e o material da malha metálica formada com a pasta de Ag/Al, devido a maior resistência de folha do emissor de boro. Também se observa que a tensão de circuito aberto é um pouco menor com irradiância no campo retrodifusor, em todos os dispositivos, independente da temperatura de difusão de boro.

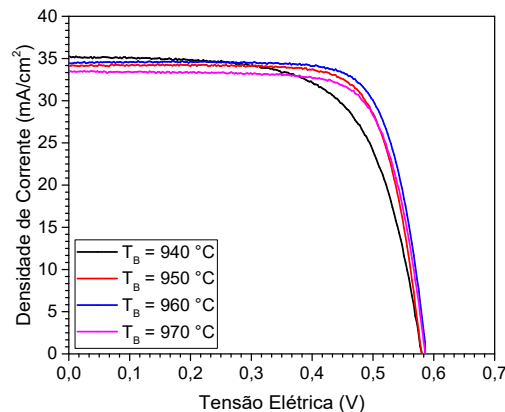


Figura 4 - Densidade de corrente elétrica em função da tensão aplicada (curva J-V) das células solares bifaciais base n processadas com diferentes temperaturas de difusão de boro e com irradiância incidente na face com o emissor.

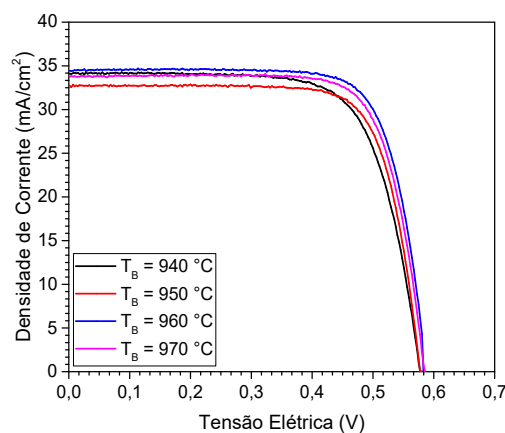


Figura 5 - Densidade de corrente elétrica em função da tensão aplicada (curva J-V) das células solares bifaciais base n processadas com diferentes temperaturas de difusão de boro e com irradiância incidente na face com o campo retrodifusor.

Na Fig. 6 comparam-se a curvas J-V da célula solar com maior eficiência, produzida com $T_B = 960$ °C, nos dois modos de iluminação. Nota-se que os parâmetros elétricos obtidos com irradiância no emissor e no campo retrodifusor são similares. Ao comparar os parâmetros elétricos apresentados na Tab. 2 e Tab. 3 verifica-se que a densidade de corrente de curto-circuito ($34,6 \text{ mA/cm}^2$ e $34,5 \text{ mA/cm}^2$) e o fator de forma (0,77 - 0,76) foram similares. Somente a tensão de circuito aberto foi um pouco maior, quando a medição foi realizada com irradiância incidente no emissor (586,1 mV e 587,5 mV).

Na célula solar com maior eficiência, a bifacialidade, que é a razão entre a menor e a maior eficiência segundo o modo de iluminação, é próxima a um. Nesta célula solar, especificamente, o valor foi de 0,987. Este resultado é obtido somente em células solares bifaciais base n. Nos dispositivos base p, que são os típicos produzidos pela indústria, a bifacialidade é da ordem de 0,7 (Crestani, 2021; Xia *et al.*, 2020). Este resultado também indica que o processo de difusão de boro em uma face da lâmina de silício e de fósforo na outra face, com o método utilizado com difusão dos dois dopantes no mesmo processo térmico (patente BR 10 2018 008576 0) é eficaz e possibilita a produção de células solares bifaciais base n.

Na Fig. 7 mostram-se os parâmetros elétricos das células solares desenvolvidas em função da temperatura de difusão de boro. A partir da Fig. 7-a observa-se que, com os dois modos de iluminação, a tensão de circuito aberto cresce com a T_B até a temperatura de 960 °C. Também se confirma que a V_{OC} é maior com irradiância no emissor. No entanto, na Fig. 7-b nota-se que a densidade de corrente de curto-circuito com irradiância incidente no emissor tende a diminuir com o aumento da T_B , pois forma-se um emissor mais profundo e aumenta a recombinação dos portadores de carga minoritários na região.

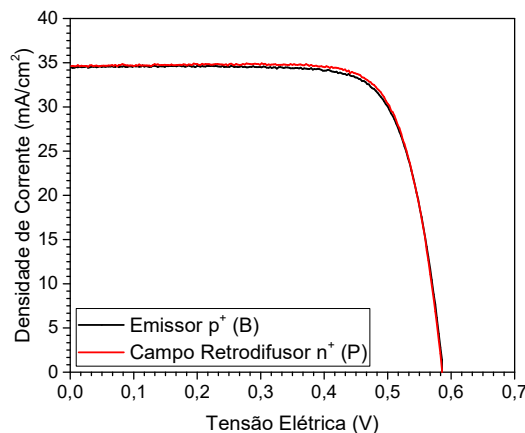


Figura 6. Comparação da densidade de corrente elétrica em função da tensão aplicada (curva J-V) da célula solar bifacial base n com a maior eficiência e processada com temperatura de difusão de boro de 960 °C.

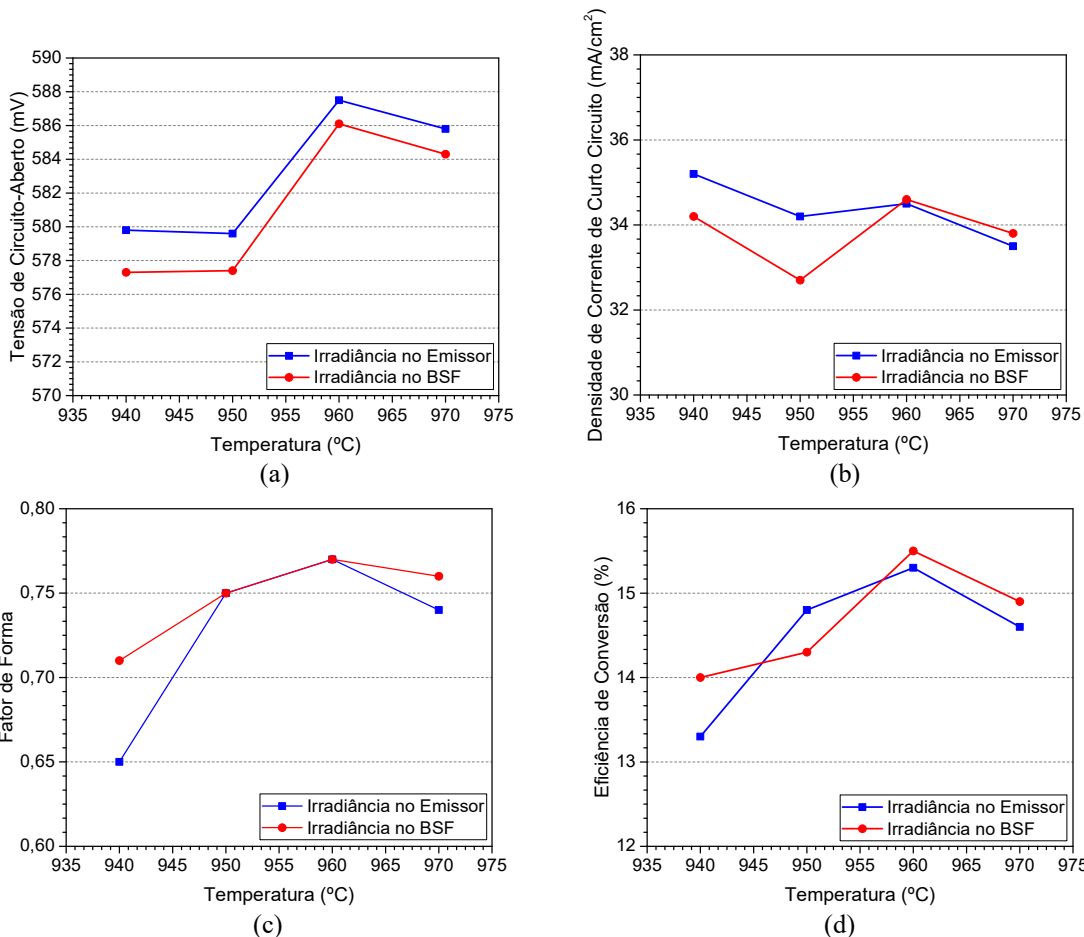


Figura 7 - (a) Tensão de circuito aberto, (b) densidade de corrente de curto-circuito, (c) fator de forma e (d) eficiência em função da temperatura de difusão de boro das célula solar bifaciais com irradiância no emissor de boro e no campo retrodifusor de fósforo.

Da Fig. 7-c verifica-se que o fator de forma aumenta até a temperatura de difusão de boro de 960 °C e, portanto, o maior valor do fator de forma foi obtido nesta T_B e foi similar para os dois modos de iluminação. Consequentemente, a

eficiência foi afetada principalmente pelo fator de forma e a tensão de circuito aberto e o maior valor foi obtido com a T_B de 960 °C, como mostra a Fig. 7-d.

4. CONCLUSÕES

A resistência de folha do emissor de boro diminuiu de $(116 \pm 6) \Omega/\text{sq}$ para $(64 \pm 2) \Omega/\text{sq}$ com o aumento da temperatura de difusão de boro de 940 °C a 980 °C. Porém, a resistência de folha do campo retrodifusor de fósforo foi afetada pela temperatura de processamento, aumentando de $(51,4 \pm 0,1) \Omega/\text{sq}$ a $(72 \pm 3) \Omega/\text{sq}$. Também se verificou que a uniformidade da resistência de folha do emissor em uma lâmina de silício aumenta com a temperatura de difusão de boro.

A maior eficiência das células solares bifaciais base n foi alcançada com a temperatura de difusão de boro de 960 °C, sendo um pouco maior com irradiância no campo retrodifusor de fósforo. Os valores obtidos foram 15,3% e 15,5% com irradiância no emissor e no BSF, respectivamente, resultando na bifacialidade de 0,987. Nesta célula solar, somente a tensão de circuito aberto foi um pouco maior, quando a medição foi realizada com irradiância no emissor. Os demais parâmetros elétricos foram um pouco menores. Também se verificou que a tensão de circuito aberto é maior neste modo de iluminação independente da temperatura de processamento. A maior resistência em série foi identificada no dispositivo processado com a menor temperatura de difusão de boro, nos dois modos de iluminação, e reduziu o fator de forma.

Concluiu-se que a tensão de circuito aberto e o fator de forma crescem até a temperatura de processamento de 960 °C, independente do modo de iluminação. Porém, a densidade de corrente de curto-circuito com irradiância no emissor tende a diminuir com o aumento da temperatura de difusão de boro, devido a maior recombinação dos portadores de carga minoritários. O fator de forma foi similar para os dois modos de iluminação e foi o parâmetro elétrico que mais influenciou na eficiência.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Este trabalho faz parte dos projetos de P&D intitulados “Desenvolvimento de Células Solares Bifaciais PERT Base n com Redução de Etapas Térmicas”, processo nº 440046/2019-0, m Chamada CNPq/Equinor nº 38/2018 e “Desenvolvimento e Comparação de Células Solares Base p e Base n com Passivação”, processo nº 304943/2016-9, Chamada CNPq 11/2016, ambos subvencionados pelo CNPq.

REFERÊNCIAS

- Biazetto, F. A., 2019. Otimização das regiões altamente dopadas de células solares bifaciais base n e análise da passivação, Dissertação de Mestrado, PGETEMA, PUCRS, Porto Alegre.
- Bonilla, R. S., Hoex, B., Hamer, P., & Wilshaw, P. R., 2017. Dielectric surface passivation for silicon solar cells: A review, *physica status solidi(a)*, vol. 214, n. 7, e-1700293, pp. 1-30. DOI 10.1002/pssa.201700293
- Boukourt, N., & Hadri, B. (2019). Bifacial n-PERC solar cell characterization, *Indian Journal of Physics*, vol. 93, n. 1, pp. 33-39. DOI:10.1007/s12648-018-1274-5
- Chen, D., Chen, Y., Wang, Z., Gong, J., Liu, C., Zou, Y., ... & Verlinden, P. J., 2020. 24.58% total area efficiency of screen-printed, large area industrial silicon solar cells with the tunnel oxide passivated contacts (i-TOPCon) design, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 206, e-110258, pp. 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110258>
- Crestani, T., 2021. Desenvolvimento de células solares bifaciais pert base p com junção flutuante e análise da passivação, Tese de Deutorado, PGETEMA, PUCRS, Porto Alegre.
- Ding, D., Lu, G., Li, Z., Zhang, Y., & Shen, W., 2019. High-efficiency n-type silicon PERT bifacial solar cells with selective emitters and poly-Si based passivating contacts, *Solar Energy*, vol. 193, pp. 494-501. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.09.085>
- Fernandez-Robledo, S., Nekarda, J., & Büchler, A., 2017. A laser induced forward transfer process for selective boron emitters, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 161, pp. 397-406. DOI 10.1016/j.solmat.2016.12.026
- Glunz, S. W., & Feldmann, F., 2018. SiO₂ surface passivation layers—a key technology for silicon solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 185, pp. 260-269. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.04.029>
- Green, M. A., 1982. *Solar cells: operating principles, technology and system applications*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.
- Green, M. A., 2009. The path to 25 % silicon solar cell efficiency: history of silicon cell evolution. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 17, pp. 183 – 189. <https://doi.org/10.1002/pip.892>
- Green, M. A., 2015 The passivated emitter and rear cell (PERC): from conception to mass production, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 143, pp. 190–197. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.06.055>

- Green, M. A., Dunlop, E. D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., & Hao, X., 2021. Solar cell efficiency tables (Version 58), *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 29, n 7, pp. 657-667. <https://doi.org/10.1002/pip.3444>
- Ho, J., Wu, T. C., Ho, J. J., Hung, C. H., Chen, S. Y., Ho, J. S., ... & Yeh, C. H., 2018. Rear-surface line-contact optimization using screen-print techniques on crystalline solar cells for industrial applications, *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 83, pp. 22-26. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2018.03.037>
- Huang, H., Modanese, C., Sun, S., von Gastrow, G., Wang, J., Pasanen, T. P., ... & Savin, H., 2018. Effective passivation of p+ and n+ emitters using SiO₂/Al₂O₃/SiN_x stacks: Surface passivation mechanisms and application to industrial p-PERT bifacial Si solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 186, pp. 356-364. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.07.007>
- Huang, Y., Liao, M., Wang, Z., Guo, X., Jiang, C., Yang, Q., ... & Ye, J., 2020. Ultrathin silicon oxide prepared by in-line plasma-assisted N₂O oxidation (PANO) and the application for n-type polysilicon passivated contact, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 208, e-110389, pp. 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110389>
- ITRPV. International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV): Results 2020. 2021, 12. ed. Germany: VDMA, 88 p. Disponível em: <https://itrpv.vdma.org/en/>.
- Jiang, Y., Zhang, X., Wang, F., & Zhao, Y., 2015. Optimization of a silicon wafer texturing process by modifying the texturing temperature for heterojunction solar cell applications, *RSC Advances*, vol. 5, n. 85, pp. 69629-69635. DOI: 10.1039/C5RA09739H
- Kern, W., 1993. *Handbook of semiconductor wafer cleaning technology: science, technology, and applications*. New Jersey, USA: Noyes Publications.
- Lanterne, A., Desrues, T., Lorfeuvre, C., Coig, M., Torregrosa, F., Milési, F., ... & Dubois, S., 2019. Plasma-immersion ion implantation: A path to lower the annealing temperature of implanted boron emitters and simplify PERT solar cell processing, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 27, n. 12, pp. 1081-1091. <https://doi.org/10.1002/pip.3186>
- Sugiura, T., Matsumoto, S., & Nakano, N., 2020. Bifacial PERC solar cell designs: Bulk and rear properties and illumination condition, *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 10, n. 6, pp. 1538-1544. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2020.3013987
- Xia, L. et al. Influence of laser cutting conditions on electrical characteristics of half-size bifacial silicon solar cells. *Materials Science in Semiconductor Processing*, v. 105, n. June 2019, p. 104747, 2020. DOI: 10.1016/j.mssp.2019.104747
- Yan, X., Wang, E. C., Chen, N., Zhang, L., Gong, X., Zhang, X., & Duttgupta, S., 2019. Investigation of phosphorus diffused back surface field (BSF) in bifacial nFAB solar cells, *Solar Energy*, vol. 179, pp. 335-342. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.12.052>
- Yin, H. P., Tang, K., Zhang, J. B., Shan, W., Huang, X. M., & Shen, X. D., 2020. Bifacial n-type silicon solar cells with selective front surface field and rear emitter, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 208, e-110345, pp 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110345>
- Yin, H. P., Tang, W. S., Zhang, J. B., Shan, W., Huang, X. M., & Shen, X. D., 2021. Screen-printed n-type Si solar cells with laser-doped selective back surface field, *Solar Energy*, vol. 220, pp. 211-216. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.03.062>
- Zanescio, I., Moehlecke, A., 2015^a. Analysis of the silicon dioxide passivation and forming gas annealing in silicon solar cells - ISES Solar World Congress, Brasil.
- Zanescio, I., Moehlecke, A., 2015^b. Células Solares de Alta Eficiência com Emissores Seletivos. Relatório Final de Projeto de P&D, Convênio CEEE-D nº 9942400, 210 p.
- Zanescio, I.; Moehlecke, A., 2016. Desenvolvimento de Processos Industriais para Fabricação de Células Solares com Pasta de Al e Passivação. Relatório Final de Projeto de P&D, Convênio ELETROSUL nº 1110140010, 379 p.
- Zanescio, I., Crestani, T., Moehlecke, A., Aquino, J., Razera, R. A. Z., Ly, M., & Gonçalves, V. A., 2018. Desenvolvimento da célula solar com maior eficiência no Brasil com processo Industrial, *Revista Brasileira de Energia Solar*, vol. 9, n. 1, pp. 41-48.
- Zanescio, I., Razera, R. A. Z., & Moehlecke, A., 2018. Análise da passivação com SiO₂ na face posterior e frontal de células solares com campo retrodifusor seletivo, *Matéria (Rio de Janeiro)*, vol. 22, e-11924, pp 1-9. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170005.0260>.
- Zanescio, I., Moehlecke, A., Model, J. C. M., Ly, M., de Aquino, J., Razera, R. A. Z., ... & Gonçalves, V. A., 2019. Evaluation of the TiO₂ anti-reflective coating in PERT solar cells with silicon dioxide passivation – ISES Solar World Congress, Brasil.
- Zhao, J., & Green, M. A., 1991. Optimized antireflection coatings for high-efficiency silicon solar cells. *IEEE Transactions on electron devices*, vol. 38, n. 8, pp. 1925-1934. DOI: 10.1109/16.119035

INFLUENCE OF THE EMITTER PRODUCED WITH REDUCTION OF THERMAL STEPS IN THE ELECTRICAL PARAMETERS OF N-TYPE BIFACIAL SOLAR CELLS

Abstract. *Bifacial solar cells produced in n-type silicon wafers have the potential to obtain high efficiency and bifaciality near to one. With this goal, the objective of this article is to analyze the influence of the method to produce the emitter*

and the back surface field in the same thermal step in the electrical parameters of n-type bifacial solar cells with PERT structure and silicon dioxide surface passivation. The spin-on technique was used and the boron diffusion was carried out in a conventional tube furnace, followed by the diffusion of phosphorus with POCl_3 . The temperature of boron diffusion was ranged from 940 °C to 980 °C and the sheet resistance of the emitter and the back surface field (BSF) doped with phosphorus were analyzed as well as its influence on the electrical parameters of the bifacial solar cells. The sheet resistance of the boron emitter decreased from $(116 \pm 6) \Omega/\text{sq}$ to $(64 \pm 2) \Omega/\text{sq}$ with increasing of the boron diffusion temperature from 940 °C to 980 °C. However, the sheet resistance of the phosphorus back surface field increased, indicating that boron diffusion affected the phosphorus-doped region. The efficiencies of 15.3% and 15.5%, with irradiance in the emitter and in the back surface field, respectively, was achieved with the boron diffusion temperature of 960 °C. In this solar cell the bifaciality was 0.987. We found that the open circuit voltage was higher with irradiance in the BSF, regardless of the processing temperature. Moreover, in both illumination modes, the open circuit voltage and fill factor grew up until the processing temperature of 960 °C. However, the short-circuit current density with irradiance in the emitter decreases slightly with the increasing of the boron diffusion temperature, due to the high recombination of the minority charge carriers. The fill factor was the electrical parameter that most affected the efficiency.

Key words: Bifacial solar cells, n-type PERT structure, Thermal step reduction