

## DESENVOLVIMENTO DO CAMPO RETRODIFUSOR SELETIVO DE ALUMÍNIO E BORO EM CÉLULAS SOLARES DE SILÍCIO

Thais Crestani – realthaiscrestani@gmail.com

Izete Zanesco – izete@pucrs.br

Adriano Moehlecke – moehleck@pucrs.br

Ricardo Augusto Zanotto Razera – ricardo.razera@acad.pucrs.br

Jéssica de Aquino – jessicaaquino.rs@gmail.com

José Cristiano Mengue Model – jose.model@hotmail.com

Moussa Ly – moussa.ly@pucrs.br

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

**Resumo.** As células solares típicas da indústria possuem um emissor frontal formado por fósforo e um campo retrodifusor homogêneo formado por pasta de alumínio, que provoca o abaulamento das células solares. A formação de um campo retrodifusor seletivo de boro e alumínio evita o abaulamento. O objetivo deste artigo é apresentar o desenvolvimento do campo retrodifusor seletivo de boro e alumínio em células solares industriais processadas em lâminas de Si-Cz, grau solar. Otimizou-se a temperatura de queima das pastas de metalização e a temperatura de difusão de boro. 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. A resistência de folha média no emissor de fósforo foi de  $56,4 \Omega/\square$  e na região com boro do campo retrodifusor variou de  $21,8 \Omega/\square$  a  $73,8 \Omega/\square$ . A temperatura de queima ( $T_Q$ ) das pastas metálicas, que forma o campo retrodifusor seletivo nas trilhas metálicas, foi variada de  $850^\circ\text{C}$  a  $880^\circ\text{C}$ . Constatou-se que, em média, a melhor  $T_Q$  ocorreu em  $860^\circ\text{C}$  -  $870^\circ\text{C}$  e a variação da eficiência em função da temperatura de queima foi inferior a  $0,9\%$  (absoluto). O maior fator de forma resultou na maior eficiência média de  $15,3\%$ . A densidade de corrente de curto-circuito praticamente não foi afetada pela  $T_Q$  e pela temperatura de difusão de boro. A maior eficiência, de  $15,7\%$ , foi obtida para a temperatura de difusão de boro de  $960^\circ\text{C}$  e  $T_Q$  de  $880^\circ\text{C}$  e verificou-se que a tensão de circuito aberto tende a aumentar com o aumento da temperatura de difusão de boro.

**Palavras-chave:** Células Solares, Campo Retrodifusor Seletivo de B e Al, Temperatura de Queima de Pastas Metálicas.

### 1. INTRODUÇÃO

As células solares são os dispositivos que convertem diretamente a radiação solar incidente em energia elétrica. Devido à pesquisa e incentivo, a eficiência das células solares tem aumentado continuamente bem como a produção industrial anual. Consequentemente, a energia solar fotovoltaica foi a tecnologia de produção de energia elétrica que apresentou maior crescimento no mundo nos últimos anos. A potência instalada atingiu cerca de 303 GW em 2016, contra 7 GW em 2006, conforme mostra a Fig. 1. O crescimento foi ainda mais expressivo a partir de 2009 (REN 21's, 2017).

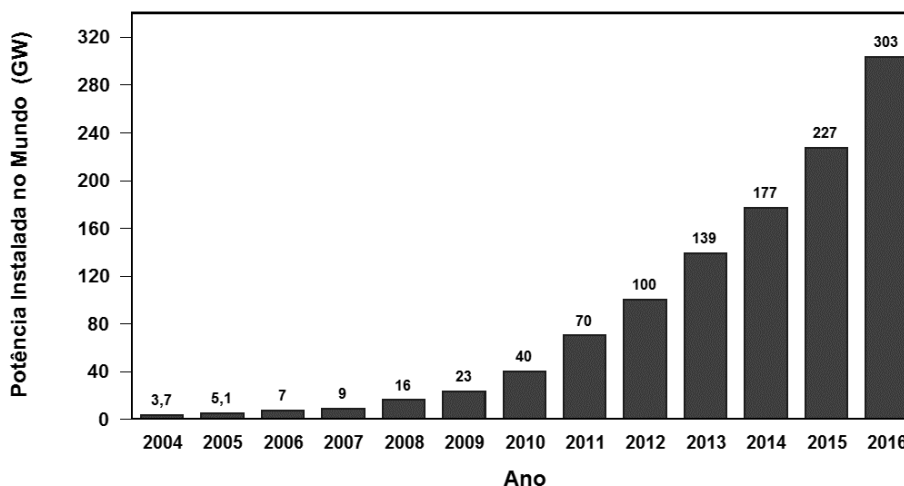


Figura 1 - Potência instalada em sistemas fotovoltaicos no mundo (REN 21's, 2017).

A tecnologia baseada no silício tem dominado o mercado. Uma das maiores vantagens dessa tecnologia é que a matéria-prima (silício) é praticamente inesgotável e o Brasil é um dos maiores produtores mundiais de silício grau metalúrgico (Moehlecke et al., 2012).

As células solares de silício cristalino detêm de 85 % a 90 % do mercado (REN 21's, 2015). A eficiência média das células solares fabricadas em lâminas de Si multicristalino varia normalmente entre 14,5 % e 16,2 %, sendo a média da indústria de aproximadamente 15,5 %. Para dispositivos processados em silício monocristalino, a variação da eficiência está entre 14,5 % e 22 %, basicamente devido às células de alta eficiência HIT (*heterojunction with intrinsic thin-layer*) da Sanyo's e IBC (*interdigitated back contact*) da Sun Power Corporation. A média da indústria de células solares produzidas em lâminas de Si tipo p, crescido pela técnica Czochralski (Si-Cz) é de aproximadamente 16,5 % (REN 21's, 2015), (Fath, 2009).

As células solares típicas da indústria possuem uma junção pn em uma das faces e na outra face é formado o campo retrodifusor homogêneo, que tem a função de diminuir a recombinação dos portadores de carga. Este efeito é conseguido por meio da difusão de alumínio ou de boro em lâminas de silício tipo p. Desse modo, há a formação de um campo elétrico que repele os portadores de carga minoritários que se aproximam da superfície posterior, impedindo que se recombinem (Yang et al., 2011), (Zanescio et al., 2012).

Nas células solares típicas da indústria o campo retrodifusor homogêneo, também denominado BSF (*back surface field*), é formado pela queima de pasta de alumínio depositada por serigrafia. As pastas metálicas depositadas na face frontal e posterior são processadas termicamente em forno de esteira, ocorrendo simultaneamente a difusão do alumínio e a queima das pastas de Ag e Ag/Al para estabelecer o contato metal-semicondutor. Com este processo foram obtidas células solares que atingiram eficiências de 15 % a 17 % em silício monocristalino (Goodrich et al., 2013). Com um processo pré-industrial foi obtida a eficiência de  $(15,0 \pm 0,1)$  % em células solares com campo retrodifusor com densidade superficial de pasta de alumínio de  $3,5 \text{ mg/cm}^2$  (Zanescio et al., 2014). Foi constatado que a tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ ) depende da quantidade de pasta de alumínio depositada, bem como a densidade de corrente de circuito aberto ( $J_{SC}$ ) e o fator de forma (FF). Para a densidade superficial de pasta de Al de até  $3,5 \text{ mg/cm}^2$ , a eficiência quântica interna aumentou para comprimentos de onda maiores que 700 nm, o que explica o aumento da  $J_{SC}$ . O comprimento de difusão dos portadores de carga minoritários também foi dependente da quantidade de pasta Al, o maior valor obtido foi de 1280  $\mu\text{m}$  para a densidade superficial de  $3,5 \text{ g/cm}^2$ .

A estrutura do emissor seletivo oferece vantagens tanto para as regiões altamente dopadas sob as trilhas da malha metálica, quanto para as regiões pouco dopadas entre as trilhas. Células solares com emissor seletivo podem ter valores de resistência de folha elevada, da ordem de  $200 \Omega/\square$ , entre os contatos, enquanto que a resistência de folha sob os contatos pode ser da ordem de  $50 - 60 \Omega/\square$ , para garantir um excelente contato ôhmico (Moon et al., 2009). O emissor seletivo pode proporcionar uma melhora na eficiência da célula solar, de 0,3 % a 2 %, dependendo da estrutura da célula solar e do processo de fabricação. Portanto, a eficiência das células solares de silício é aumentada pela formação do emissor seletivo (Moon et al., 2009), (Rahman, 2012).

Estudos de células solares bifaciais com BSF seletivo formado por radiação laser resultaram na eficiência de 15,9 % (Duran et al., 2009). Antes da difusão com radiação laser, a face posterior das células solares foi submetida à uma difusão de boro em forno convencional. A etapa adicional no processo para formação do BSF seletivo, juntamente com a otimização da difusão aumentou a eficiência das células solares em aproximadamente 1,0 % (absoluto) em comparação com células solares bifaciais processadas em forno convencional para difusão de dopantes.

Células solares de alta eficiência são produzidas com campo retrodifusor e contato formado em pontos por radiação laser (LFC – *laser fired contact*). Com esta técnica pode-se aumentar a eficiência, devido a passivação na face posterior e evitar o problema do abaulamento provocado pela pasta de alumínio que forma o BSF homogêneo. Em trabalhos recentes, foram publicadas eficiências de 20,7 % (Cornagliotti et al., 2015), de dispositivos desenvolvidos em substratos de Si-Cz, com passivação na face posterior formada por uma camada composta de 10 nm de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e de 120 nm de  $\text{SiN}_x$ . A malha metálica frontal foi formada pela deposição de Ni/Cu/Ag.

No que diz respeito às células solares com BSF dopado localmente com pasta de Al, com a análise do tempo de vida dos portadores de carga minoritários, foi evidenciado que a difusão de fósforo produz *gettering*, porém o comprimento de difusão dos portadores de carga minoritários, obtido a partir de medições LBIC (*light beam induced current*), foi menor que a espessura das células solares e a bifacialidade (fator de simetria da corrente elétrica) foi baixo. Portanto, a estrutura não é adequada para dispositivos bifaciais (Moehlecke et al., 2014). Com a finalidade de formar um campo retrodifusor seletivo na região  $p^+$  foi acrescentado ao processo de fabricação a difusão de boro e foi formado um BSF seletivo de boro e alumínio. Em lâminas finas, com espessura da ordem de 150  $\mu\text{m}$ , a eficiência alcançada foi de 13,7 % na face com o emissor e de 8,9 % na face com o BSF seletivo, sem passivação e sem filme antirreflexo (Moehlecke et al., 2014).

O objetivo deste artigo é apresentar o desenvolvimento do campo retrodifusor seletivo de boro e alumínio em células solares industriais processadas em lâminas de Si-Cz, grau solar. 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. Especificamente, otimizou-se a difusão de boro e a temperatura de queima das pastas de metalização. Com este processo, evita-se o abaulamento das células solares provocado pela pasta de alumínio que forma o BSF homogêneo em células solares industriais e forma-se uma estrutura, na qual é possível passivar a face posterior da célula solar, sem a necessidade do uso de radiação laser. Desta forma, o processo em desenvolvimento é facilmente adaptado à indústria atual de células solares.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O processo de fabricação das células solares está resumido na Fig. 2 e consistiu basicamente nas seguintes etapas: texturação das superfícies das lâminas de Si, limpeza química RCA (Kern, 1993), deposição do líquido dopante de boro, difusão de boro e oxidação na mesma etapa térmica (Costa, 2009), ataque em HF e limpeza RCA, difusão de fósforo, ataque do silicato de boro e de fósforo e limpeza química RCA2, deposição do filme antirreflexo (AR), metalização na face frontal e posterior por serigrafia com diferentes pastas metálicas, queima das pastas para a difusão do alumínio e isolamento das bordas. Está sendo solicitada a patente, junto ao INPI (Instituto Nacional de Produção Industrial) de etapas deste processo de produção de células solares. A espessura do filme AR de  $\text{TiO}_2$  na face frontal foi de 60 nm. 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  $\Omega\cdot\text{cm}$ .

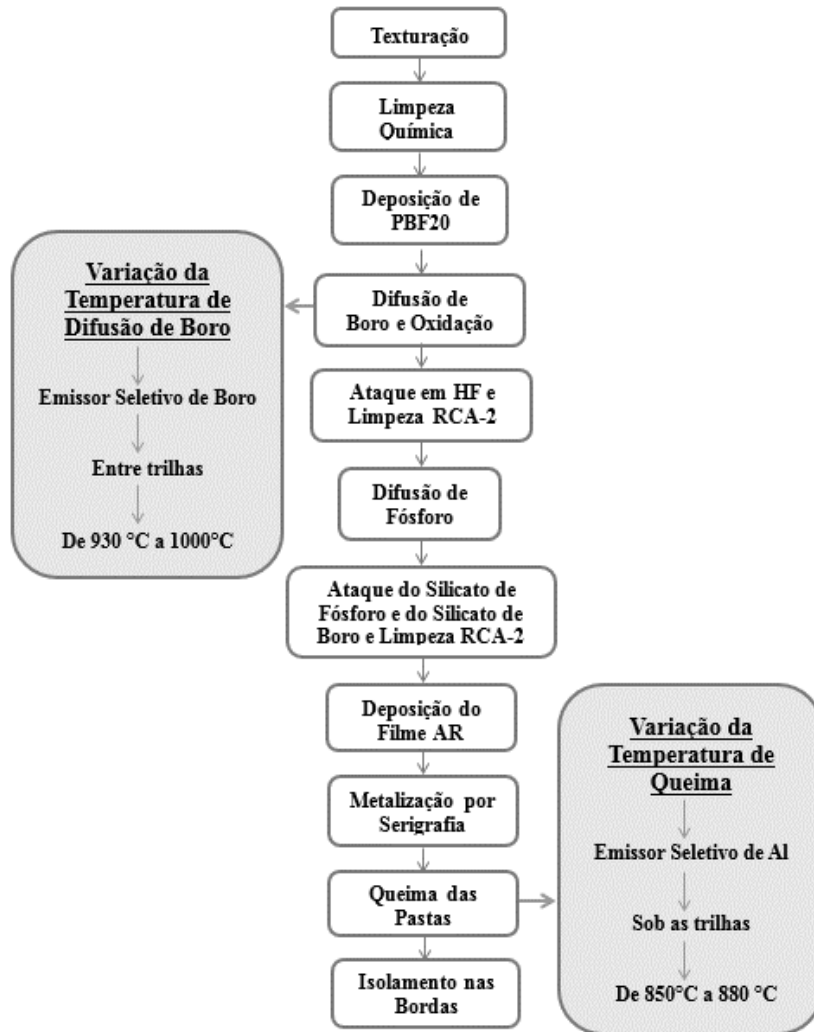


Figura 2 - Etapas do processo de fabricação das células solares.

Neste caso, o campo retrodifusor seletivo, na face posterior, é 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. Conforme mostra a Fig. 2, a temperatura de difusão de boro foi variada de 930 °C a 1000 °C e, conseqüentemente, variou-se a resistência de folha de 21,8  $\Omega/\square$  a 73,9  $\Omega/\square$ . Portanto, foi formado o emissor seletivo de boro, em uma região menos dopada entre as trilhas metálicas, reduzindo-se a recombinação dos portadores de carga minoritários e o emissor seletivo de alumínio em uma região mais dopada sob as trilhas metálicas, que reduz a resistência de contato.

Após a difusão de boro e oxidação, limpeza química em ácido fluorídrico e em solução RCA, foi implementada a difusão de fósforo na face frontal em forno convencional com tubo de quartzo com o dopante  $\text{POCl}_3$ . A resistência de folha na face frontal foi em média de 56,4  $\Omega/\square$ . O filme antirreflexo na face frontal foi depositado em vácuo pela técnica de canhão de elétrons, após as limpezas químicas e antes do processo de deposição das pastas metálicas para a formação do BSF seletivo de boro e alumínio e da metalização.

As células solares formadas a partir desse processo, apresentam estrutura  $n^+pp^+$  e 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  $100 \text{ mW/cm}^2$ , espectro solar AM1,5G e temperatura da célula solar de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Uma célula solar previamente calibrada no CalLab - FhG-ISE (*Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme*), Alemanha, foi usada como referência.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. Influência da Temperatura de Queima

Na Tab. 1 e na Fig. 3 apresentam-se 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 ( $\eta$ ) das células solares em função da temperatura de queima/difusão no forno de esteira e da temperatura de difusão de boro em forno convencional de quartzo. Os valores médios foram calculados a partir dos parâmetros elétricos de 2 a 5 células solares, conforme mostra a Tab. 1. Os maiores valores médios para cada temperatura de difusão de boro foram destacados em negrito.

Como mostra a Tab. 1 e a Fig. 3-d, a maior eficiência média foi de  $15,3 \%$  e ocorreu no intervalo de temperatura de difusão de boro ( $T_B$ ) de  $960 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $980 \text{ }^\circ\text{C}$  e temperatura de queima das pastas metálicas de  $860 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $870 \text{ }^\circ\text{C}$ . Para estes valores de  $T_B$ , a resistência de folha variou de aproximadamente  $53,8 \Omega/\square$  a  $36,7 \Omega/\square$ . Observa-se na Fig. 3-c que este resultado está relacionado com os maiores valores do fator de forma. Da Tab. 1 e da Fig. 3-d constata-se que a temperatura de queima ( $T_Q$ ) que resultou na melhor eficiência média depende da temperatura de difusão de boro e que há uma pequena tendência de aumento da melhor temperatura de queima das pastas metálicas com a diminuição da temperatura de difusão de boro. Para todos os valores de  $T_B$  avaliados, a variação da eficiência em função da temperatura de queima é inferior a  $0,9 \%$  (absoluto) e em média foi de  $0,4 \%$  (absoluto).

Tabela 1. Valores médios dos parâmetros elétricos das células solares com campo retrodifusor seletivo de boro e alumínio em função da temperatura de queima das pastas de metalização e da temperatura de difusão de boro.

$T_B$ ( $^\circ\text{C}$ )	$R_{\square}$ ( $\Omega/\square$ )	$T_Q$ ( $^\circ\text{C}$ )	Nº de células	$V_{oc}$ (mV)	$J_{sc}$ (mA/cm $^2$ )	FF	$\eta$ (%)
1000	$21,8 \pm 0,5$	850	2	$593,6 \pm 1,1$	$33,9 \pm 0,0$	$0,717 \pm 0,003$	$14,4 \pm 0,1$
		860	2	$594,1 \pm 3,2$	$33,9 \pm 0,0$	$0,720 \pm 0,018$	$14,5 \pm 0,4$
		<b>870</b>	<b>2</b>	<b><math>593,2 \pm 0,3</math></b>	<b><math>33,8 \pm 0,3</math></b>	<b><math>0,740 \pm 0,006</math></b>	<b><math>14,8 \pm 0,0</math></b>
		880	2	$594,1 \pm 0,4$	$33,7 \pm 0,2$	$0,735 \pm 0,006$	$14,7 \pm 0,1$
990	$23,0 \pm 1,8$	<b>850</b>	<b>4</b>	<b><math>597,5 \pm 1,2</math></b>	<b><math>33,7 \pm 0,1</math></b>	<b><math>0,740 \pm 0,008</math></b>	<b><math>14,9 \pm 0,1</math></b>
		860	4	$595,5 \pm 3,6$	$33,8 \pm 0,1$	$0,723 \pm 0,023$	$14,6 \pm 0,5$
		870	4	$595,0 \pm 1,2$	$33,9 \pm 0,2$	$0,722 \pm 0,018$	$14,6 \pm 0,4$
		880	4	$592,4 \pm 0,9$	$33,8 \pm 0,1$	$0,739 \pm 0,008$	$14,8 \pm 0,2$
980	$36,7 \pm 1,1$	850	4	$588,2 \pm 1,6$	$33,8 \pm 0,1$	$0,757 \pm 0,008$	$15,1 \pm 0,1$
		<b>860</b>	<b>4</b>	<b><math>587,8 \pm 0,9</math></b>	<b><math>33,8 \pm 0,1</math></b>	<b><math>0,772 \pm 0,004</math></b>	<b><math>15,3 \pm 0,1</math></b>
		870	4	$589,0 \pm 1,8$	$33,9 \pm 0,1$	$0,743 \pm 0,022$	$14,8 \pm 0,5$
		880	4	$588,6 \pm 2,4$	$33,8 \pm 0,1$	$0,741 \pm 0,024$	$14,7 \pm 0,5$
970	$43,2 \pm 1,7$	850	4	$592,5 \pm 0,6$	$33,9 \pm 0,1$	$0,737 \pm 0,035$	$14,8 \pm 0,7$
		860	4	$591,8 \pm 1,0$	$33,7 \pm 0,1$	$0,762 \pm 0,010$	$15,2 \pm 0,2$
		<b>870</b>	<b>5</b>	<b><math>590,0 \pm 1,6</math></b>	<b><math>33,9 \pm 0,1</math></b>	<b><math>0,762 \pm 0,018</math></b>	<b><math>15,3 \pm 0,4</math></b>
		880	4	$588,7 \pm 0,4$	$33,8 \pm 0,1$	$0,758 \pm 0,006$	$15,1 \pm 0,1$
960	$53,8 \pm 6,7$	850	2	$592,3 \pm 0,8$	$33,9 \pm 0,1$	$0,743 \pm 0,013$	$14,9 \pm 0,3$
		<b>860</b>	<b>4</b>	<b><math>592,5 \pm 0,8</math></b>	<b><math>33,8 \pm 0,1</math></b>	<b><math>0,761 \pm 0,010</math></b>	<b><math>15,3 \pm 0,2</math></b>
		870	4	$585,1 \pm 2,1$	$33,9 \pm 0,1$	$0,735 \pm 0,028$	$14,6 \pm 0,6$
		880	4	$590,2 \pm 0,5$	$33,7 \pm 0,0$	$0,754 \pm 0,036$	$15,0 \pm 0,7$
950	$55,8 \pm 2,0$	850	2	$587,6 \pm 0,5$	$33,8 \pm 0,0$	$0,749 \pm 0,001$	$14,9 \pm 0,0$
		860	4	$585,9 \pm 0,6$	$33,7 \pm 0,1$	$0,759 \pm 0,007$	$15,0 \pm 0,1$
		870	5	$583,5 \pm 1,4$	$33,9 \pm 0,1$	$0,752 \pm 0,009$	$14,9 \pm 0,2$
		<b>880</b>	<b>4</b>	<b><math>584,0 \pm 1,4</math></b>	<b><math>33,8 \pm 0,1</math></b>	<b><math>0,767 \pm 0,016</math></b>	<b><math>15,1 \pm 0,4</math></b>
940	$62,8 \pm 1,9$	850	4	$585,5 \pm 2,1$	$33,9 \pm 0,1$	$0,756 \pm 0,007$	$15,0 \pm 0,2$
		<b>860</b>	<b>4</b>	<b><math>585,2 \pm 1,8</math></b>	<b><math>33,9 \pm 0,1</math></b>	<b><math>0,765 \pm 0,005</math></b>	<b><math>15,2 \pm 0,1</math></b>
		870	4	$584,1 \pm 0,7$	$33,9 \pm 0,2$	$0,762 \pm 0,004$	$15,1 \pm 0,1$
		<b>880</b>	<b>3</b>	<b><math>583,6 \pm 0,7</math></b>	<b><math>33,7 \pm 0,2</math></b>	<b><math>0,771 \pm 0,004</math></b>	<b><math>15,2 \pm 0,1</math></b>
930	$73,8 \pm 1,6$	850	3	$588,2 \pm 0,1$	$33,9 \pm 0,0$	$0,745 \pm 0,003$	$14,9 \pm 0,1$
		860	4	$587,6 \pm 0,7$	$33,9 \pm 0,1$	$0,745 \pm 0,014$	$14,8 \pm 0,3$
		<b>870</b>	<b>5</b>	<b><math>585,3 \pm 0,7</math></b>	<b><math>33,8 \pm 0,1</math></b>	<b><math>0,758 \pm 0,007</math></b>	<b><math>15,0 \pm 0,2</math></b>
		880	3	$592,2 \pm 2,2$	$33,8 \pm 0,1$	$0,754 \pm 0,019$	$14,8 \pm 0,5$

Na Fig. 3-a observa-se que em média a tensão de circuito aberto tende a decrescer com o aumento da  $T_Q$ . Este resultado não é o esperado, pois com o aumento da  $T_Q$  a difusão de Al, nas trilhas metálicas é mais profunda e deveria aumentar a  $V_{OC}$ . Provavelmente, ocorreu contaminação das lâminas de Si no forno de esteira, com o aumento da  $T_Q$

resultando na redução da  $V_{OC}$ . Considerando o valor da temperatura de queima das pastas metálicas que resultou na melhor eficiência média, a  $V_{OC}$  média variou de 583,6 mV a 597,5 mV e tende a aumentar com o aumento da temperatura de difusão de boro, devido a formação do campo retrodifusor mais profundo entre as trilhas metálicas. Da Fig. 3-b nota-se que a densidade de corrente de curto-circuito é pouco afetada pela temperatura de queima das pastas metálicas. Na Fig. 3-c observa-se que o fator de forma médio variou de 0,717 a 0,772 e em geral os menores valores ocorreram para a menor  $T_Q$  de 850 °C. Esta variação do fator de forma é maior que a esperada e, provavelmente, deve-se a problemas no processo de deposição por serigrafia das malhas metálicas. Comparando-se a Fig. 3-c com a Fig. 3-d verifica-se que o comportamento da eficiência em função da temperatura de queima foi definido pelo comportamento do fator de forma.

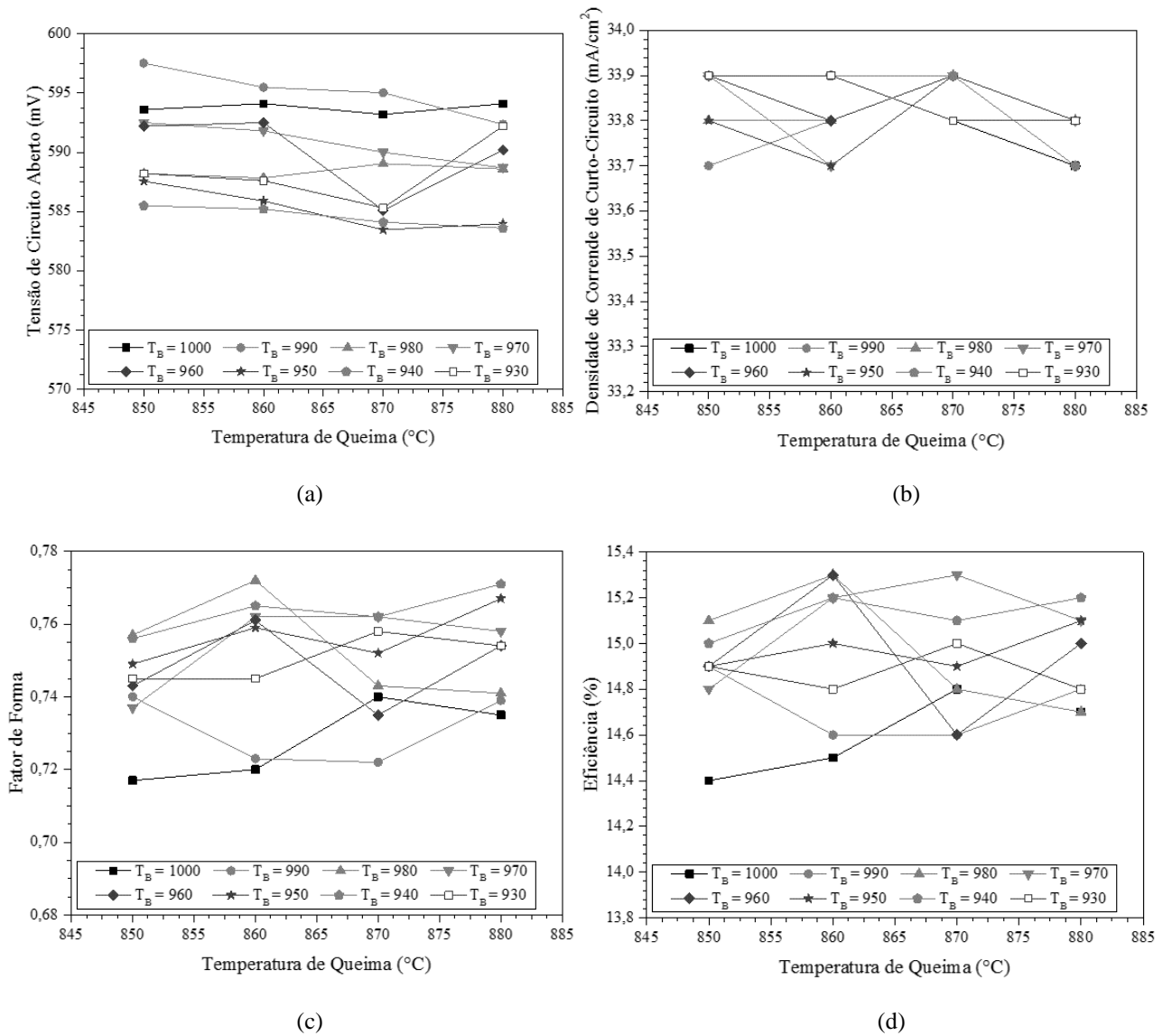


Figura 3 - Valores médios (a) da tensão de circuito aberto, (b) da densidade de corrente de curto circuito, (c) do fator de forma e (d) da eficiência das células solares em função da temperatura de queima das pastas metálicas para diferentes temperaturas de difusão de boro.

### 3.2. Influência da Temperatura de Difusão de Boro

Os parâmetros elétricos das melhores células solares com campo retrodifusor seletivo de boro e alumínio em função da temperatura de difusão de boro são apresentados na Tab. 2 e na Fig. 4.

Como observamos a partir dos resultados apresentados na Tab. 2, confirmou-se que a temperatura de queima que resulta nas melhores eficiências tende a aumentar com a diminuição da temperatura de difusão de boro. A maior eficiência foi de 15,7 % e ocorreu para a temperatura de difusão de boro de 960 °C e temperatura de queima de 880 °C. Neste caso, a resistência de folha da região dopada com boro foi de  $(54 \pm 7) \Omega/\square$ .

Na Fig. 4-d, nota-se que para a temperatura de difusão de boro entre 950 °C e 970 °C, a eficiência foi de 15,6 % - 15,7 %. Confirma-se que a tensão de circuito aberto tende a aumentar com a temperatura de difusão de boro, como indica a Fig. 4-a, pois a maior profundidade da dopagem com boro entre as trilhas metálicas aumenta a  $V_{OC}$ . Não se

nota uma influência da temperatura de difusão de boro na densidade de corrente de curto-circuito, conforme se pode ver na Fig. 4-b. O intervalo de variação da  $J_{SC}$  foi de somente de 33,6 mA/cm<sup>2</sup> a 33,9 mA/cm<sup>2</sup>. Da Fig. 4-c, observa-se que os maiores valores do fator de forma, de 0,78 – 0,79, foram obtidos no intervalo da temperatura de difusão de boro de 950 °C a 970 °C.

Tabela 2. Parâmetros elétricos das células solares com maior eficiência e com campo retrodifusor seletivo de boro e alumínio em função da temperatura de difusão de boro.

$T_B$ (°C)	$R_{\square}$ ( $\Omega/\square$ )	$T_Q$ (°C)	$V_{oc}$ (mV)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
1000	21,8 ± 0,5	870	593,4	33,6	0,744	14,8
990	23,0 ± 1,8	880	593,5	33,9	0,751	15,1
980	36,7 ± 1,1	860	588,7	33,8	0,775	15,4
970	43,2 ± 1,7	850	592,6	33,8	0,780	15,6
960	53,8 ± 6,7	880	590,7	33,7	0,787	15,7
950	55,8 ± 2,0	880	585,8	33,7	0,788	15,6
940	62,8 ± 1,9	880	583,3	33,8	0,774	15,3
930	73,8 ± 1,6	880	585,6	33,8	0,771	15,3

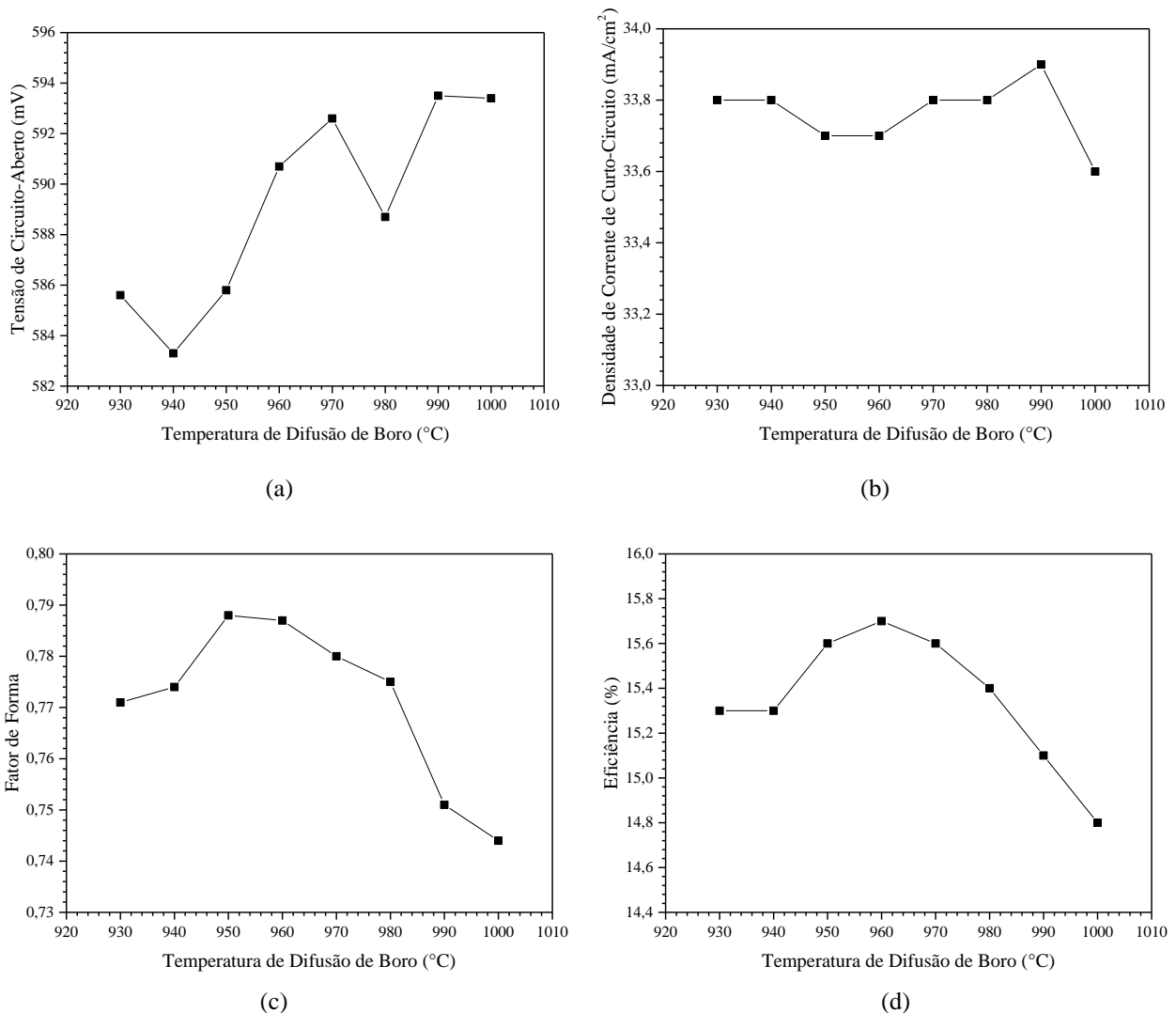


Figura 4 – Valores (a) da tensão de circuito aberto, (b) da densidade de corrente de curto circuito, (c) do fator de forma e (d) da eficiência das melhores células solares em função da temperatura de difusão de boro.

#### 4. CONCLUSÕES

Células solares com campo retrodifusor seletivo de boro e alumínio evitam o abaulamento e possibilitam a passivação na face posterior, que aumenta a eficiência dos dispositivos. Com a otimização experimental da temperatura de queima das pastas metálicas, constatou-se que, a melhor eficiência média, de  $(15,3 \pm 0,1) \%$ , foi obtida para a temperatura de queima das pastas metálicas de  $860 \text{ }^\circ\text{C} - 870 \text{ }^\circ\text{C}$  e ocorreu para a temperatura de difusão de boro no intervalo de  $960 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $980 \text{ }^\circ\text{C}$ . Para o intervalo avaliado, a variação da eficiência em função da temperatura de queima foi inferior a  $0,9 \%$  (absoluto). O fator de forma foi o parâmetro que mais afetou a eficiência tanto para o caso da avaliação da influência da temperatura de queima quanto para a influência da temperatura de difusão de boro. A densidade de corrente de curto-circuito praticamente não foi afetada pela temperatura de queima das pastas metálicas e pela temperatura de difusão de boro. A melhor eficiência, de  $15,7 \%$ , foi obtida para a temperatura de difusão de boro de  $960 \text{ }^\circ\text{C}$ , que resultou na resistência de folha de boro de  $(54 \pm 7) \Omega/\square$ , e temperatura de queima de  $880 \text{ }^\circ\text{C}$ . Observou-se uma tendência de aumento da tensão de circuito aberto com o aumento da temperatura de difusão de boro. A melhor temperatura de queima das pastas metálicas tende a aumentar com a diminuição da temperatura de difusão de boro. Considerando o valor de  $T_Q$  que resultou na melhor eficiência, a tensão de circuito aberto média variou de  $583,3 \text{ mV}$  a  $593,5 \text{ mV}$  e o fator de forma variou de  $0,744$  a  $0,788$ .

#### 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, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

#### REFERÊNCIAS

- Cornagliotti, E., Uruena, A., Hallam, B., Tous, L., Russel, R., Duerinckx, F., Szlufcik, J. 2015. Large área p-type PERL cells featuring local p<sup>+</sup> BSF formed by laser processing of ALD Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> layers. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. vol. 138. pp. 72–79
- Costa, R. C. Desenvolvimento de Processos Industriais de Fabricação de Células Solares Bifaciais em Silício Cz, Dissertação de Mestrado, PGETEMA, PUCRS, Porto Alegre. 2009. 100p.
- Duran, C., Eisele, S., Buck, R., Kopecek, R., Köhler, J. R., Werner, J. H. 2009. Bifacial Solar Cells with Selective B-BSF Laser Doping. In: Proc. 24<sup>th</sup> European Photovoltaics Solar Energy Conference. pp. 1775-1778.
- Fath, P., Keller, S., Winter, P., Jooss, W., Herbst, W. 2009. Status and Perspective of Crystalline Silicon Solar Cell Production. In: Proc. 34<sup>th</sup> European Photovoltaics Solar Energy Conference. pp. 2471-2476.
- Goodrich, A., Hacke, P., Wang, Q., Sopori, B., Margolis, R., James, T. L., Woodhouse, M. 2013. A wafer-based monocrystalline silicon photovoltaics road map: Utilizing known technology improvement to opportunities for further reductions in manufacturing costs. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 114, pp. 110–135.
- Kern, W. (1993). *Handbook of Semiconductor Wafer Cleaning Technology*, New Jersey, Noyes Publications.
- Moehlecke, A., Zanesco, I. Em: Caderno de Altos Estudos 10. Energia Solar Fotovoltaica no Brasil: Situação Atual e Perspectivas para Estabelecimento de Indústrias Apoiadas em Programas de P&D e Financiamento. Brasília, 2012. p.193-202.
- Moehlecke, A., Osório, V. C. O., Zanesco, I. 2014. Analysis of thin Bifacial Silicone Solar Cells with Locally Diffused and Selective Back Surface Field. *Scielo Materials Research*, vol. 17, n. 5. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/1516-1439.294614>>. Acesso em: 20 agosto 2015.
- Moon, I. et. al. Selective emitter using porous silicone for crystalline silicone solar cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, n. 93, pp. 846–850, 2009.
- Rahman, M. Z. 2012. Status of Selective Emitters for Type-p c-Si Solar Cells. *Optics and Photonics Journal*, Bangladesh, vol. 2, n. 2, pp. 129-134. Disponível em: <<http://www.scirp.org/journal/opj/>>. Acesso em: 01 maio 2015.
- REN21's – Renewables 2017: Global Status Report, Key Findings 2017. *Solar Photovoltaics (PV)*. pp. 66-72. Disponível em: <<http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/>>. Acesso em: 07 de dezembro de 2017.
- REN21's – Renewables 2015: Global Status Report, Key Findings 2015. *Solar Photovoltaics (PV)*. pp. 58-63. Disponível em: <<http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/>>. Acesso em: 20 de outubro de 2015.
- Yang, L. et al., 2011. High efficiency screen-printed bifacial solar cells on monocrystalline CZ silicon, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 19, pp. 275-279.
- Zanesco, I., Moehlecke, A. 2012. Development of Silicon Solar Cells and Photovoltaic Modules in Brazil: Analysis of a Pilot Production, *Materials Research*, vol. 15, pp. 581-588.
- Zanesco, I., Gonçalves, V., Moehlecke, A. 2014. Influence of the aluminum paste surface density on the electrical parameters of silicon solar cells. *Energy procedia*, vol.57, p. 47-55.

## DEVELOPMENT OF THE ALUMINUM AND BORON SELECTIVE BACK SURFACE FIELD IN SILICON SOLAR CELLS

**Abstract.** *The typical solar cells of the industry are fabricated with frontal emitter formed by phosphorus diffusion and a homogeneous back surface field performed by aluminum paste, that causes the bowing of the solar cells. The boron and aluminum selective back surface field avoids the bowing. The goal of this paper is to present the development of the boron and aluminum selective back surface field in industrial solar cells processed in solar grade Si-Cz wafers. The firing temperature of the metal pastes and the boron diffusion temperature were optimized. In order to perform the selective back surface field, the boron diffusion was implemented in all rear face of the silicon wafer and the aluminum paste was deposited by screen printing, only in the metal fingers. The average sheet resistance of the phosphorus emitter was  $56.4 \Omega/\square$  and in the region of the back surface field doped with boron, the sheet resistance ranged from  $21.8 \Omega/\square$  to  $73.8 \Omega/\square$ . The firing temperature of the metal pastes ( $T_D$ ), that forms the selective back surface field in the metal fingers, was ranged from  $850^\circ\text{C}$  to  $880^\circ\text{C}$ . The  $T_D$  that leads to the best average efficiency was  $860^\circ\text{C}$  -  $870^\circ\text{C}$  and the efficiency ranged less than  $0.9\%$  (absolute). The higher fill factor caused the higher average efficiency of  $15.3\%$ . The short-circuit current density was not affected by the  $T_D$  and by the boron diffusion temperature. The higher efficiency, of  $15.7\%$ , was obtained with boron diffusion temperature of  $960^\circ\text{C}$  and  $T_D$  of  $880^\circ\text{C}$  and the open circuit voltage tends to increase with the increasing of the boron diffusion temperature.*

**Key words:** *Solar Cells, Boron and Aluminum Selective Back Surface Field, Firing Temperature of the Metal Pastes.*