

## Desenvolvimento de células solares $n^+np^+$ em lâminas de silício de 100 $\mu\text{m}$ de espessura

Development of  $n^+np^+$  solar cells in 100  $\mu\text{m}$  thick silicon wafers

Adriano Moehlecke<sup>1</sup>, Tatiana Lisboa Marcondes<sup>1</sup>, Izete Zanescos<sup>1</sup>  
Taila Cristiane Policarpi Alves Machado<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Núcleo de Tecnologia em Energia Solar – NT-Solar – Faculdade de Física – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais – PUCRS – Av. Ipiranga, 6681- Prédio 96A – Porto Alegre – RS – CEP 90619-900  
e-mail: moehlecke@pucrs.br, tatiana\_marcondes@yahoo.com.br, izete@pucrs.br, taila.machado@acad.pucrs.br

### RESUMO

No custo de produção de uma célula solar, a lâmina de silício representa da ordem de 50 % do valor final do dispositivo. Para reduzir os custos, vem sendo proposta a diminuição das espessuras atuais de 180-200  $\mu\text{m}$  para 100-120  $\mu\text{m}$ . Embora o silício tipo p seja o mais usado na fabricação de células solares, este material é suscetível à degradação devido à interação boro-oxigênio. Os dispositivos fabricados em lâminas de Si tipo n, dopadas com fósforo não apresentam tal degradação e têm potencial de obtenção de altas eficiências devido ao maior tempo de vida dos portadores de carga minoritários. O objetivo deste trabalho é apresentar o desenvolvimento de células solares  $n^+np^+$  fabricadas sobre lâminas de silício Cz (Czochralski) com 100  $\mu\text{m}$  de espessura. Foram fabricados dispositivos finos com a estrutura  $n^+np^+$  e comparados com os dispositivos  $n^+pp^+$  fabricados em lâminas convencionais. A eficiência média alcançada foi de  $(14,6 \pm 0,4)$  % e o dispositivo mais eficiente atingiu 15,3 %. O maior valor de eficiência ficou abaixo do obtido com estruturas  $n^+pp^+$  de 200  $\mu\text{m}$  de espessura, quando atingiu-se uma eficiência de 16,2 %. O principal parâmetro que reduziu a eficiência das células finas foi o fator de forma, que alcançou um valor máximo de 0,748. Embora a eficiência seja menor com as lâminas finas, obteve-se uma baixa relação massa/potência, de 1,5 g/W, valor que é aproximadamente 53 % inferior ao obtido quando foram usadas lâminas espessas tipo p.

**Palavras-chave:** Células solares; Lâminas de silício finas; Silício tipo n.

### ABSTRACT

In the solar cell production cost, the silicon wafer represents roughly 50 % of the final value of the device. To lower the costs, the reduction of the current wafer thickness from 180-200  $\mu\text{m}$  to 100-120  $\mu\text{m}$  has been proposed. Although the p-type silicon is used to manufacture solar cells, it is susceptible to degradation due to boron-oxygen interaction. The devices manufactured in n-type silicon wafers doped with phosphorus do not present such degradation and has the potential of achieving higher efficiencies due to the larger minority charge carrier lifetime. The aim of this work is to present the development of  $n^+np^+$  solar cells fabricated in Cz silicon wafers 100  $\mu\text{m}$  thick. Thin devices were manufactured with the  $n^+np^+$  structure and compared to  $n^+pp^+$  devices manufactured in standard thick wafers. The average efficiency of  $(14.6 \pm 0.4)$  % was achieved and the most efficient device reached 15.3%. The efficiency was lower than obtained with  $n^+pp^+$  thick devices, which presented 16.2 %. The main parameter that reduced the efficiency of thin cells was the fill factor, which reached a maximum value of 0.748. Although the efficiency reached by thin n-type devices was worse than thick p-type ones, the former achieved a low mass/power ratio of 1.5 g/W, which is approximately 53 % lower than that obtained from thick p-type devices.

**Keywords:** Solar cells, Thin silicon wafers; n-type silicon.

### 1. INTRODUÇÃO

Do mercado atual de células solares, mais de 90 % é devido aos dispositivos fabricados em lâminas de silício cristalino [1]. As indústrias atingiram elevados níveis de produção anuais da ordem de gigawatts, ou seja, 200 milhões de dispositivos de 156 mm x 156 mm por ano são produzidos em plantas automatizadas. A maioria

destas células solares é fabricada em lâminas de silício tipo p, dopadas com boro, com estrutura  $n^+pp^+$  e região  $p^+$  formada por pasta de alumínio e difusão em forno de esteira.

No custo de produção, a lâmina de silício representa da ordem de 50 % do valor final da célula solar [1-2] e por esta razão vem sendo proposta a diminuição das espessuras atuais de 180-200  $\mu\text{m}$  para 100-120  $\mu\text{m}$ . Por exemplo, o relatório “International Technology Roadmap for Photovoltaic” (ITRPV), edição de 2015 [1], prevê que para 2025 as lâminas de silício monocristalino deverão ter espessuras da ordem de 120  $\mu\text{m}$  e que a espessura de 100  $\mu\text{m}$  será o valor limite para a tecnologia de fabricação de células solares. Mas para serem usadas lâminas finas, a tecnologia atual com grossas camadas de Al (espessura maior que 10  $\mu\text{m}$ ) deverá ser modificada, pois a pasta de Al produz um abaulamento das lâminas no processo de queima das pastas e deste modo o uso de lâminas finas levaria a uma grande perda por quebra nos processos subsequentes [3]. O abaulamento é produzido durante o passo térmico de queima das pastas depositadas por serigrafia, sendo resultante dos diferentes coeficientes térmicos de expansão do Al e do Si. Além disto, o custo das pastas de Al e seu elevado consumo por lâmina dificultariam a queda dos custos de produção das células finas até 2025 [1].

Com silício tipo p crescido pela técnica Czochralski (Cz) e estruturas  $n^+p$  tipo PERC (*passivated emitter rear contact*), isto é, sem campo retrodifusor na face posterior e evitando-se assim a camada de alumínio, Do et al. [4] produziram células solares de 156 mm x 156 mm com eficiência de 16,8 %. Usando lâminas de silício FZ (*float zone*), tipo p, de 130  $\mu\text{m}$  de espessura, Lee e colaboradores [5] reportaram eficiências de 17,2 % para estruturas PERC e de 16,2 % para estruturas convencionais com alumínio na face posterior.

O silício tipo p, dopado com boro, é o mais usado na fabricação de células solares, mas o mesmo é suscetível a degradação devido à interação entre os átomos de boro e de oxigênio, este último presente em lingotes de silício monocristalino Czochralski (Cz) ou multicristalino [6]. Os dispositivos fabricados em lâminas de Si tipo n, dopadas com fósforo, além de não apresentarem tal degradação, tem potencial de obtenção de maior eficiência devido ao maior valor do tempo de vida dos portadores de carga minoritários e por serem menos susceptíveis a contaminação por impurezas metálicas [7]. Os dispositivos em silício tipo n podem ser classificados atualmente em quatro categorias: 1) células solares com emissor e região de campo retrodifusor ou BSF (*back surface field*), com estrutura  $p^+nn^+$  ou  $n^+np^+$ ; 2) células com estrutura  $p^+n$  e região posterior passivada, denominada de PERC (*passivated emitter rear contact*); 3) células com as regiões  $p^+$  e  $n^+$  e contatos metálicos somente na face posterior (IBC, *interdigitated back contact*); 4) células HIT (*heterojunction with intrinsic thin layer*), com camadas de silício amorfo para formar a junção pn e a passivar as superfícies [8]. Os dispositivos IBC e HIT são fabricados em nível industrial por duas empresas, atingindo eficiências máximas de 24,7 % [9], [10]. Em 2014 a empresa Panasonic anunciou a obtenção de células solares em silício n combinando as estruturas IBC e HIT, atingindo em laboratório a eficiência de 25,6 %, o maior valor alcançado com células solares de silício cristalino [11]. No entanto, estas estruturas são complexas para serem competitivas em larga escala de produção. Com estruturas simples  $p^+nn^+$ , somente uma empresa está produzindo células solares com eficiências da ordem de 19 % [12]. Estes últimos dispositivos têm a vantagem de usarem as mesmas linhas de processamento das fábricas atuais, que produzem células  $n^+pp^+$ , tendo um menor custo de implantação [8] quando comparados com as IBC e HIT.

Considerando que as células convencionais de silício cristalino tipo p apresentaram significativa redução de preços nos últimos anos, os desafios a médio prazo estarão focados no desenvolvimento de dispositivos com ótima relação custo/potência [13].

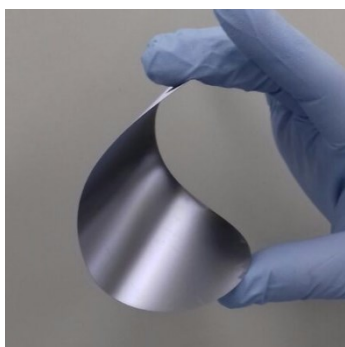
O objetivo deste trabalho é apresentar o desenvolvimento de células solares com estrutura simplificada  $n^+np^+$  fabricadas sobre lâminas de silício Cz, grau solar, com 100  $\mu\text{m}$  de espessura. Esta estrutura em silício tipo n tem a vantagem de ser semelhante às  $n^+pp^+$  industriais e por terem a região  $n^+$  frontal dopada com fósforo, podem alcançar maiores níveis de passivação de superfícies quando comparadas com as estruturas  $p^+nn^+$ . Foram obtidas lâminas finas e fabricadas e caracterizadas células solares com um processo industrial baseado na metalização por serigrafia. A região  $p^+$  posterior foi formada pela difusão de boro depositado por *spin-on* e por uma malha de Al/Ag, formando um emissor seletivo. O principal aporte do trabalho é o uso de regiões  $p^+$  seletivas na face posterior de lâminas finas (de 100  $\mu\text{m}$ ) de silício tipo n.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

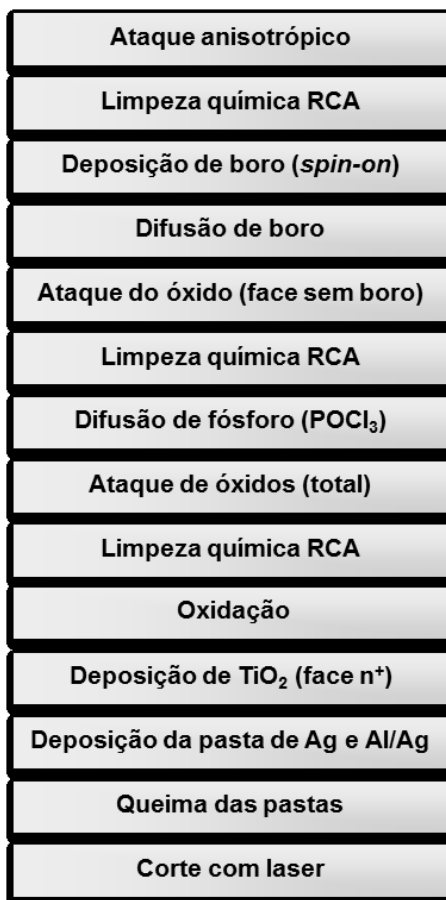
As lâminas de 100  $\mu\text{m}$  de espessura não existem no mercado e foi necessária a redução da espessura de lâminas convencionais de 180 – 220  $\mu\text{m}$  por ataque químico. Foram utilizadas lâminas de silício monocristalino Cz, grau solar, tipo n, dopadas com fósforo, resistividade de 1-20  $\Omega\cdot\text{cm}$ , com 4” de diâmetro, adquiridas no mercado internacional. As lâminas texturadas foram separadas em quatro grupos de lâminas, com espessuras de 185  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$ , 210  $\mu\text{m}$  e 220  $\mu\text{m}$ . Para reduzir a espessura, as lâminas foram submetidas a um ataque

químico em solução de hidróxido de potássio (KOH) e água deionizada (1600 mL) na temperatura de 80 °C. Variou-se a quantidade de KOH de 50 g a 100 g e o tempo de exposição ao ataque químico de 7 min a 40 min, intervalos definidos baseando-se em trabalhos anteriores realizados no NT-Solar/PUCRS [14-15]. Mediu-se a espessura inicial e final das lâminas com um micrometro digital em quatro pontos das mesmas. Ajustou-se o tempo de ataque químico e de texturação para obtenção da espessura final da lâmina de 100 µm. A Figura 1 mostra uma lâmina fina produzida.

A Figura 2 apresenta um diagrama do processo de fabricação das células solares n<sup>+</sup>np<sup>+</sup>. Para fabricação de células solares, inicialmente as lâminas passam por um ataque anisotrópico (etapa de texturação) das superfícies em um banho de KOH, isopropanol e água deionizada (H<sub>2</sub>O<sub>DI</sub>), que possibilita reduzir a refletância das mesmas de 33 % para 11 %. Depois, é realizada uma limpeza das lâminas em soluções RCA baseadas em H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:NH<sub>4</sub>OH: H<sub>2</sub>O<sub>DI</sub> (RCA1) e H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:HCl: H<sub>2</sub>O<sub>DI</sub> (RCA2).



**Figura 1:** Lâmina fina de silício monocristalino utilizada na produção das células solares.



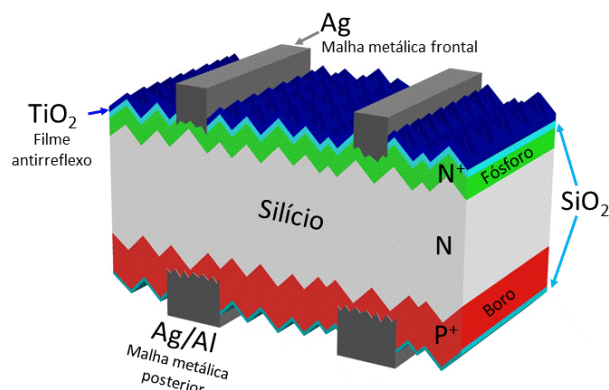
**Figura 2:** Diagrama do processo de fabricação utilizado para produzir as células solares n<sup>+</sup>np<sup>+</sup>.

Para dopagem da região  $p^+$ , são depositadas gotas do dopante sobre uma das superfícies da lâmina com a impureza em alta concentração que se deseja difundir. Neste trabalho, foi usado o dopante PBF20, da empresa Filmtronics, que contém boro. Utilizando um *spinner*, o líquido é espalhado na superfície da lâmina e depois os solventes são evaporados em uma estufa. As lâminas são colocadas em um forno com tubo de quartzo para realização do processo de difusão de boro, formando-se a região  $p^+$  da célula solar  $n^+np^+$ . Este processo foi realizado na temperatura de 970 °C [16]. O óxido formado na face sem boro foi extraído por ataque químico baseado em HF e as lâminas foram novamente limpas com a solução RCA2. O silicato de boro que permanece em uma das faces atua como protetor durante o seguinte passo de difusão [17].

Na sequência, as lâminas foram introduzidas em forno de tubo de quartzo para a difusão de fósforo, usando  $POCl_3$  como fonte, processo realizado a 845 °C [18]. Nesta etapa, formou-se a região  $n^+$  da célula solar  $n^+np^+$ . Depois da extração dos óxidos e silicatos de boro e fósforo em solução baseada em HF e posterior limpeza com a solução RCA2, as lâminas foram introduzidas em forno de tubo de quartzo para crescimento térmico de óxido de silício a 800 °C [19] com o objetivo de reduzir a recombinação nas superfícies da lâmina (passivação de superfícies). O óxido obtido tem espessura da ordem de 50 nm na face  $n^+$  e 10 nm na face  $p^+$ . Sobre a face  $n^+$  (frontal) foi depositado um filme antirreflexo (AR) de  $TiO_2$  para reduzir a reflexão.

A metalização por serigrafia está baseada em pastas de prata para a face  $n^+$  e pastas de prata/alumínio para a face  $p^+$ . As pastas foram depositadas por serigrafia e foram secadas em forno de esteira. Depois as lâminas foram levadas novamente ao forno para uma "queima" final das pastas, com temperaturas de queima ( $T_{Queima}$ ) de 860 °C e 870 °C, para estabelecer o contato elétrico com o silício. Estas temperaturas foram selecionadas tendo em vista os resultados de um trabalho anterior relativo a células solares com lâminas de espessura da ordem de 145  $\mu m$  [15].

Como o fósforo pode entrar nas laterais das lâminas e gerar problemas de curto-circuito, as bordas foram cortadas com um equipamento de corte laser. As células solares têm formato pseudo-quadrado, com arestas de 80 mm e área de 61,58  $cm^2$ . A Figura 3 apresenta a estrutura da célula solar obtida ao final do processamento.



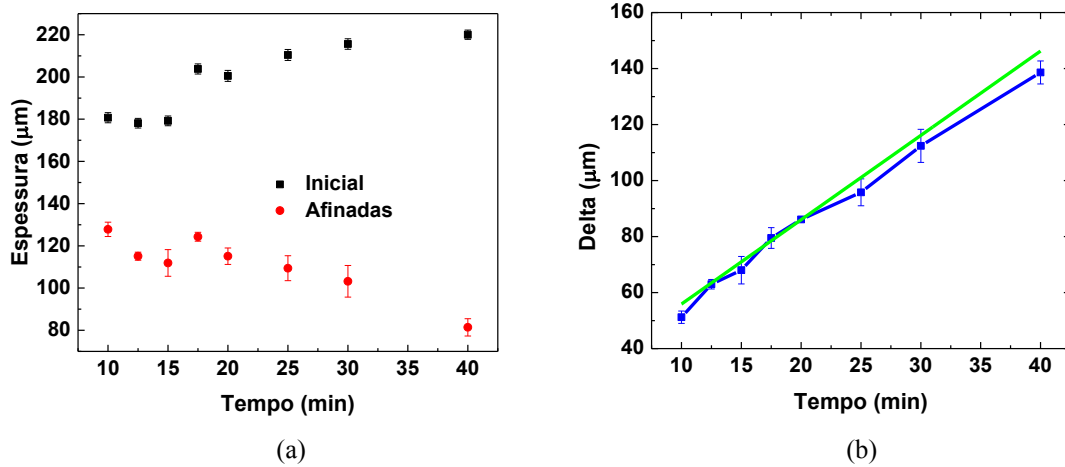
**Figura 3:** Estrutura da célula solar  $n^+np^+$ , destacando as regiões  $n^+$  e  $p^+$ , filmes de  $SiO_2$  e  $TiO_2$  e contatos metálicos.

Para caracterizar as células fotovoltaicas, foram medidas as características elétricas sob condições padrão: irradiância de 100  $mW/cm^2$ , espectro AM1,5G e temperatura da célula solar de 25 °C. Além da curva característica I-V, mediu-se a resposta espectral (SR) e a refletância das células solares fabricadas, permitindo a determinação da eficiência quântica interna (EQI) dos dispositivos.

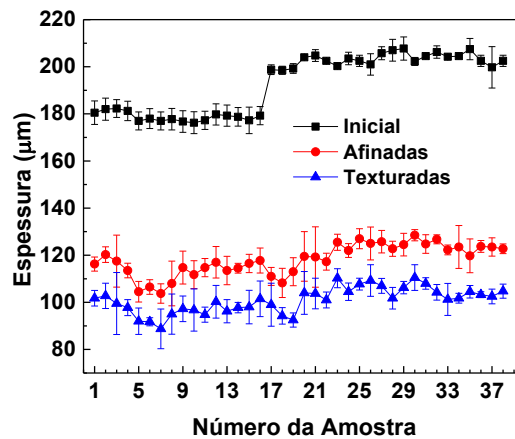
### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizados testes de afinamento com duas soluções, uma com 50 g e outra com 100 g de KOH. Os primeiros testes com a solução de 50 g demonstraram que o processo era lento, sendo que em 30 min de ataque a espessura foi reduzida de 220  $\mu m$  para 160  $\mu m$ . Optou-se por usar a maior concentração e, na Figura 4.a, pode-se observar os valores das espessuras iniciais e das lâminas afinadas, segundo o tempo de ataque químico. Pode-se constatar que o processo químico de afinamento não foi homogêneo, pois a dispersão na medida de espessura chegou, em alguns casos, a 10  $\mu m$ . A Figura 4.b mostra a diferença entre a espessura inicial e a final após o processo de afinamento, denominada de "delta". Observa-se que a taxa de ataque tende a diminuir com o tempo, pois os pontos se afastam do ajuste linear.

Na Figura 5 são apresentados os valores de espessura inicial, após o afinamento e depois do processo de texturação para 38 lâminas. Consta-se que o processo de texturação reduz em aproximadamente 20  $\mu\text{m}$  a espessura das lâminas e deve ser contabilizado no processo completo de obtenção de lâminas finas.



**Figura 4:** (a) Espessuras inicial e final das lâminas de silício em função do tempo de ataque em uma solução com 100 g de KOH e (b) variação de espessura (delta) em função do tempo de ataque. A reta verde é um ajuste linear. As barras de erros representam o desvio padrão da medida de espessura em quatro pontos das lâminas de silício.



**Figura 5:** Espessura inicial de lâminas de silício e após os processos de afinamento (100 g de KOH) e de texturação. O tempo de ataque foi ajustado segundo a espessura inicial. Foram utilizados grupos de lâminas com espessura inicial de 185  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$  e 210  $\mu\text{m}$ .

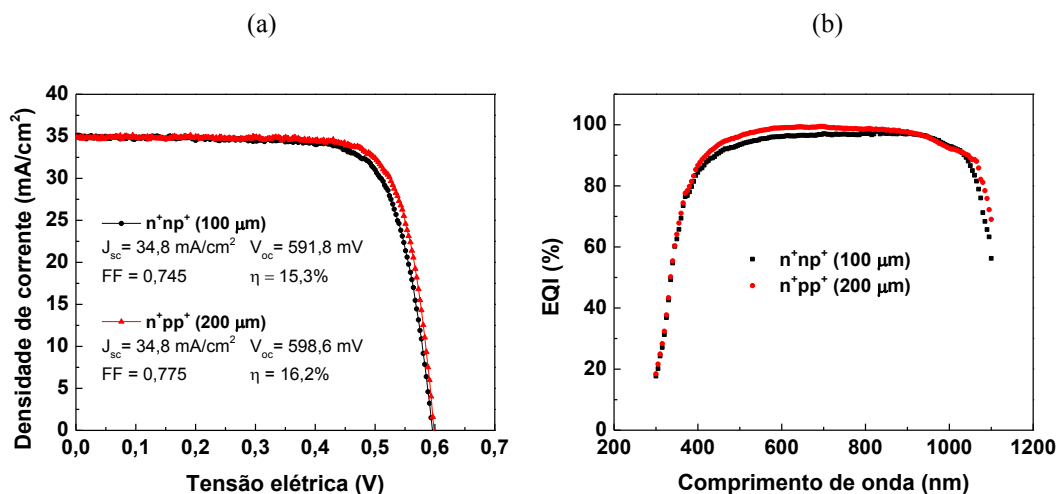
Foram fabricadas e caracterizadas 12 células solares com lâminas de 100  $\mu\text{m}$  de espessura e a Tabela 1 resume os resultados obtidos. Observa-se que o maior valor de eficiência, de 15,3 %, foi obtido para  $T_{\text{Queima}}$  de 860  $^{\circ}\text{C}$ , mas mesmo com esta temperatura, os valores do fator de forma ficaram abaixo dos normalmente obtidos em células solares de espessura convencional e metalizadas por serigrafia, que atingem valores no intervalo de 0,77 a 0,79. Isto indica que a metalização e o processo de queima deverão ser otimizados para as lâminas finas da ordem de 100  $\mu\text{m}$ . A eficiência média de todos os dispositivos foi de  $(14,6 \pm 0,4) \%$ .

A Figura 6 apresenta as características elétricas e a eficiência quântica interna da célula solar  $n^+np^+$  mais eficiente produzida neste trabalho (célula L10P8) e de uma célula  $n^+pp^+$  de espessura convencional (200  $\mu\text{m}$ ). Esta última estrutura é a típica utilizada atualmente e as regiões  $n^+$  e  $p^+$  obtidas foram similares as utilizadas nos dispositivos  $n^+np^+$ . As células finas apresentaram um menor fator de forma (FF) devido a uma menor resistência em paralelo, sendo que o FF foi o parâmetro mais importante que proporcionou a eficiência de 15,3 %, valor 0,9 % (absolutos) abaixo das células solares  $n^+pp^+$  fabricadas em lâminas espessas. O baixo valor de FF indica a necessidade de otimização do processo de queima das pastas metálicas, obtendo-se a temperatura adequada para a espessura e estrutura desenvolvida. As  $J_{\text{SC}}$  e EQI foram similares, demonstrando que a coleta de portadores de carga e a recombinação são semelhantes em ambas as estruturas. Cabe comentar que a estrutura  $n^+np^+$  tem a junção pn na face posterior e os portadores de carga gerados na superfície

frontal (relativos aos menores comprimento de onda da radiação incidente) devem percorrer toda a extensão da lâmina para serem coletados. Para ambas as estruturas, a EQI se aproxima de 100 % na faixa de comprimentos de onda de 600 nm a 800 nm, alcançando valores de 99 % para as células solares  $n^+pp^+$  e de 97 % para células finas  $n^+np^+$ , indicando uma ótima coleta de portadores de carga produzidos pelos fótons incidentes.

**Tabela 1:** Parâmetros elétricos das células solares  $n^+np^+$  desenvolvidas: densidade de corrente de curto-circuito ( $J_{sc}$ ), tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), fator de forma (FF) e eficiência ( $\eta$ ).

$T_{QUEIMA}$ (°C)	Célula	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (mV)	FF	$\eta$ (%)
860	L1P5	33,2	591,6	0,714	14,0
	L1P7	32,8	585,4	0,739	14,2
	L2P7	33,9	590,3	0,740	14,8
	L3P7	33,1	587,1	0,721	14,0
	L8P8	34,8	589,9	0,731	15,0
	L9P8	34,0	589,5	0,748	15,0
	L10P8	34,8	591,6	0,745	15,3
	Média	(33,8 ± 0,8)	(589,3 ± 2,3)	(0,73 ± 0,01)	(14,6 ± 0,5)
870	L4P7	33,5	584,4	0,716	14,0
	L6P7	34,0	582,9	0,729	14,5
	L12P8	34,1	585,5	0,737	14,7
	L13P8	34,6	585,3	0,734	14,9
	L14P8	34,9	581,3	0,711	14,4
	Média	(34,2 ± 0,6)	(583,9 ± 1,8)	(0,72 ± 0,01)	(14,5 ± 0,3)



**Figura 6:** (a) Curva característica I-V e (b) eficiência quântica interna (EQI) de células solares finas  $n^+np^+$  e espessas  $n^+pp^+$ .

Embora a célula solar  $n^+np^+$  tenha atingido menor eficiência, o consumo de silício é menor por watt produzido. Considerando-se a área de 61,58 cm<sup>2</sup> dos dispositivos e as eficiências mostradas na Figura 6, a célula solar  $n^+np^+$  produz 0,942 W e a  $n^+pp^+$  produz 0,998 W em condições padrão. A razão massa/potência da primeira é de 1,52 g/W e da segunda, 2,88 g/W. Em resumo, os dispositivos fabricados em lâminas finas utilizaram 53 % da massa de silício usado nas lâminas convencionais, produzindo a mesma potência.

#### 4. CONCLUSÕES

Foram desenvolvidas células solares  $n^+np^+$  em lâminas finas da ordem de 100  $\mu$ m, com a junção pn na face posterior e o emissor seletivo formado por difusão de boro e malha metálica de alumínio/prata. Fabricaram-se dispositivos de 15,3 % de eficiência, 0,9 % (absolutos) menor que a obtida com estruturas  $n^+pp^+$  em lâminas convencionais de 200  $\mu$ m de espessura. No entanto, mesmo com a menor eficiência, o consumo de silício por watt produzido para as células finas foi 53 % menor, o que é muito importante para a redução dos custos de

fabricação das células solares, como previsto em estudos de mercado para 2025.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelas bolsas concedidas e pelo suporte financeiro (contrato CNPq 475239/2013-0).

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] *ITRPV- International Technology Roadmap for Photovoltaics*, 2014 Results, 2015. Sixth edition. Disponível em: <http://www.itrpv.net/Reports/Downloads/>. Acesso em 04/04/2017.
- [2] GOODRICH, A., HACKE, P., WANG, Q., *et al.*, “A wafer-based monocrystalline silicon photovoltaics road map: utilizing known technology improvement opportunities for further reductions in manufacturing costs”, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, v.114, pp. 110-135, 2013.
- [3] GU, X., YU, X., XU, J., *et al.*, “Towards thinner and low bowing silicon solar cells: form the boron and aluminum co-doped back surface field with thinner metallization film”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 21, pp. 456-461, 2013.
- [4] DO, K. S., BAEK, T., KANG, M.G., *et al.*, “Experimental and simulation study for ultrathin (~100 µm) mono crystalline silicon solar cell with 156×156 mm<sup>2</sup> area”, *Metals and Materials International*, v. 20, n. 3, pp. 545-550, 2014. doi: 10.1007/s12540-014-3021-6
- [5] LEE, D.Y., LEE, H.H., AHN, J.Y., *et al.*, “A new back surface passivation stack for thin crystalline silicon solar cells with screen-printed back contacts”, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, v. 95, pp. 26–29, 2011. doi:10.1016/j.solmat.2010.05.004
- [6] SOPORI, B., BASNYAT, P., DEVAYAJANAM, S., *et al.*, “Understanding light-induced degradation of c-Si solar cells”. In: *Conference Record of the 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 1115-1120, Austin, Texas, Estados Unidos, 2012.
- [7] MACDONALD, D., GEERLIGS, L.J. “Recombination activity of interstitial iron and other transition metal point defects in p- and n-type crystalline silicon”, *Applied Physics Letters*, v. 85, n.18, pp. 4061-4063, 2004.
- [8] REHMAN, A., LEE, S.H., “Advancements in n-type base crystalline silicon solar cells and their emergence in the photovoltaic industry”, *The Scientific World Journal*, v. 2013, ID470347, 13 p. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/470347>.
- [9] COUSINS, P. J., SMITH, D. D., HSIN-CHIAO, L., *et al.*, “Generation 3: Improved performance at lower cost”. In: *Proceedings of the IEEE 35th Photovoltaic Spec. Conf.*, pp. 275-278, Honolulu, Estados Unidos, 2010.
- [10] YANO, A., TOHODA, S., MATSUYAMA, K., *et al.*, “24.7% record efficiency HIT solar cell on thin silicon wafer”. In: *Proceedings of the 28th European Photovoltaic Solar Energy Conf.*, pp. 748–751, Paris, França, 2013.
- [11] MASUKO, K., SHIGEMATSU, M., HASHIGUCHI, T., *et al.*, “Achievement of more than 25 % conversion efficiency with crystalline silicon heterojunction solar cell, *IEEE Journal of Photovoltaics*, v. 4, pp. 1433-1435, 2014.
- [12] SONG, D., XIONG, J., HU, Z., *et al.*, “Progress in n-type Si solar cell and module technology for high efficiency and low cost”. In: *Proceedings of the 38<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 3004-3008, Austin, Texas, Estados Unidos, 2012.
- [13] *ITRPV- International Technology Roadmap for Photovoltaics*, 2016 Results, 2017. Eighth edition. Disponível em: <http://www.itrpv.net/Reports/Downloads/>. Acesso em 04/04/2017.
- [14] OSÓRIO, V.C. Células solares bifaciais finas com campo retrodifusor localizado de alumínio e seletivo de boro e alumínio, Tese de doutorado, PGETEMA/PUCRS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2012.
- [15] CAMPOS, R.C. *Desenvolvimento e comparação de células solares finas com estruturas p<sup>+</sup>nn<sup>+</sup> e n<sup>+</sup>np<sup>+</sup>*, Dissertação de mestrado, PGETEMA/PUCRS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2014.
- [16] CRESTANI, T., ZANESCO, I., MOEHLECKE, A., *et al.*, “Desenvolvimento do campo retrodifusor seletivo de alumínio e boro em células solares de silício”, In: *VI Congresso Brasileiro de Energia Solar*, pp. 1-8, Belo Horizonte, Abril. 2016.

[17] ZANESCO, I., MOEHLECKE, A. “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, Nov. 30, 2012.

[18] ZANESCO, I., MOEHLECKE, A., *Desenvolvimento de tecnologias industriais de fabricação de células solares e módulos fotovoltaicos*, In: Relatório Final de Projeto FINEP, Convênio FINEP 01.080635.00, ref 1359/08, 2012.

[19] ZANESCO, I., MOEHLECKE, A., “Analysis of the silicon dioxide passivation and forming gas annealing in silicon solar cells”, In: *ISES Solar World Congress*, pp. 1-9, Daegu, Coreia do Sul, Nov. 2015.