

# CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DE UM FORNO PARA FABRICAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES

Sérgio Boscato Garcia <sup>1</sup>

Adriano Moehlecke <sup>2</sup>

Izete ZanESCO <sup>3</sup>

## Resumo

A indústria de células solares vem apresentando significativos índices de crescimento e envolve uma vasta gama de fornecedores de equipamentos específicos como os fornos de difusão, necessários para a formação da junção pn na fabricação dos dispositivos de silício. O objetivo deste trabalho é apresentar a análise térmica e a caracterização das difusões realizadas no primeiro forno de difusão desenvolvido e fabricado no Brasil. Os perfis de temperatura, longitudinal e radial ao tubo, foram medidos e analisados. Os resultados da caracterização definem uma zona de processamento de 200 mm com variação inferior a 6°C para temperaturas de até 965°C, sendo possível processar 40 lâminas de silício. Foram realizados processos de difusão em lâminas de silício monocristalino e obtiveram-se regiões n<sup>+</sup>, dopadas com fósforo, com resistência de folha com desvio padrão um pouco acima do obtido em fornos comerciais importados. Não se observou contaminação das lâminas nos processos de difusão e, inclusive, houve uma melhora do tempo de vida dos portadores de carga minoritários.

**Palavras-chave:** Forno de difusão; Célula solar; Caracterização térmica.

## CHARACTERIZATION AND ANALYSIS OF A FURNACE TO FABRICATE SOLAR CELLS

### Abstract

The solar cell industry has presented high growth rates and dealt with a large portfolio of suppliers for specific equipments like diffusion furnaces needed to produce the pn junction in the fabrication of silicon devices. The aim of this paper is to present the thermal analysis and the characterization of diffusions carried out in the first diffusion furnace developed and fabricated in Brazil. Longitudinal and radial temperature profiles were measured and analyzed. Results of the characterization defined a processing zone of 200 mm with temperature variation lower than 6°C for the temperatures up to 965°C. In the processing zone, 40 silicon wafers can be processed. Diffusion processes were performed in monocrystalline silicon wafers and n<sup>+</sup> regions doped with phosphorus presented standard deviation of sheet resistance slightly higher than that obtained in imported commercial furnaces. Wafer contamination was not observed during diffusion processes and the minority carrier lifetime was improved.

**Key words:** Diffusion furnace; Solar cell; Thermal characterization.

---

<sup>1</sup>Engenheiro Mecânico, Doutorando. Engenharia e Tecnologia de Materiais, Programa de Pós-graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais – PGETEMA, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUCRS, Av. Ipiranga, 6681, Partenon, Cep 90619-900, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: sergio.garcia@pucrs.br

<sup>2</sup>Físico, Doutor em Engenharia, Professor da Faculdade de Física – Fafis e do Programa de Pós-graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais – PGETEMA, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUCRS, Coordenador do NT-Solar da Faculdade de Física da PUCRS, Av. Ipiranga, 6681, Partenon, Cep 90619-900, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: moehlecke@pucrs.br

<sup>3</sup>Física, Doutora em Engenharia, Professora da Faculdade de Física – Fafis e do Programa de Pós-graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais – PGETEMA, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUCRS, Coordenadora do NT-Solar/FAFIS/PUCRS, Av. Ipiranga, 6681, Partenon, Cep 90619-900, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: izete@pucrs.br

## I INTRODUÇÃO

O crescimento da indústria mundial de células solares é evidenciado por uma produção de 37 GW em 2011, que representou um aumento de 36% em relação ao ano de 2010.<sup>(1)</sup> Essa indústria envolve de forma direta e indireta uma vasta gama de fornecedores de equipamentos de produção e caracterização. Neste contexto, salienta-se a necessidade de fornos de difusão de dopantes para formar a junção pn nos dispositivos fotovoltaicos, etapa fundamental para fabricação de células solares de silício. Basicamente, os processos de difusão consistem na introdução de elementos dopantes nas lâminas de silício em elevadas temperaturas e em ambientes controlados.

Existem diversos países que desenvolvem e fabricam fornos de difusão ao redor do mundo. No Brasil, o primeiro forno de difusão desenvolvido foi apresentado por Garcia, Moehlecke e ZanESCO.<sup>(2)</sup> O referido forno possui a capacidade para processar lâminas de silício com dimensões de até 156 mm × 156 mm, padrão atual da indústria de células solares, em temperaturas de até 1.100°C. O equipamento é composto principalmente por um sistema de aquecimento por resistores elétricos com três zonas térmicas, câmara de processamento tubular de quartzo, sistema de carregamento retrátil, “armário de gases” com controle da vazão e armazenamento da fonte líquida de dopante e sistema de controle automatizado. Para introduzir o equipamento no mercado, se faz necessária a comprovação da sua capacidade e da sua qualidade de processamento.

A caracterização de fornos de difusão pode ser realizada por meio da caracterização térmica e da qualidade dos processos de difusão. A caracterização térmica consiste em avaliar o sistema de aquecimento do forno com a medição da temperatura no interior da câmara de processamento, obtendo-se os perfis de distribuição térmica radial e longitudinal aos quais as lâminas de silício são submetidas durante os processos. A obtenção do perfil térmico longitudinal é importante para a determinação da posição e extensão da zona de processamento. Da mesma forma, a determinação da distribuição térmica radial é importante para identificar o comportamento do sistema de aquecimento quanto à uniformidade em diferentes seções transversais do tubo.

Para caracterizar um forno quanto à uniformidade dos processos de difusão, é necessária a execução de difusões em lâminas de silício. Deste modo, é possível verificar a uniformidade térmica - longitudinal e radial - no interior da câmara de processamento, bem como o funcionamento do sistema de controle da vazão de gases e inserção do dopante no interior do tubo, pois estes têm influência direta na uniformidade da dopagem nas lâminas de silício. Um método muito utilizado para a análise da difusão em lâminas de silício é a medição da resistência de folha.

O objetivo deste trabalho é apresentar a caracterização e análise do primeiro forno de difusão desenvolvido e fabricado no Brasil, avaliando o comportamento térmico no interior da câmara de processamento bem como a uniformidade da dopagem. Além disto, verificou-se se os processos de difusão contaminam ou melhoram a qualidade das lâminas de silício processadas mediante a medida do tempo de vida dos portadores de carga minoritários.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

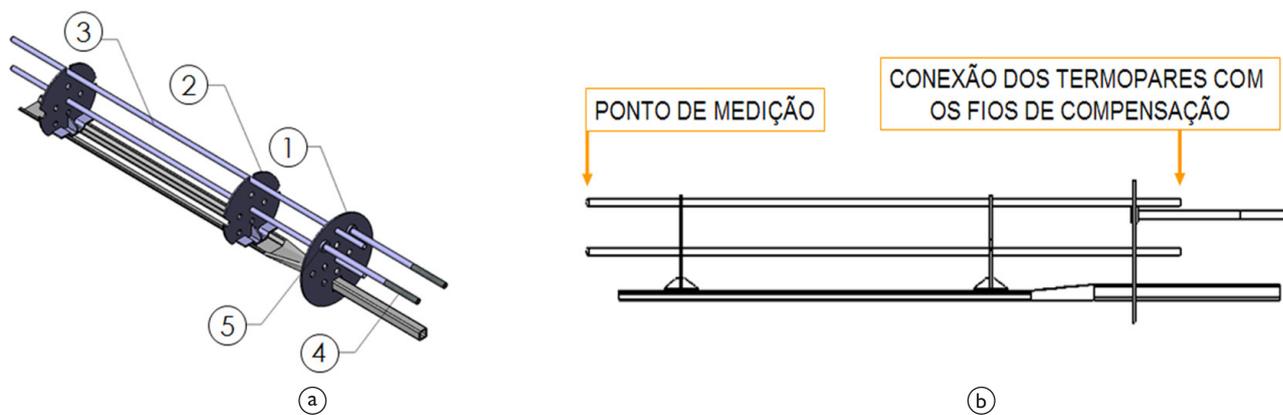
### 2.1 Caracterização Térmica

Para realizar a caracterização térmica da câmara de processamento do forno, com a determinação das rampas de aquecimento e resfriamento e dos perfis de temperatura longitudinal e radial ao tubo, foi necessária a introdução de sensores em seu interior. Desta forma, o método aplicado consistiu em inserir termopares no interior do tubo de quartzo e movimentá-los com a utilização do sistema de carregamento do forno, e realizar medições em diversas seções transversais ao longo do eixo longitudinal do tubo de quartzo durante os ciclos térmicos.

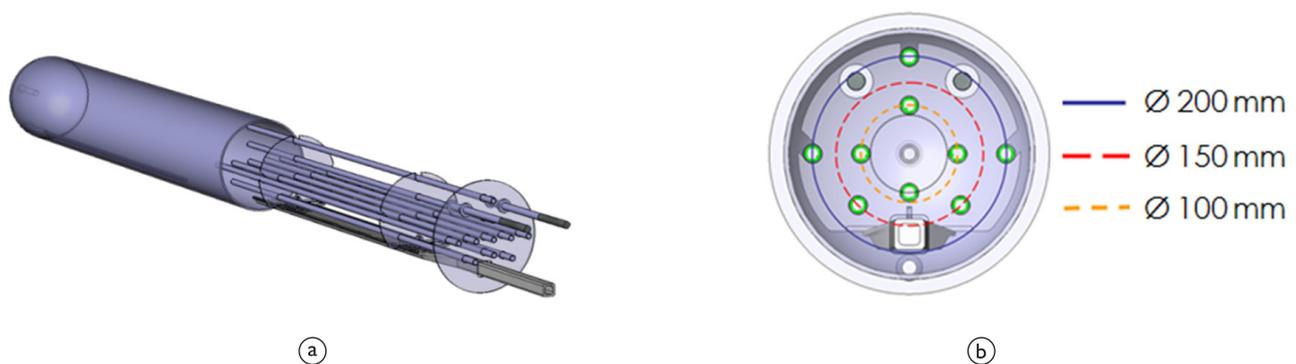
Sensores como os termopares são compostos por metais que representam riscos de contaminação do forno se inseridos na câmara de processamento, sobretudo em temperaturas elevadas. A solução comumente aplicada quando é necessário posicionar termopares no interior de câmaras de processamento em fornos de difusão é a utilização de bainhas de quartzo. Deste modo, foi projetado e fabricado um conjunto de componentes de quartzo para posicionar os termopares no interior do tubo utilizando o sistema de carregamento do forno.

O principal componente do sistema de carregamento do forno é uma espátula de SiC, na qual os suportes de quartzo são posicionados e, contendo as lâminas de silício, são transportados para o interior da câmara de processamento. Foram projetados suportes de quartzo para as bainhas de quartzo, que contêm os termopares em diferentes raios em relação ao centro do tubo, como mostra a Figura 1. Estes suportes de quartzo encaixam-se no perfil da espátula de SiC.

Os itens 1, 2 e 3 da Figura 1a correspondem, respectivamente, à tampa de quartzo, aos discos de apoio e às bainhas para os termopares e os itens 4 e 5 são as hastes e os anéis de sustentação da tampa do sistema de carregamento padrão do forno. Todos os itens foram fabricados em quartzo de alta pureza. A estrutura foi desenhada para permitir o uso de até nove termopares, como mostra a Figura 2a. Na Figura 2b são indicados os pontos de medição e os respectivos diâmetros em relação ao centro do tubo.



**Figura 1.** (a) Identificação dos componentes de quartzo para caracterização térmica do forno; e (b) vista lateral dos componentes posicionados sobre a espátula de SiC.



**Figura 2.** (a) Ilustração do conjunto para medição com nove bainhas de quartzo; e (b) pontos de medição (em verde) e respectivos diâmetros em relação ao centro do tubo.

A instrumentação aplicada para a medição e aquisição de dados é ilustrada na Figura 3a. Foram utilizados nove termopares do tipo K (níquel-cromo e níquel-alumínio) de 1.450 mm de comprimento. Os termopares foram conectados a uma placa multiplexadora por fios de compensação e esta foi utilizada em conjunto com um multímetro e um computador. A Figura 3b apresenta os instrumentos de medição juntamente com o conjunto de componentes de quartzo durante o processo de caracterização térmica do forno. A incerteza total do conjunto de medição aplicado é de  $2,4^{\circ}\text{C}$ .

A metodologia para a medição da temperatura ( $T$ ) no eixo longitudinal do tubo consistiu em posicionar os termopares a 1.200 mm da entrada do forno e, a partir desta posição, movimentar o conjunto de termopares para fora da câmara de processamento. As medidas foram realizadas em intervalos de 100 mm de acordo com os pontos identificados na Figura 4a, onde se mostram também as três zonas de aquecimento. O controle da temperatura é realizado com o uso de três controladores (marca Novus, mod. NI200) que operam em resposta à leitura de três

termopares tipo S posicionados no centro e extremidades da zona 2. O ponto de medição desses termopares é a parede externa do tubo de quartzo. Os controladores associados aos termopares das extremidades estão vinculados ao PID (proporcional-integral-derivativo) do controlador referente ao termopar posicionado no centro da zona 2, sendo este responsável pelo controle do sistema de potência do forno.<sup>(2)</sup>

O tempo de medição adotado para cada posição foi de cinco minutos, pois neste intervalo se observou a estabilização da medição da temperatura. As Figuras 4b e 4c apresentam a abertura do forno com os termopares posicionados em 1.200 mm e na entrada do forno, na posição 0 mm. A medição de temperatura radial ao tubo foi realizada de forma simultânea, uma vez que no sistema aplicado os nove termopares são movimentados em conjunto. Para a medição das curvas de aquecimento e resfriamento os termopares foram mantidos na posição 1.200 mm e todas as medições de temperatura foram realizadas sem fluxo de gases.

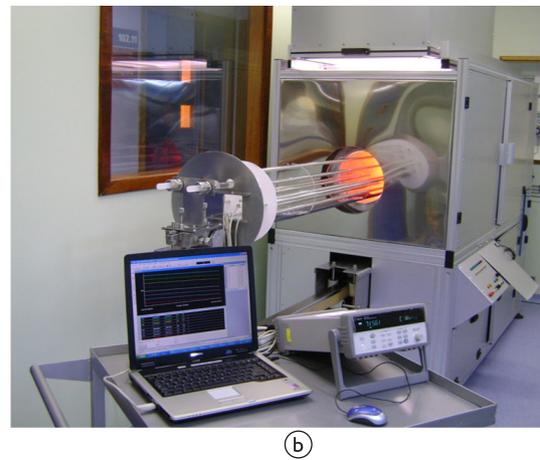
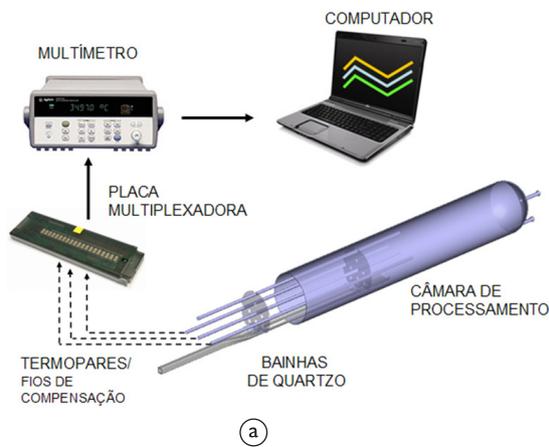


Figura 3. (a) Instrumentação aplicada; e (b) forno de difusão durante o processo de caracterização térmica.

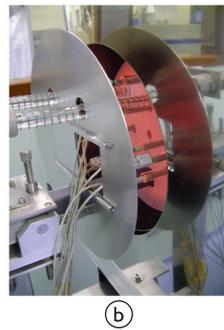
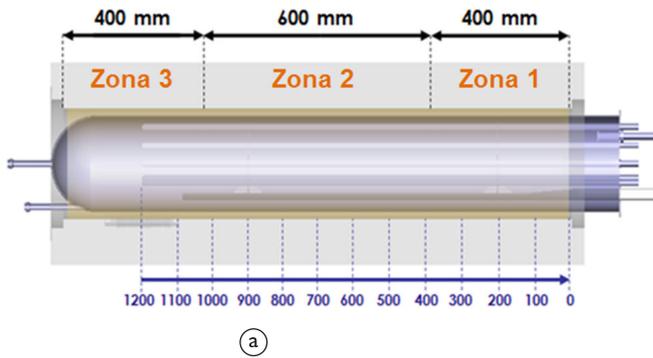


Figura 4. (a) Pontos de medição e identificação das três zonas de aquecimento; (b) abertura do forno para termopares posicionados em 1.200 mm; e (c) termopares posicionados na entrada do forno, posição 0 mm.

## 2.2 Caracterização dos Processos de Difusão

A caracterização dos processos de difusão foi realizada a partir da execução de difusões típicas de fósforo com  $\text{POCl}_3$ <sup>(3,4)</sup> e posterior análise das lâminas de silício processadas. Uma condição relevante na realização de processos de difusão é a dopagem do próprio tubo de quartzo, o que nos primeiros processos é baixa ou inexistente. Para equipamentos novos ou tubos de quartzo que foram submetidos a limpezas químicas, realizam-se processos de difusão a fim de “carregar” o tubo de quartzo com  $\text{P}_2\text{O}_5$ , produzido na reação de  $\text{POCl}_3$  com  $\text{O}_2$ . Desta forma, foram realizados processos prévios com  $\text{POCl}_3$ .

Para a realização dos primeiros processos de difusão foram utilizados grupos de três lâminas de silício monocristalino crescido pela técnica Czochralski (Cz) com diâmetro de 101,6 mm, posicionadas nos limites e no centro da zona de processamento identificados na caracterização térmica do forno, conforme mostra a Figura 5a. Também foram utilizadas lâminas de silício Cz de 150 mm × 150 mm, 125 mm × 125 mm e 100 mm × 100 mm, dispostas nos suportes de quartzo, como mostra a Figura 5b.

A análise dos resultados é realizada por meio da medição da resistência de folha e do tempo de vida dos portadores de carga minoritários. A resistência de folha

( $R_{\square}$ ) consiste em uma medida da resistividade média ao longo da espessura de uma dada região com átomos difundidos. É uma forma de caracterizar camadas com dopante difundido e pode ser expressa pela seguinte Equação 1:<sup>(5,6)</sup>

$$R_{\square} = \frac{\bar{\rho}}{x_j} = \left[ \int_0^{x_j} q\mu N(x) dx \right]^{-1} \quad (1)$$

onde  $\rho$  é a resistividade,  $x_j$  é a profundidade da junção pn,  $q$  é a carga do elétron,  $\mu$  a é mobilidade do portador de carga,  $N$  é a concentração de impurezas e  $x$  é a profundidade.

A técnica utilizada para medir a resistência de folha das lâminas de silício consiste em colocar quatro pontas condutoras alinhadas em contato com a superfície da lâmina, de forma que um valor fixo de corrente elétrica é injetado pelas duas pontas externas e a tensão elétrica é medida entre as duas pontas internas. Esse método é denominado de “quatro pontas”. O desvio padrão da  $R_{\square}$  medida na lâmina de silício caracteriza a uniformidade da difusão. Difusões uniformes permitem a obtenção de células solares mais eficientes e valores entre 30  $\Omega/\square$  e 40  $\Omega/\square$  são adequados para dispositivos com malhas metálicas depositadas por serigrafia,<sup>(7)</sup> técnica predominante na indústria atual.

O tempo de vida dos portadores de carga minoritários ( $\tau$ ) em um semicondutor, como o silício, é o tempo médio dos portadores de carga minoritários gerados por uma fonte de excitação externa, como a radiação solar, antes de se recombinarem. O valor de  $\tau$  pode ser medido pela técnica do decaimento da fotocondutividade. Esta técnica consiste em posicionar a lâmina sobre uma bobina conectada a um circuito-ponte de radiofrequência e iluminá-la com luz pulsada, fazendo com que a geração de portadores de carga produza uma alteração na condutividade do material, resultando em uma diferença de potencial medida em um osciloscópio.<sup>(5)</sup> A partir da curva de decaimento desta tensão elétrica é possível estimar o valor de  $\tau$ . A medição deste parâmetro é importante para a análise da contaminação e dos efeitos de *gettering* devido aos processos de difusão.<sup>(6)</sup>

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Rampas de Aquecimento e Resfriamento

Foram medidas as rampas de aquecimento e resfriamento na posição 1.200 mm para o intervalo de temperatura entre 300°C e 725°C, com o objetivo de avaliar a máxima taxa de aquecimento proporcionada pelo sistema de potência e a máxima taxa de resfriamento do conjunto térmico. Este intervalo foi definido porque os fornos no modo inativo (*stand-by*) permanecem a 300°C. Para o carregamento das lâminas no forno o mesmo é aquecido até temperaturas da ordem de 700°C. Para temperaturas acima de 700°C, as taxas são definidas por meio dos controladores para cada processo de difusão e oxidação e segundo o tipo de lâmina de silício: monocristalina (obtida pela técnica Cz ou pela fusão zonal flutuante)

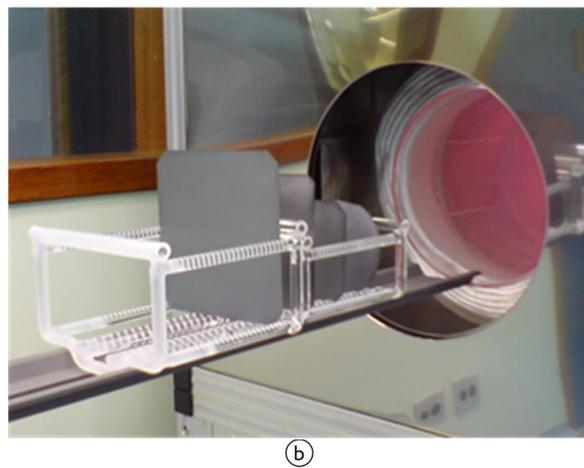
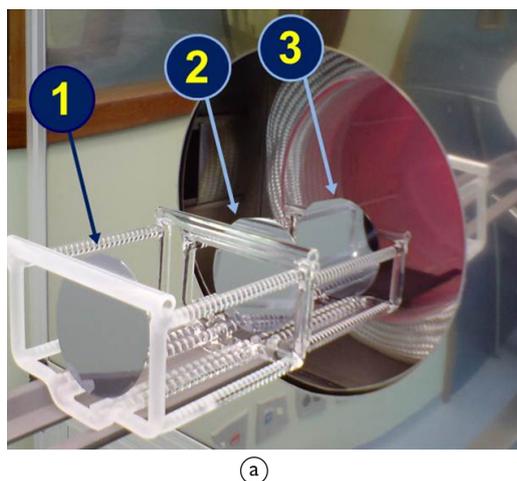
ou multicristalina. Por exemplo, no caso dos processos de difusão realizados neste trabalho com lâminas de Si-Cz, foi usada a taxa de aquecimento de aproximadamente 3°C/min para aquecer o tubo até 875°C.

Curvas de aquecimento de 300°C para 725°C são apresentadas na Figura 6a. Nestas, é possível determinar a razão entre a variação de temperatura e o intervalo de tempo,  $\Delta T/\Delta t$ , característico do forno e observar a uniformidade térmica radial no interior da câmara de processamento. Nas curvas de aquecimento observam-se duas regiões com distintas variações da temperatura em função do tempo: a primeira região com  $\Delta T/\Delta t$  de aproximadamente 8,5°C/min (entre 10 min e 47 min) e a segunda com  $\Delta T/\Delta t$  da ordem de 3°C/min (entre 47 e 65 min), até a estabilização da temperatura a partir de 70 min.

A Figura 6b apresenta as curvas de resfriamento de 725°C para 300°C. A variação de temperatura em função do tempo para as curvas de resfriamento foi determinada entre 1,5°C/min e 2°C/min.

#### 3.2 Perfil de Temperatura

O perfil de temperatura obtido com medições ao longo do eixo longitudinal do tubo mostra que as zonas de estabilização - zonas 1 e 3 - atingem valores de temperatura inferiores aos obtidos na zona central, onde ocorreram os valores máximos de temperatura. Na Figura 7a é apresentado o perfil térmico do forno para a temperatura de 875°C, temperatura típica usada em processos de difusão de fósforo para a fabricação de células solares.<sup>(3,4)</sup> A temperatura de 875°C foi atingida em torno da posição 800 mm e a zona de processamento foi de aproximadamente 200 mm, com variação de temperatura inferior a 5°C. O mesmo perfil térmico é observado na Figura 7b, onde se ajustou o forno para uma temperatura de 965°C. Nesta medição verificou-se uma variação inferior a 6°C entre as posições 700 mm e 900 mm.



**Figura 5.** Posicionamento das lâminas (a) dispostas no início, no meio e no fim da zona de processamento e (b) de diferentes dimensões para a realização dos processos de difusão.

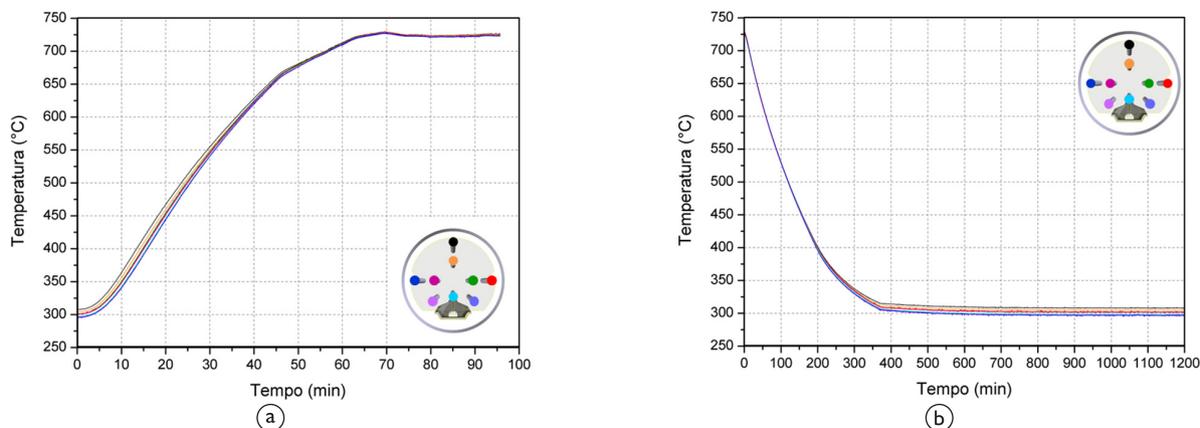


Figura 6. (a) Curvas de aquecimento e (b) de resfriamento entre 300°C e 725°C.

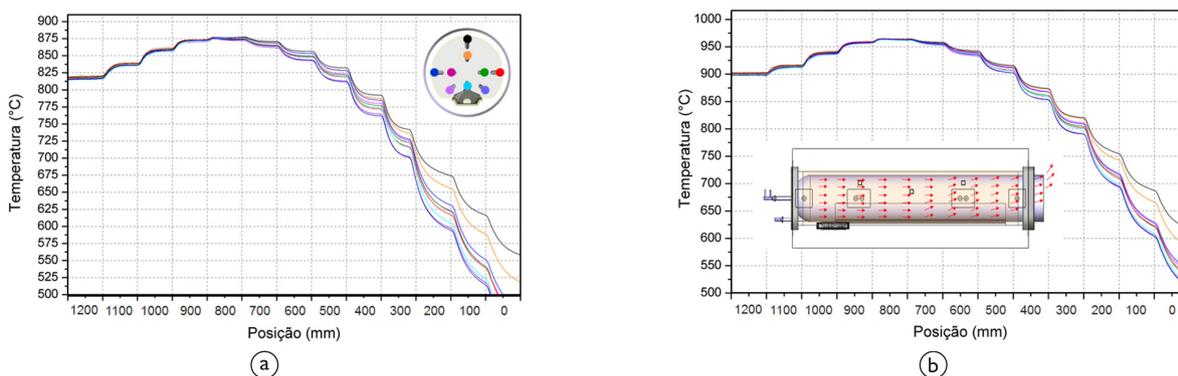


Figura 7. Perfil térmico do forno para (a) 875°C e (b) 965°C. Em (b) é ilustrado o fluxo ascendente do ar aquecido que provoca a variação radial de temperatura.

Nas curvas do perfil térmico há uma brusca queda de temperatura a partir da posição 700 mm, região central da câmara de processamento. Isto ocorre porque as tampas que vedam o tubo e a câmara de exaustão se afastaram da abertura do forno à medida que este foi aberto e os termopares se aproximaram da posição 0 mm. A uniformidade térmica radial diminuiu à medida que o forno foi aberto e este fato foi atribuído ao fluxo ascendente do ar aquecido que sai da câmara de processamento, como é ilustrado no detalhe da Figura 7b.

### 3.3 Análise da Resistência de Folha e do Tempo de Vida dos Portadores Minoritários

Os resultados apresentados na Tabela I correspondem aos valores da resistência de folha de regiões  $n^+$  obtidos em um processo de difusão de fósforo a 875°C, com tempo de difusão ( $t$ ) de 35 minutos e 0,21% de  $\text{POCl}_3$  no ambiente. A face frontal das lâminas foi direcionada para a entrada do forno e a face posterior para o fundo do mesmo onde ocorre a inserção dos gases, conforme mostra a Figura 5a.

Observa-se nos resultados da Tabela I um desvio padrão relativo de 12% a 32% na resistência de folha,

sendo que as maiores variações ocorreram na face frontal da lâmina 1 e na face posterior da lâmina 3. Em geral, as lâminas das extremidades de um lote processado são conhecidas como *dummy wafers* e não são utilizadas para a fabricação de dispositivos. Considerando somente as lâminas 2 e 3, a média da resistência de folha é  $(28 \pm 2) \Omega/\square$ , com um desvio padrão percentual de 7%. Na lâmina central 2, o maior desvio padrão da  $R_{\square}$  em uma face é de 18%. Estes valores estão levemente acima aos obtidos em fornos comerciais atualmente usados para o mesmo tipo de processamento com  $\text{POCl}_3$ . Por exemplo, ZanESCO, Moehlecke e Prá Veleda<sup>(7)</sup> e Bruschi et al.<sup>(9)</sup> obtiveram valores médios de resistência de folha entre  $20 \Omega/\square$  e  $40 \Omega/\square$  em processos de difusão de fósforo com  $\text{POCl}_3$  realizados em fornos comerciais e o desvio padrão da  $R_{\square}$  varia entre 6% e 17%.

Os valores de tempo de vida dos portadores de carga minoritários medidos para estas mesmas amostras são apresentados na Tabela 2. Em média, as lâminas utilizadas neste processo apresentaram inicialmente valores para  $\tau$  de 10  $\mu\text{s}$  a 30  $\mu\text{s}$ . Portanto, há um aumento signi-

**Tabela 1.** Valores da resistência de folha (em  $\Omega/\square$ ) da região  $n^+$  obtida pela difusão de fósforo com  $POCl_3$  (T: 875°C; t: 35 min)

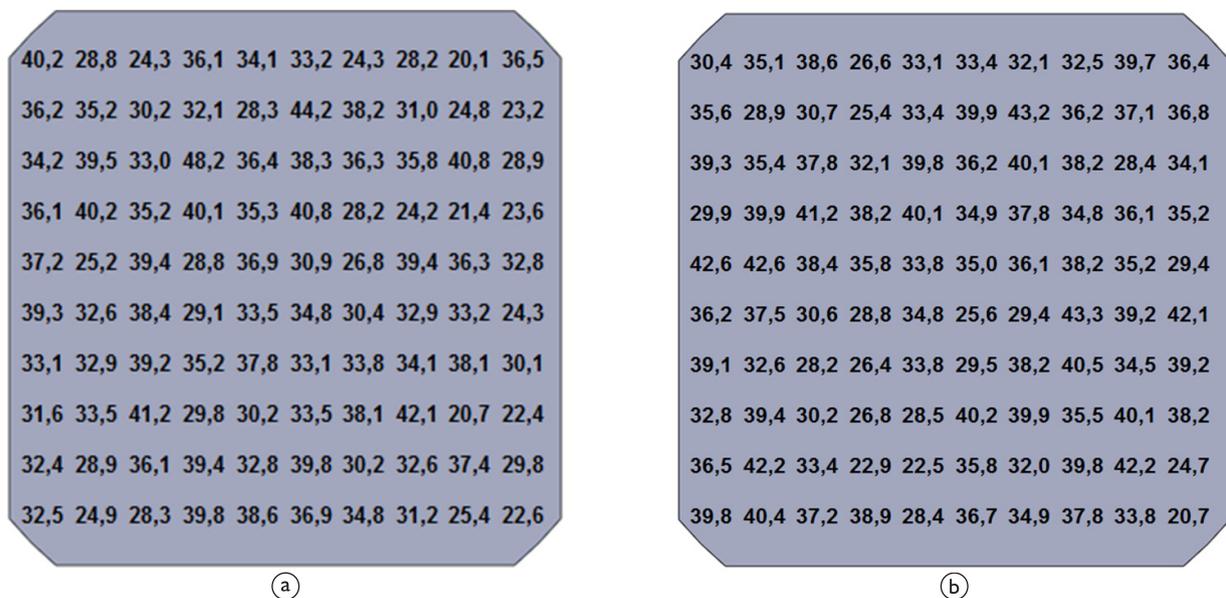
Lâmina 1	Lâmina 2	Lâmina 3
<p>Face Frontal</p> <p>77 ± 18</p> <p>Face Posterior</p> <p>64 ± 12</p>	<p>Face Frontal</p> <p>31 ± 7</p> <p>Face Posterior</p> <p>27 ± 5</p>	<p>Face Frontal</p> <p>29 ± 4</p> <p>Face Posterior</p> <p>26 ± 8</p>

**Tabela 2.** Valores do tempo de vida dos portadores de carga minoritários (em  $\mu s$ ).

Lâmina 1	Lâmina 2	Lâmina 3
120	80	104

**Tabela 3.** Valores médios da resistência de folha (em  $\Omega/\square$ ) obtidos no processo de difusão de fósforo com  $POCl_3$  (T: 875°C; t: 35 min)

Lâmina 1 150 mm × 150 mm		Lâmina 2 125 mm × 125 mm		Lâmina 3 100 mm × 100 mm		Lâmina 4 Ø 101,6 mm	
Face Frontal	Face Posterior	Face Frontal	Face Posterior	Face Frontal	Face Posterior	Face Frontal	Face Posterior
33 ± 6	35 ± 5	29 ± 6	28 ± 5	32 ± 3	34 ± 3	33 ± 6	39 ± 6



**Figura 8.** Resistência de folha em  $\Omega/\square$  medida nas faces (a) frontal e (b) posterior da lâmina de silício de 150 mm × 150 mm.

ficativo do  $\tau$ , demonstrando que ocorreram mecanismos de *gettering*, ou seja, a remoção e/ou neutralização de impurezas metálicas da região ativa do dispositivo proporcionada pela difusão do fósforo.<sup>(8)</sup>

O processo de difusão a 875°C, com  $t = 35$  minutos, foi repetido para quatro amostras de tamanhos distintos. Foram processadas lâminas de silício pseudoquadradas de 150 mm  $\times$  150 mm, 125 mm  $\times$  125 mm, 100 mm  $\times$  100 mm e circular com diâmetro de 101,6 mm, posicionadas como mostra a Figura 5b. Os valores médios da resistência de folha são apresentados na Tabela 3 e os valores medidos nas faces frontal e posterior da lâmina pseudoquadrada de 150 mm  $\times$  150 mm são apresentados na Figura 8.

Observa-se um desvio padrão percentual entre 7% e 20%, valores um pouco acima dos obtidos em difusões realizadas em fornos comerciais.<sup>(7,9)</sup> No entanto, cabe comentar que os fornos de difusão melhoram suas propriedades de produção de regiões dopadas uniformes conforme o tempo de uso devido ao acúmulo de  $P_2O_5$  no tubo de quartzo, propriedade que ainda não foi totalmente aproveitada no forno desenvolvido.

#### 4 CONCLUSÕES

O primeiro forno de difusão para fabricação de células solares de silício cristalino desenvolvido no Brasil foi caracterizado quanto ao perfil térmico da câmara de processamento, à uniformidade das regiões difundidas e à contaminação das lâminas de silício.

#### REFERÊNCIAS

- 1 Hering G. Enter the dragon: PV cell production rises 36 percent in 2011 to 37 GW, as the heat of ongoing oversupply – fueled by China's rapid rise – reshapes the industry. *Photon Int.* 2012 Mar:132-161.
- 2 Garcia SB, Moehlecke A, Zanesco I. Desenvolvimento de um forno para fabricação de células solares de silício. *Tecnol Metal Mater Miner.* 2012;9:109-116.
- 3 Heynes MSR, Wilkerson JT. Phosphorus diffusion in silicon using  $POCl_3$ . *Electrochem Tech.* 1967;5: 464-467.
- 4 Filomena GZ, Moehlecke A, Zanesco I, Marcolino JB. Avaliação dos efeitos de *gettering* por fósforo. In: *Anais do 2. Congresso Brasileiro de Energia Solar, 3. Conferência Latino-americana da ISES [CD-ROM]; 2008; Florianópolis, Brasil. Florianópolis: ABENS; 2008.*
- 5 Schroder DK. *Semiconductor material and device characterization.* 3. ed. New Jersey: John Wiley & Sons; 2006.
- 6 Jaeger RC. *Introduction to microelectronic fabrication: modular series on solid state devices.* 2. ed. New Jersey: Prentice Hall; 2002.
- 7 Zanesco I, Moehlecke A, Prá Veleza P. Belt furnace versus standard tube furnace to produce Al BSF. In: *Proceedings of 25. European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 5. World Conference on Photovoltaic Energy Conversion; 2010; Valencia, Espanha. Munique: WIP; 2010. p. 2501-2504.*
- 8 Kang JS, Schroder DK. *Gettering in silicon.* *J Appl Phys.* 1989;65:2974-2985. <http://dx.doi.org/10.1063/1.342714>
- 9 Bruschi DL, Moehlecke A, Zanesco I, Rosta RC. Desenvolvimento de células solares em silício tipo n com emissor formado por boro. *Matéria (Rio J).* 2011;16:775-787.

Recebido em: 28/01/2013

Aceito em: 20/04/2013

Uma estrutura de quartzo foi desenvolvida para a medição da temperatura no interior da câmara de processamento nos sentidos longitudinal e radial ao tubo. O parâmetro  $\Delta T/\Delta t$  é de aproximadamente 8,5°C/min para as rampas de aquecimento e se apresenta entre 1,5°C/min e 2°C/min para as rampas de resfriamento. Foi possível determinar a distribuição térmica e identificar a região e as características da zona de processamento com uma extensão de 200 mm com variação inferior a 5°C para  $T = 875^\circ\text{C}$ . Para  $T = 965^\circ\text{C}$ , a variação é inferior a 6°C. A não uniformidade nas medições a partir da posição 700 mm mostrou que as perdas de calor são elevadas durante a abertura do forno. Processos de difusão de fósforo com  $POCl_3$  foram realizados em lâminas de silício Cz de diferentes tamanhos. Valores médios da  $R_{\square}$  entre 28  $\Omega/\square$  e 39  $\Omega/\square$  foram obtidos com um desvio padrão de 7% a 20%, sendo que estes valores de desvio padrão são um pouco acima dos obtidos em fornos comerciais.

O aumento no tempo de vida dos portadores de carga minoritários comprovou que ocorreram mecanismos de *gettering* e não houve contaminação durante os processos de difusão, obtendo-se uma melhora da qualidade das lâminas.

Para a zona de processamento com extensão mínima de 200 mm, definida com a caracterização do forno, é possível processar até 40 lâminas de silício.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), à Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC-RS) e a equipe do Núcleo de Tecnologia em Energia Solar (NT-Solar).