

DESENVOLVIMENTO DE UM FORNO PARA FABRICAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES DE SILÍCIO

Sérgio Boscato Garcia¹

Adriano Moehlecke²

Izete Zanescos³

Resumo

O mercado mundial de células solares passou por um crescimento exponencial na última década e, atualmente, continua em expansão. Para produzir células solares, dopantes necessitam ser introduzidos nas lâminas de silício cristalino a fim de formar a junção pn. Este processo é realizado em fornos de difusão. O objetivo deste trabalho é apresentar o desenvolvimento de um forno de difusão compacto com capacidade para processar lâminas de silício de até 156 mm × 156 mm a temperaturas de até 1.100°C. O equipamento é automatizado e constituído por um sistema de aquecimento com três zonas e sistemas de carregamento das lâminas no forno e de controle dos fluxos de gases. Este é o primeiro forno para fabricação de células solares desenvolvido no Brasil e foi fabricado em conjunto com uma empresa brasileira.

Palavras-chave: Energia solar; Fornos; Célula solar.

DEVELOPMENT OF A FURNACE TO FABRICATE SILICON SOLAR CELLS

Abstract

Solar cell world market had an exponential growth in the last decade and nowadays it continues in expansion. To produce solar cells, dopants need to be introduced into the crystalline silicon wafer in order to form the pn junction. This process is carried out in diffusion furnaces. The aim of this paper is to present the development of a compact diffusion furnace to process up to 156 mm × 156 mm silicon wafers and to operate at temperature up to 1100°C. The furnace is automated and it is constituted by a heating system with three zones and systems to introduce the wafers inside the furnace as well as to control of gas flows. This equipment is the first one developed in Brazil to promote impurity diffusions in order to produce silicon solar cells and it was manufactured jointly with a Brazilian company.

Key words: Solar energy; Furnace; Solar cell.

I INTRODUÇÃO

A energia solar fotovoltaica caracteriza-se por ser uma das tecnologias limpas para produção de energia elétrica de maior enfoque para investidores e lideranças políticas. O mercado mundial desse setor está em constante crescimento e novas potências industriais têm surgido nos últimos anos. A produção de células solares em 2010 atingiu 27,2 GW, com 118% de aumento em relação

ao ano de 2009.⁽¹⁾ A China destaca-se nesse cenário, sendo responsável por uma produção superior a 13 GW. Produtores chineses e taiwaneses obtiveram níveis de produção anteriormente ocupados pelo Japão e Alemanha. Esses resultados colocam a China em uma posição de referência no desenvolvimento industrial nessa área.

Na indústria de células solares, as técnicas de fabricação focam-se em diferentes materiais e tecnologias. Entretanto, em 2010 a utilização de lâminas de silício

¹Engenheiro Mecânico, Mestre em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Núcleo de Tecnologia em Energia Solar – NT-Solar, Faculdade de Física – FAFIS, 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

²Licenciado em Física, Mestre em Engenharia, Doutor em Engenharia, Professor da Faculdade de Física – FAFIS e do Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais – PGETEMA, Coordenador do Núcleo de Tecnologia em Energia Solar – NT-Solar, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUCRS, Av. Ipiranga, 6681, Partenon, Cep 90619-900, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: moehlecke@pucrs.br

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

mono e multicristalino representou 86,1% da produção mundial.⁽¹⁾ Aprofundando-se brevemente no princípio de funcionamento de uma célula solar de silício, sabe-se que é necessário formar uma junção pn, ou seja, deve haver uma interface entre uma região com excesso de lacunas e outra com excesso de elétrons. Uma vez que as lâminas já possuem uma dopagem pré-definida, proveniente do processo de crescimento dos lingotes de silício cristalino, a junção pn é formada pela difusão de um dopante diferente da base. A difusão consiste em introduzir átomos de um elemento dopante na rede cristalina do substrato com controle de concentração e profundidade por meio de processos térmicos a temperaturas elevadas. A concentração de impurezas, ou seja, de átomos dopantes, diminui gradativamente desde a superfície com a profundidade e esse perfil de dopagem é determinado principalmente pelos parâmetros temperatura, tempo de difusão e concentração do dopante. Em fornos usados na indústria de dispositivos semicondutores, um tubo de quartzo é aquecido por um conjunto de resistores elétricos permitindo que a temperatura em seu interior atinja valores entre 800°C e 1.100°C, típicos para difusão de impurezas em lâminas de silício. Para fabricação de células solares, o dopante tipo “n” mais usado é o oxiclreto de fósforo, POCl_3 .

Existem basicamente dois tipos de fornos utilizados para difusão: (i) fornos tubulares convencionais com câmara de quartzo e aquecimento por resistores elétricos e (ii) fornos de processamento térmico rápido, também denominados de RTP (*Rapid Thermal Process*), que possuem aquecimento por lâmpadas que emitem na região do infravermelho/visível e geralmente, possuem uma esteira para carregar as lâminas para as zonas aquecidas. A Figura 1 mostra o esquema básico e alguns componentes de um forno convencional com tubo de quartzo.

Os fornos tubulares com câmara de quartzo são usados para produção em grande escala da difusão de fósforo para fabricação de células solares. Os fornos de

esteira são geralmente usados para a difusão de alumínio, a partir de pasta depositada pela técnica de serigrafia e também podem ser utilizados para difusão de fósforo.⁽²⁾ Os fornos tubulares podem ser classificados como verticais ou horizontais. A razão do emprego dos fornos verticais está fortemente vinculada a algumas vantagens que apresentam: melhor controle dos processos, maior controle do grau de pureza do ambiente de processo e maior capacidade de automação e são usados principalmente na indústria de microeletrônica. No entanto, um conjunto típico de fornos horizontais possuindo quatro tubos de processamento térmico pode custar o equivalente a apenas um forno vertical.⁽³⁾ Estes fatos contribuem para que os fornos horizontais dominem o mercado da indústria de fabricação de células solares para a difusão de fósforo.

A Figura 2 compara a quantidade de fabricantes de fornos de difusão por países, conforme publicações da revista *Photon International*, nos anos de 2008, 2009 e 2010. Em 2008 foram citados nove fabricantes de fornos no mercado mundial e o valor destes equipamentos variou de US\$ 142 mil até US\$ 3,6 milhões.⁽⁴⁾ Esta grande faixa de valores deve-se ao número de tubos e ao número de lâminas de silício que podem ser processados por hora. Em 2009 foram apresentados, dez fabricantes e a faixa de valor dos equipamentos analisados foi de US\$ 293,3 mil a US\$ 3,2 milhões.⁽⁵⁾ O crescimento de indústrias nesse setor é evidenciando com a apresentação de onze fabricantes no ano de 2010. Neste ano, o valor para os fornos de difusão esteve na faixa de US\$ 125 mil a US\$ 5,3 milhões e, assim como no ano de 2009, foram citados dois representantes chineses.⁽⁶⁾

Para complementar as informações apresentadas na Figura 2, a Figura 3 mostra uma relação dos fabricantes de fornos de difusão publicada pela *Energy Focus Ltd.* no ano de 2011.⁽⁷⁾ Observa-se que, de um total de 36 fabricantes, há um domínio de empresas chinesas que supera os Estados Unidos e Alemanha.

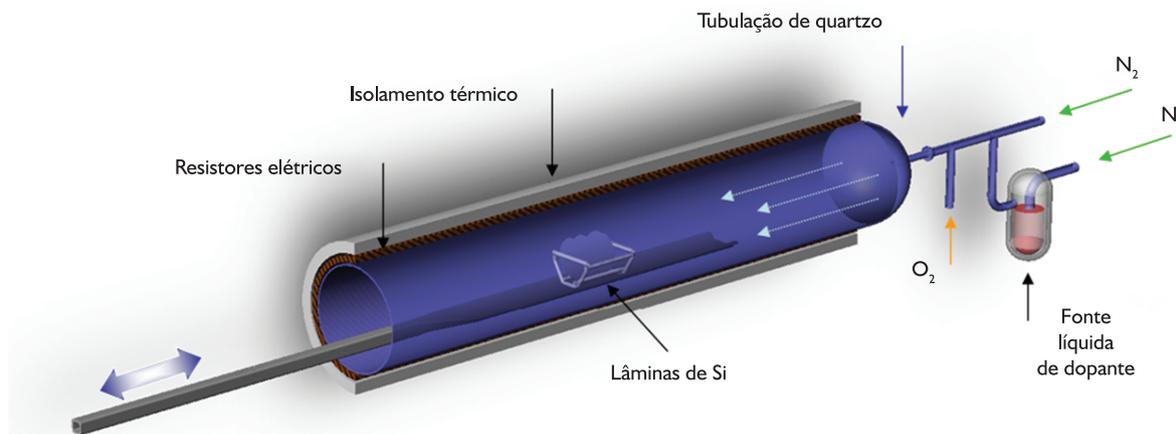


Figura 1. Principais componentes da câmara de processamento de fornos de difusão convencionais.

O objetivo deste trabalho é apresentar o desenvolvimento de um forno tubular convencional compacto com câmara de quartzo para difusão e/ou oxidação em lâminas de silício com dimensões de até 156 mm × 156 mm, que são típicas da indústria de células solares. São apresentados os sistemas de aquecimento, de carregamento das lâminas e de distribuição de gases. O sistema de aquecimento foi desenvolvido em parceria com a empresa Irmãos Sanchis Ltda., com sede em Porto Alegre - RS.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Fornos convencionais de difusão são geralmente compostos por um sistema de aquecimento, um sistema de carregamento e um sistema de controle da vazão de gases. Entretanto, há outros módulos secundários que devem ser considerados com igual importância no desenvolvimento destes equipamentos. Na Figura 4 são apresentados os principais itens considerados no desenvolvimento do forno.

O principal componente de um forno é o módulo de aquecimento. Este módulo foi desenvolvido para permitir processos em temperaturas de até 1.100°C. Processos típicos para difusão de dopantes em células solares variam de 800°C a 1.100°C e oxidações podem atingir a temperatura de 1.100°C. Formado por um conjunto de resistores elétricos, é o responsável pelo aquecimento da câmara de processamento, que, neste caso, possui geometria tubular. É dividido em três zonas de aquecimento, sendo que as zonas das extremidades têm a função de manter a homogeneidade térmica radial e longitudinal na zona central, denominada de zona plana. A Figura 5 ilustra o módulo de aquecimento e as dimensões adotadas para cada zona térmica neste projeto.

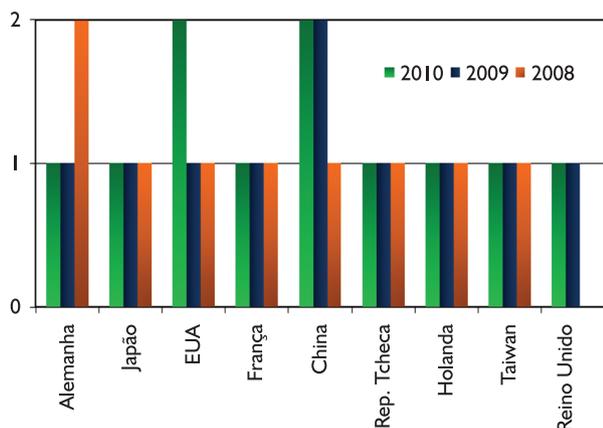


Figura 2. Fabricantes de fornos de difusão por países citados pela revista *Photon International*.⁽⁴⁻⁶⁾

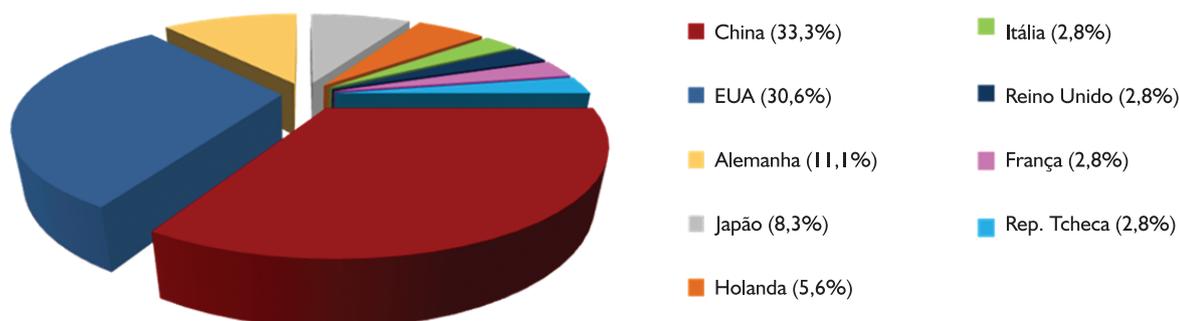


Figura 3. Distribuição global dos fabricantes de fornos de difusão, segundo a *Energy Focus Ltd.*⁽⁷⁾

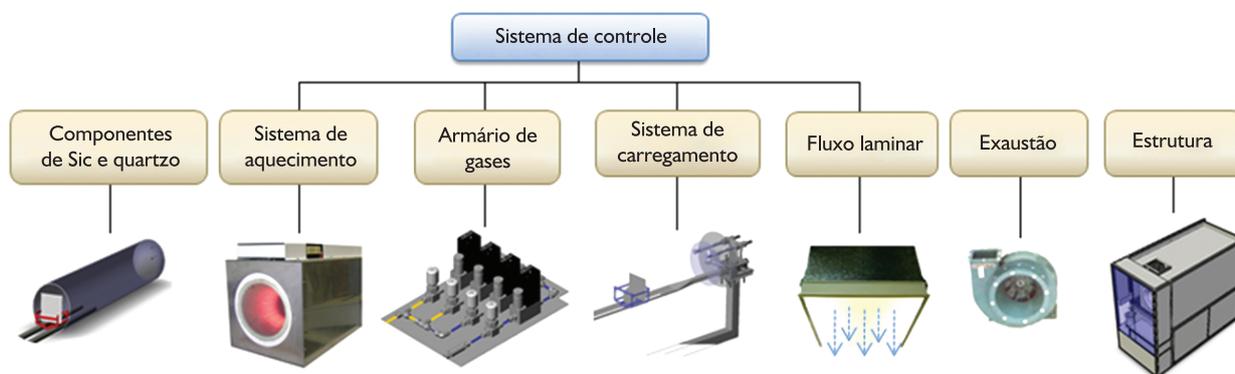


Figura 4. Principais componentes para projeto e montagem de um forno convencional.

A tensão aplicada nas zonas 1 e 3 é de 110 V, com um ajuste de até 46 A na corrente elétrica, resultando em uma potência máxima de 5 kW em cada zona. A zona 2 é projetada para a tensão elétrica de entrada de 220 V e permite um ajuste de até 50 A na corrente elétrica, o que corresponde a uma potência máxima de 11 kW. O controle da temperatura é realizado com o uso de três controladores que operam em resposta a leitura de três termopares tipo S posicionados longitudinalmente no centro e extremidades da zona 2. O ponto de medição dos termopares usado pelo sistema de controle é a parede externa do tubo de quartzo.

A realização de processos térmicos em lâminas de silício para a fabricação de células solares, principalmente dos processos de difusão e oxidação, requer um ambiente de alta pureza e livre de contaminantes indesejados. O quartzo e o carbetto de silício são materiais amplamente utilizados como componentes da câmara de processamento em fornos de difusão. Destes materiais, o quartzo apresenta menor custo ao passo que o SiC apresenta maior resistência em temperaturas elevadas

e a ataques químicos. A partir desta relação, o tubo e demais acessórios, com exceção da espátula, foram fabricados em quartzo de alta pureza, típico da indústria de dispositivos semicondutores. A espátula foi fabricada sob medida em SiC devido a sua função de suportar e transportar as lâminas de silício para o interior do forno em um sistema suspenso e automatizado. A Figura 6 ilustra os componentes de quartzo e SiC que compõem a câmara de processamento.

Identificados na Figura 6a, os itens 1 e 2 correspondem aos suportes para lâminas quadradas com dimensões de até 125 mm × 125 mm e 156 mm × 156 mm, respectivamente. O item 3 corresponde ao tubo de quartzo que constitui a câmara de processamento do forno e o item 4 representa a base para este tubo. Os itens 5 e 7 são diferentes modelos de bicos injetores de gases. O item 6 é um selo para vedar os acessos não utilizados. O item 8 corresponde à bainha para inserção de termopares no interior do tubo e os itens 9, 10 e 11 são, respectivamente, a tampa, as hastes e os anéis que compõem o

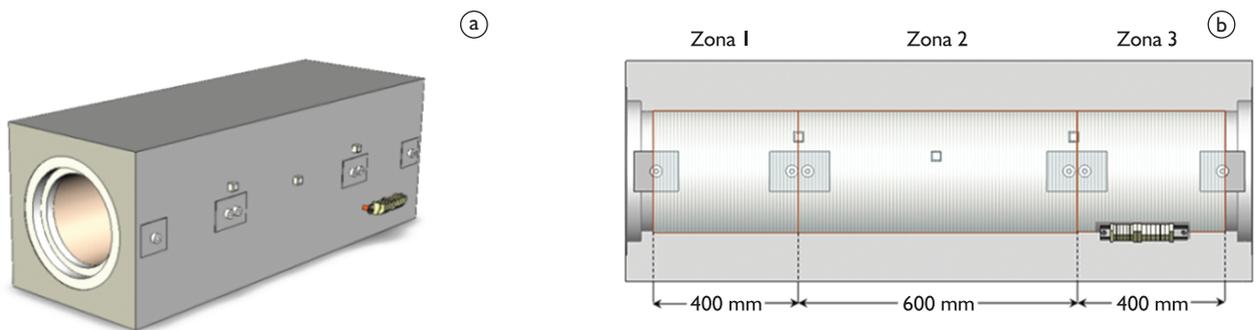


Figura 5. (a) Módulo de aquecimento e (b) representação das três zonas de aquecimento.

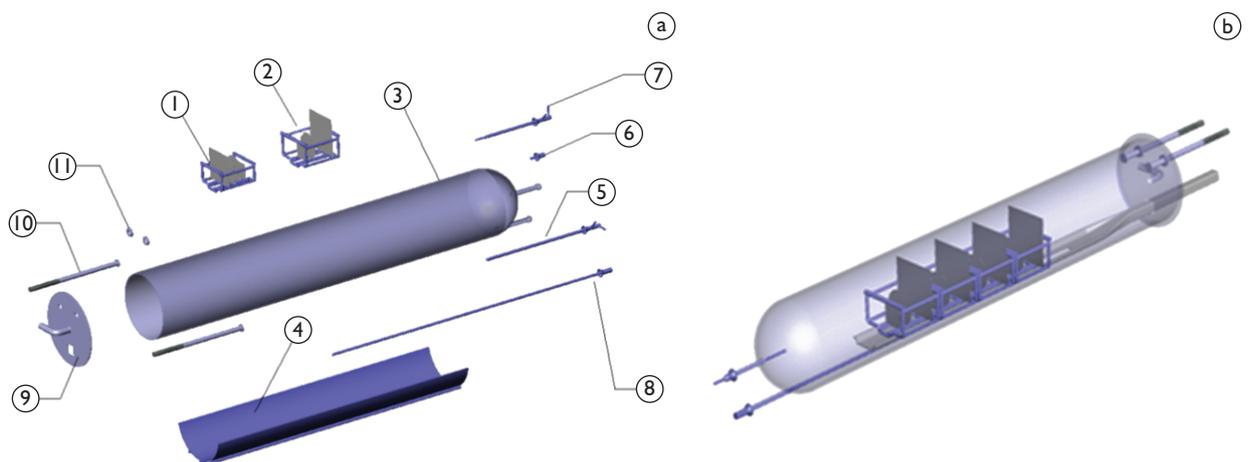
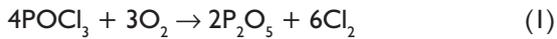


Figura 6. Ilustração dos componentes de quartzo. (a) Vista explodida e (b) configuração de uso.

sistema de fechamento do tubo. A Figura 6b apresenta este conjunto de acessórios juntamente com a espátula de SiC montados de acordo com a configuração adotada para o forno.

Durante o processo de difusão com o dopante POCl_3 , as seguintes reações químicas ocorrem na câmara de processamento:



e



A combinação dos gases para manter a estequiometria da reação química e fornecer a quantidade de átomos de fósforo no processamento requer o dimensionamento do sistema de distribuição e controle dos gases. O local onde é realizada a distribuição de gases geralmente é denominado de “armário de gases”.

Para o dimensionamento das vazões de gases considera-se o volume do tubo de quartzo e os processos previstos. Determinada a área máxima ocupada pelas lâminas e pelos componentes de carregamento das mesmas para o interior do forno, o diâmetro interno do tubo de quartzo é definido em 250 mm. O dimensionamento do tubo também está associado ao comprimento mínimo pré-estabelecido para a formação de uma zona plana de 500 mm. Considerando a existência de duas zonas de estabilização que cercam a zona plana, o comprimento útil definido para o tubo é de 1.535 mm. Com isto, o volume resultante para a câmara de processamento é de aproximadamente $8,0 \times 10^{-2} \text{ m}^3$. Assim, para essa câmara de processamento, o sistema de controle e distribuição é projetado considerando um tempo mínimo para a troca de gases de todo o volume em aproximadamente 5 minutos.

Duas linhas de gases são projetadas no armário de gases: uma direcionada ao transporte do dopante e outra que permite a passagem direta dos outros gases para o interior do tubo. O fluxo dos gases é ajustado utilizando

controladores de vazão mássica (MFC) e válvulas pneumáticas do tipo NF (normalmente fechada) instaladas após os MFCs e também na entrada e saída do recipiente que contém o dopante líquido, que pode ser denominado de borbulhador. O borbulhador é um aparato de quartzo que, além de armazenar o POCl_3 , permite a passagem do gás transportador, geralmente N_2 , através do dopante. Nesse processo, ao borbulhar no dopante líquido o gás arrasta suas partículas para o interior da câmara de processamento do forno, permitindo a difusão do fósforo nas lâminas de silício. Para que a temperatura do dopante seja controlada, o borbulhador é mantido em um climatizador. A Figura 7a apresenta a configuração adotada para a montagem do armário de gases, onde as linhas pontilhadas representam o uso de tubulações de PFA (perfluoroalco-xialcano) e as linhas contínuas representam a parte da tubulação fabricada em aço inoxidável 316 L. As linhas onde fluem moléculas de POCl_3 são de PFA devido às características corrosivas que este produto apresenta. A Figura 7b ilustra o fluxo dos gases da entrada no tubo à saída da câmara de exaustão. A tampa de quartzo possui uma tubulação integrada que direciona o fluxo de gases diretamente para a câmara de exaustão.

Como resultado das reações químicas apresentadas nas Equações 1 e 2, além da difusão de fósforo e da formação de uma camada de óxido de silício nas lâminas, há a formação de pequena quantidade de Cl_2 que é purgada. A exaustão dos gases ocorre por uma câmara de aço inoxidável, que possui uma coluna com vazão regulável, que é acoplada ao módulo de aquecimento, também apresentado na Figura 7b.

Dentre todos os componentes do armário de gases, os controladores de vazão são as peças mais importantes desse sistema. O dimensionamento implica em estabelecer os limites de vazão dos gases utilizados e, por consequência, os limites relativos às variáveis de processos envolvendo o fluxo de gases, como por exemplo, o percentual de POCl_3 e o tempo de troca de gases no volume do tubo. Para o dimensionamento dos

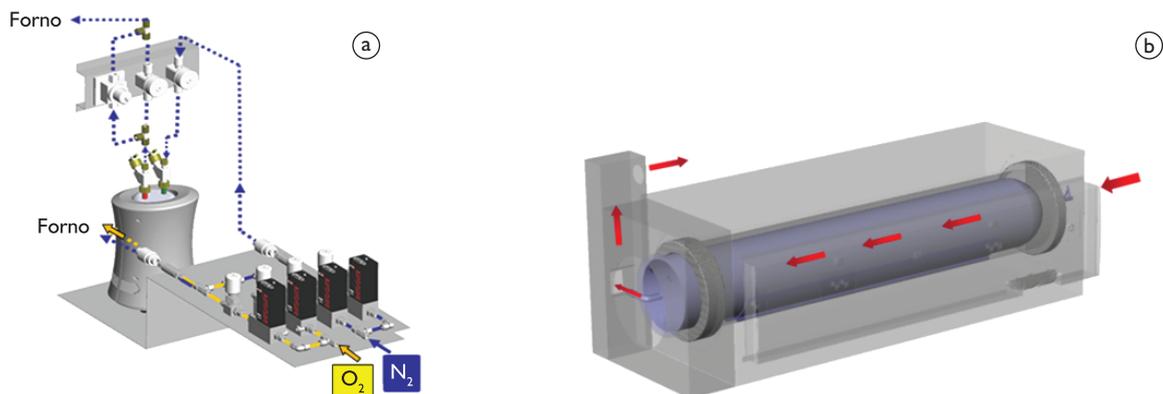


Figura 7. (a) Configuração do armário de gases e (b) ilustração do fluxo dos gases da entrada do tubo à saída na câmara de exaustão.

controladores de vazão foram considerados processos anteriormente publicados.⁽⁸⁻¹⁰⁾ A incerteza na medição dos controladores utilizados é de $\pm 1\%$ da vazão para valores superiores a 20% do fundo de escala (F.E.) e de $\pm 0,2\%$ do F.E. para valores abaixo de 20%. Foi utilizado um controlador de alta vazão (20 L/min) e um controlador de baixa vazão (2 L/min) para cada um dos gases considerados, N_2 e O_2 .

O sistema de carregamento consiste em um conjunto de elementos mecânicos que possibilita a inserção e retirada das lâminas de silício na câmara de processamento de forma automatizada. Devido à opção por uma estrutura compacta para o forno, o sistema de carregamento foi desenhado para atuar de forma retrátil e, portanto, o sistema é projetado para suportar os esforços envolvidos. A Figura 8a ilustra o projeto da estrutura de fixação da espátula de SiC e da tampa de quartzo para a vedação do tubo. Engastada em uma de suas extremidades, a espátula tem sua posição regulável por meio de mecanismos da estrutura de fixação. Da mesma forma, a tampa de quartzo é apoiada sobre hastes nas quais molas permitem que a mesma se ajuste ao contato da borda do tubo, realizando assim a sua vedação. Uma vez que a estrutura de fixação da espátula está apoiada sobre blocos em guias lineares, a sua movimentação é feita pela atuação de um fuso de esferas acionado por um motor elétrico. A Figura 8b apresenta este mecanismo e as dimensões aplicadas ao sistema de movimentação para o carregamento do forno.

O comprimento útil utilizado para a abertura e fechamento do forno é definido em 1.400 mm e o controle desse sistema de movimentação é realizado com a utilização de um inversor de frequência que permite o acionamento e ajuste da rotação do motor elétrico. São instalados limitadores mecânicos de final de curso montados na própria estrutura do forno, além de sensores indutivos para limitar os pontos extremos do sistema de movimentação e identificar os pontos para redução de velocidade automaticamente.

Um dos critérios para o projeto de uma estrutura para esse equipamento é a constituição de um modelo compacto e ajustável. Com isto, optou-se pelo emprego

de perfis de alumínio para a fabricação da estrutura e para a confecção do sistema retrátil para o deslocamento do módulo de fluxo laminar. O módulo de fluxo laminar, projetado para estar integrado à estrutura do forno, é um sistema de ventilação que permite a formação de uma região classe 100, equivalente à ISO 5, sobre as lâminas de silício durante a entrada e saída da câmara de processamento. O mecanismo para a formação dessa região relativamente limpa é constituído por um rotor que admite o ar em sua parte superior, injetando-o sobre um filtro absoluto para produzir um fluxo laminar.

Para operar o forno e programar os processos de difusão ou oxidação foi desenvolvido um aplicativo que integra o comando dos sistemas de aquecimento, carregamento e controle da vazão de gases. A interface com o operador é feita por meio de uma tela sensível ao toque que apresenta as opções de operação e programação de processos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado construtivo deste projeto está apresentado na Figura 9, onde se observa o forno de difusão construído e instalado. A Figura 9a ilustra o sistema de carregamento totalmente aberto e destaca-se o suporte de quartzo contendo as lâminas de silício apoiado sobre a espátula de SiC. Na Figura 9b mostra-se o monitor de interface e detalhes do suporte onde é fixada a espátula no sistema de carregamento.

Uma vez que o diâmetro interno da estrutura do conjunto de resistores elétricos é um pouco maior que o diâmetro externo do tubo de quartzo, estes não são concêntricos. Além disso, o contato direto entre essas superfícies pode se tornar uma fonte de contaminação do quartzo sob ciclos térmicos constantes. Para eliminar ambos os problemas, a solução aplicada é a utilização de uma base de quartzo fabricada e colocada sob o tubo e seu posicionamento é apresentado em destaque na Figura 10a e o tubo de quartzo concêntrico ao forno na Figura 10b. A Figura 10c mostra os resistores da zona central em funcionamento onde se observa a camada isolante em torno dos mesmos. Nas Figuras 10d e 10e são apresentados o

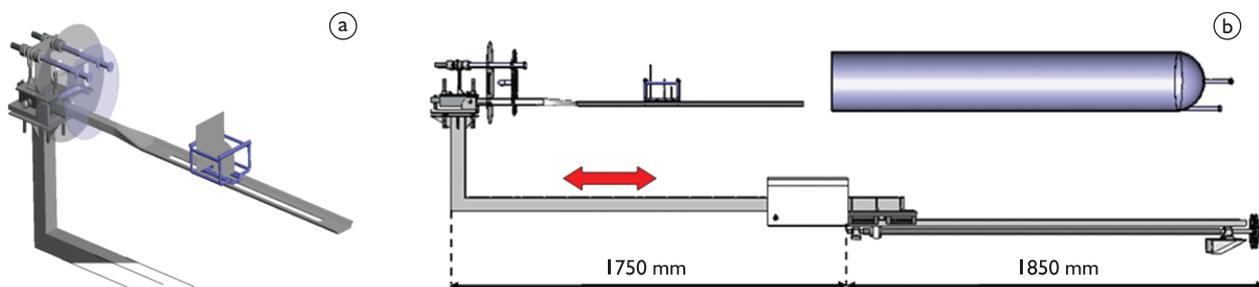


Figura 8. (a) Estrutura de fixação da espátula de SiC e (b) sistema de movimentação.

colar, colocado na entrada do forno, e o disco bipartido que envolve a parte posterior do tubo, respectivamente. Ambas peças são fabricadas em ALF (fibra 70% de Al_2O_3 e 30% por SiO_2).

O “armário de gases” instalado na parte posterior do forno é mostrado na Figura 11a. Instalado abaixo do “armário de gases”, o mecanismo de movimentação do sistema de carregamento é apresentado na Figura 11b.

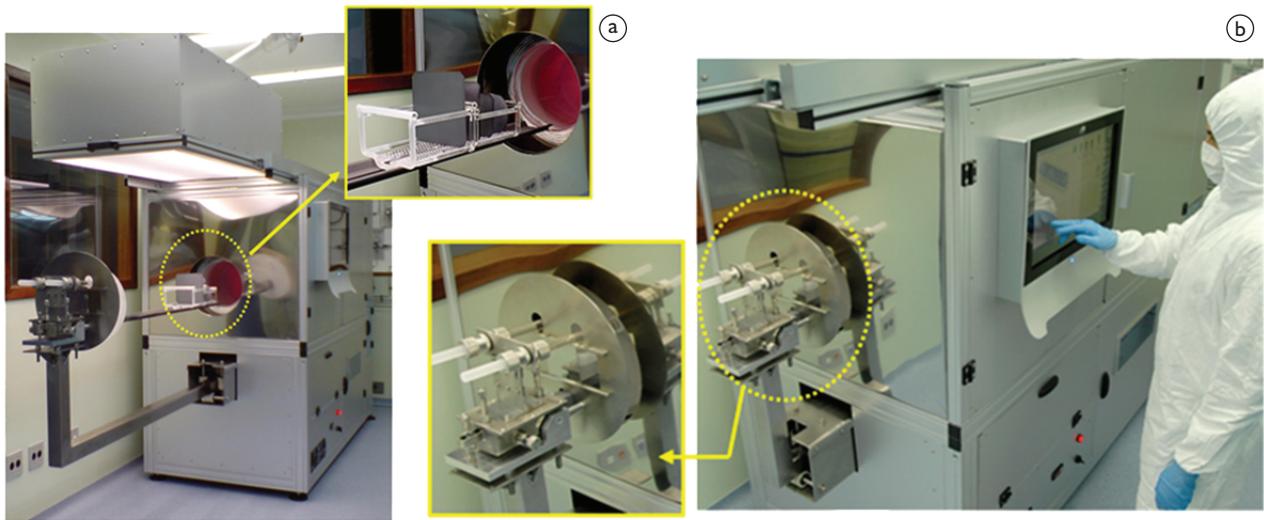


Figura 9. (a) Forno de difusão com destaque para o suporte de quartzo com lâminas de Si sendo introduzidas na câmara de processamento e (b) estrutura de fixação da espátula de SiC e monitor para programação do controle dos processos.

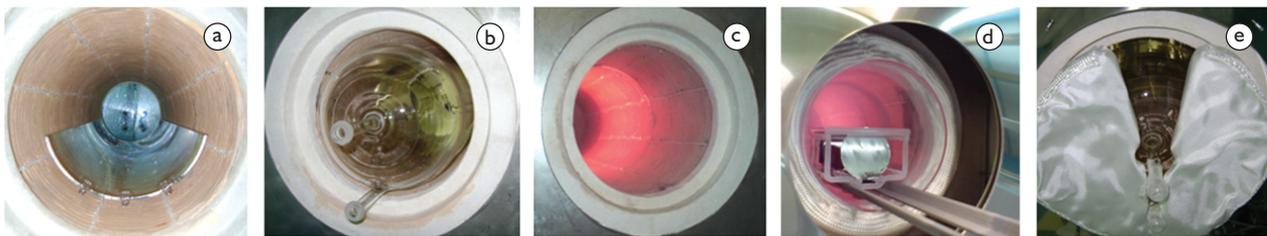


Figura 10. (a) Base de quartzo; (b) tubo de quartzo posicionado no forno de difusão; (c) camada isolante em torno do conjunto de resistores, (d) colar de ALF, que atua como isolante na entrada do forno e (e) disco de ALF na parte posterior do tubo.

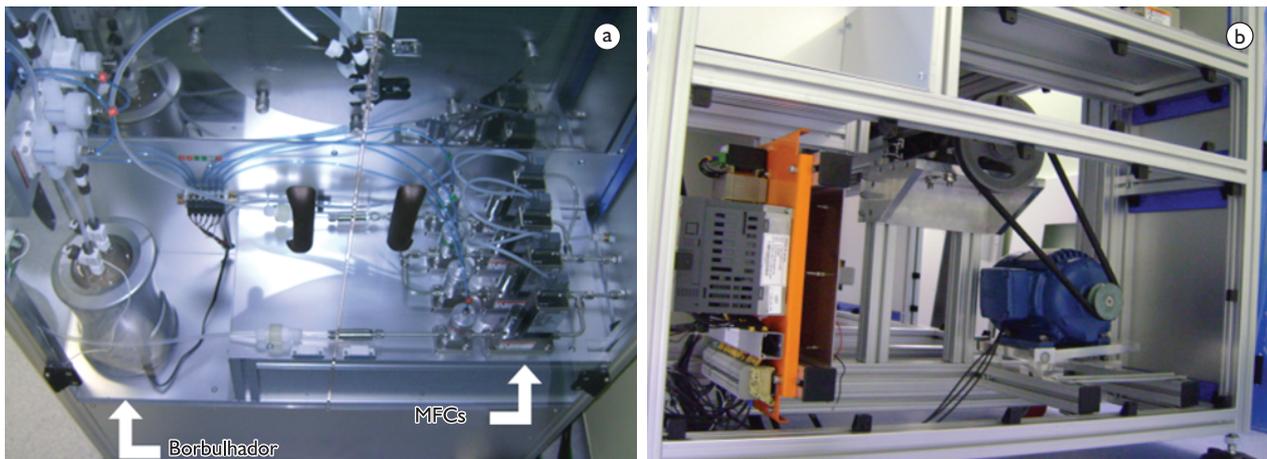


Figura 11. (a) “Armário de gases” e (b) componentes do sistema de movimentação.

Dentre os principais aspectos nos quais o forno desenvolvido se difere de modelos importados destaca-se a configuração do “armário de gases”, que dificulta a possibilidade de ocorrências de refluxo e contaminação da linha devido à pressurização do borbulhador. Este fator está associado à verticalização do posicionamento das válvulas de entrada e saída do borbulhador e à posterior conexão com o tubo de quartzo. A quantidade de lâminas que pode ser processada varia em função do tipo e quantidade de suportes utilizados, respeitando a zona plana do forno. Contudo, o dimensionamento da espátula e o espaço útil permitem o uso de até quatro suportes com 25 lâminas. Os sistemas retráteis para o carregamento das lâminas e para o fluxo laminar são componentes de fácil alteração e sua aplicação é facilmente adequada ao local de instalação do forno. É relevante destacar que este equipamento é projetado para operar com alimentação de 220 V. Geralmente, modelos importados utilizam tensões superiores acima de 380 V.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta as etapas do desenvolvimento de um forno para processamento de lâminas de silício com dimensões 156 mm × 156 mm, padrão atual da indústria de células solares. Todos os componentes

do forno estão projetados e desenvolvidos e o sistema de aquecimento foi confeccionado pela empresa Irmãos Sanchis Ltda. (Porto Alegre - RS). O forno é totalmente automatizado integrando o controle de aquecimento, carregamento e vazão de gases, por meio de um aplicativo controlado por CLP (controlador lógico programável) e computador com tela sensível ao toque. É o primeiro forno desenvolvido no Brasil para atender à demanda na fabricação de células solares.

O forno desenvolvido constitui-se em um modelo compacto, mas é equivalente aos equipamentos desenvolvidos nos países que lideram a indústria neste setor. Contudo, seu desenvolvimento permite a possibilidade de reproduzir o forno em moldes industriais para atender a uma futura demanda com a oferta de um equipamento nacional.

Agradecimentos

À Financiadora de Estudos e Projetos - Finep, pelo financiamento deste projeto, e à Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul - PUCRS, pela estrutura e incentivo à educação concedido para o desenvolvimento da dissertação de mestrado, de onde se originou o presente artigo.

REFERÊNCIAS

- 1 HERING, G. Year of the tiger: PV cell output roared in 2010 to over 27 GW: beating 2006 through 2009 combined - but can the Year of the Rabbit bring more multiples? *Photon International*, p. 186-214, Mar. 2011.
- 2 GORIS, M. J. A. A. et al. Comparison of emitters diffused using an IR belt furnace and a POC13 system. In: EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE AND EXHIBITION, 17., 2001, Munique. *Proceedings...* Munique: WIP, 2001. p. 1535-8.
- 3 WOLF, S.; TAUBER, R. N. *Silicon processing for the VLSI era*. 2. ed. California: Lattice, 2000. v. 1: Process Technology, 890 p.
- 4 CHUNDURI, S. K. Doping for high performance: market survey on diffusion furnaces. *Photon International*, p. 204-20, Aug. 2008.
- 5 CHUNDURI, S. K. Doping to do well: market survey on diffusion furnaces. *Photon International*, p. 144-171, Aug. 2009.
- 6 CHUNDURI, S. K. 2010. Testing the tube: market survey on diffusion furnaces. *Photon International*, p. 260-83, Aug. 2010.
- 7 Energy Focus – ENF Ltd. Diffusion: cell production equipment. Disponível em: <<http://www.enf.cn>>. Acesso em: 10 de maio de 2011.
- 8 HEYNES, M. S. R.; WILKERSON, J. T. Phosphorus diffusion in silicon using POC13. *Electrochemical Technology*, v. 5, n. 9-10, p. 464-7, 1967.
- 9 RUIZ, J. M. Final Process Identification Document (PID) for bifacial solar cells. Madrid: Instituto de Energia Solar, 1986. [Memória Interna UPM/IES/LS/9158].
- 10 MOEHLECKE, A. *Conceptos avanzados de tecnologia para células solares con emisores p+ dopados con boro*. 1996. 202 p. Tese [Doutorado] - Universidade Politécnica de Madri, Madri, 1996.

Recebido em: 16/12/2011

Aprovado em: 02/03/2012