

13

EQUIPAMENTO PARA A PRODUÇÃO DE SILÍCIO POLICRISTALINO PARA CÉLULAS SOLARES

Vitor Hugo Bolzan¹
Paulo Roberto Nuz²
Amari Garcia³
Naveglio Prates de Campos Filho⁴

R E S U M O

É apresentada e discutida a técnica de solidificação unidirecional como método para a obtenção de lâminas de silício policristalino para a fabricação de células solares de baixo custo, as quais possuem um grande campo de aplicações terrestres no Brasil (agricultura, telecomunicações, etc.). Essas lâminas destinam-se à substituição das de silício monocristalino hoje utilizadas, que são fabricadas com silício importado e de alto custo.

Para isto foi projetado e construído um equipamento para a produção de lingotes quadrados (5 x 5 cm) de silício, com grãos colunares orientados, a partir do silício metalúrgico nacional. Os resultados obtidos nas experiências realizadas são discutidos e analisados.

1. Engenheiro Mecânico, ex-pesquisador do Projeto "Silício Policristalino para Células Solares, FIEP-UNICAMP", desenvolvedor de Engenharia (FEC) da UNICAMP. Atualmente na Piratini do Brasil S.A. - Jumaré - SP.
2. Engenheiro Mecânico, Doutor em Engenharia, pesquisador do Laboratório MGE e professor da FIEP/UNICAMP.
3. Engenheiro Mecânico, Doutor em Engenharia, sub-coordenador do Laboratório MGE e professor da FIEP/UNICAMP.
4. Engenheiro Aeronáutico, Doutor em Engenharia, coordenador do Laboratório MGE e professor da FIEP/UNICAMP.

1. INTRODUÇÃO

A delicada situação energética com a qual as nações se deparam a partir de meados dos anos 70, gerou um esforço mundial no sentido de se conseguir fontes de energia alternativa aos processos de obtenção convencionais, a custos competitivos.

A energia solar incidente na superfície da terra perfaz um total anual de 1.000 trilhões de kWh, cifra que supera em 10 mil vezes o consumo mundial de energia [1]. Uma das formas conhecidas para o aproveitamento dessa enorme potencial é a conversão da energia solar luminosa em elétrica através de células fotovoltaicas.

Porém, a ampla utilização da energia fotovoltaica esbarra em um sério problema: o alto custo de fabricação das células solares, tornando essa energia pouco competitiva em relação à gerada por processos convencionais. Devido a isso, verificou-se nos últimos anos em todos os países desenvolvidos uma arrancada em direção do que se convencionou chamar de "célula solar terrestre", cujas técnicas de fabricação, matérias-primas e demais características percorrem uma grande gama de variação, mas que tem como qualidade fundamental o baixo custo de conversão energética.

O Brasil, um dos maiores países do mundo, com quase toda a sua extensão territorial localizada entre os trópicos, possui um invejável mercado potencial para a aplicação de energia fotovoltaica. Sua economia em grande parte voltada à agricultura e pecuária, as distâncias desses estabelecimentos aos centros geradores de energia elétrica, o grande e complexo sistema de telecomunicações instalado, o interesse governamental no desenvolvimento de áreas remotas e de difícil acesso, como na região amazônica,

ônica, são características que ajudarão no desenvolvimento das
se mercado, pelo qual já se faz viável o interesse das nações
desenvolvidas, como prova o trabalho do Departamento de Energia
do E.U.A., através do SESI - Instituto de Pesquisas em Energia
Solar [2].

As lado disso, o Brasil detém uma das maiores reservas de
quartzo do mundo, forma cristalina do óxido de silício (SiO_2)
usado como matéria prima na obtenção de silício. A partir desse
le material as companhias mineradoras produzem o silício orgâ-
nológico, com pureza de aproximadamente 99,5%, sendo a maior par-
te da produção exportada. Ao mesmo tempo, a indústria fotovol-
táica nacional é obrigada a importar silício de alta pureza,
tanto na forma de lâminas monocristalinas como em componentes
eletrônicos e células solares prontas, a um custo extremamente
alto para o país.

2. SOLIDIFICAÇÃO UNIDIRECIONAL DO SILÍCIO

A produção convencional de lâminas de silício para células
solares utiliza o silício de grau eletrônico (99,999%), que é
um material importado e de altíssimo custo [3]. Para se obter
lâminas com baixo custo estamos desenvolvendo um processo mais
simples no qual o silício metalúrgico é limpiado por compostos
ácidos, elevando sua pureza de 99,5 para 99,99%, sendo posteri-
ormente fundido e solidificado unidirecionalmente. Os detalhes
deste processo podem ser obtidos em outros trabalhos [3,4].

A vantagem de se utilizar a solidificação unidirecional pa-
ra a obtenção de lingotes de silício policristalino foi eviden-
ciada nos trabalhos de Fischer [5] e Roy [6]. Das característi-
cas serem essenciais as lâminas obtidas a partir de lingotes
de silício policristalino para a - conseguir células eficientes:

226

- (a) o diâmetro dos grãos deveria ser maior que 100 μ m para as-
segurar completa recepção dos portadores minoritários.
- (b) Não deveriam existir contornos de grãos perpendiculares ao
fluxo de corrente de portadores majoritários.

Essas duas qualidades são preenchidas pelas lingotes obti-
dos pela solidificação unidirecional. A figura 1 ilustra a dife-
rença de cristalinidade entre o lingote policristalino solidificado
convencionalmente e o obtido por solidificação unidirecional e
entre as lâminas feitas a partir deles. Nota-se que no lingote
solidificado unidirecionalmente, praticamente todos os grãos
atravessaram as lâminas de face a face, não causando impedido
ao fluxo de corrente.

O método de solidificação unidirecional foi testado por
Clasek e colaboradores [7], que empregaram como material de par-
tida o silício de grau eletrônico, obtendo uma boa eficiência
de conversão fotoelétrica nas células fabricadas.

3. PROJETO E CONSTRUÇÃO DO EQUIPAMENTO DE SOLIDIFICAÇÃO UNIDIRECIONAL

A figura 2 apresenta um esquema do equipamento construído
para a produção de lingotes de silício por solidificação unidire-
cional (os números entre parênteses correspondem aos índices da
figura): trata-se basicamente de uma câmara de atmosfera
inerte (1) que pode mover-se em relação à fonte de calor que
atua sobre ela. Essa câmara é constituída de um tubo de qua-
tzo (2), cujas extremidades são seladas por duas flanges de
aço (3). Dentro dessa câmara é posicionado o cadinho de grafite
(4) no qual ocorre o fundir e a solidificação do silício. As
flanges são atarracadas por termostatos (5) e são inertes (6) e sel-
adas para vácuo (7). A necessidade de se utilizar atmosfera inerte

227

na fusão do sílfio se explica pela grande resistividade dessa material a altas temperaturas. O aquecimento do cadinho é feito por espiras acopladas a uma fonte de indução (8). O deslocamento da câmara (1) é feito por um fuso (9) acionado por um motor-reductor colocado na extremidade inferior do mesmo. A câmara é acoplada ao fuso através de uma alavanca (10). No interior do forno existem instrumentos de medição e controle do processo, como medidor e controlador de temperatura, potenciômetro de ajuste de velocidade de descida do cadinho, válvulas para o controle do fluxo de gás inerte, etc.

O processo de solidificação se desenvolve conforme se vê na figura 3 e o cadinho de grafite é enchido com sílfio granulado e posicionado na câmara de atmosfera inerte, e em seguida, é aberta a válvula de argônio ou ligada a bomba de vácuo. Ambos os sistemas (vácuo ou argônio) têm por finalidade retirar o oxigênio do interior da câmara. Para melhor expulsar o oxigênio, pode-se utilizar argônio a baixa pressão, ou seja, injetado de argônio acompanhada de evacuação. Em seguida é ligada a fonte de indução, que promove o aquecimento do sílfio até a sua fusão (141°C). É importante ressaltar que a temperatura ambiente não existe acoplamento entre o sílfio e a bobina, ou seja, o campo magnético por ela gerado não consegue provocar correntes de Foucault diretamente naquela material, devido à sua grande resistividade elétrica. Esse acoplamento acontece, na verdade, entre a bobina e o grafite do cadinho, que funciona como um suscepter magnético, onde é gerado o calor que é transferido ao sílfio até aproximadamente 800°C, quando a condutividade elétrica do sílfio passa a ser significativa, e o acoplamento torna-se direto. Após a fusão completa do material e um pequeno superaquecimento, é ligada o sistema

228

de deslocamento, que move lentamente a câmara para baixo, retirando o cadinho da zona de ação da bobina de indução. Devido a isso e à grande perda de calor pelo fundo do cadinho (por radiação e convecção forçada de argônio) a solidificação se verifica a partir do fundo do cadinho e se propaga por todo o lingote com velocidade igual à de deslocamento da câmara.

Na figura 3 é apresentada uma vista geral do equipamento de solidificação unidirecional de sílfio.

4. RESULTADOS OBTIDOS

A figura 4 apresenta o corte longitudinal de um lingote de sílfio solidificado unidirecionalmente. Para os testes realizados, foi utilizado sílfio de grau metalúrgico em cadinho de grafite de seção transversal quadrada. O desempenho do equipamento construído foi satisfatório pois não houve rachaduras no lingote nem no cadinho, e o crescimento dos grãos foi unidirecional. Com relação ao tamanho dos grãos, observamos um diâmetro médio, calculado pelo método das interceptações lineares, de 980 μ m, ou seja, quase dez vezes maior que o valor proposto por Roy [4], que era de 100 μ m, indicando que sua morfologia cristalina é adequada à confecção de células solares.

Com os lingotes produzidos foram confeccionadas células fotovoltaicas, as quais apresentaram rendimentos médios de 31 em pequenas áreas (12 cm^2) [4,8].

5. CONCLUSÃO

O equipamento projetado e construído para a fundição e solidificação unidirecional de sílfio policristalina apresentou um desempenho satisfatório, produzindo lingotes quadrados (3x3 cm) de sílfio, sem trincas, ou qualquer outros defeitos

229

de fundição.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Projeto TELEBRÁS-NGE, pelo empréstimo da fonte de indução para a montagem do equipamento para a solidificação unidirecional de silício. Agradecemos também ao Prof. Dr. Ivan Chambeleyron do Grupo de Conversão Fotovoltáica do Instituto de Física da UNICAMP pela fabricação e caracterização das células fotovoltáicas e à FINEP, pelo apoio financeiro recebido através do Projeto de Pesquisa "Conversão Solar Fotovoltáica com Silício Policristalino", desenvolvido na Faculdade de Engenharia de UNICAMP.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Campos F.R. M.P. - "Silício Policristalino para Células Solares", Dados e Ideias, p. 12, jul. 1981
- [2] "Brazil - Solar Market Conditions and Potential", SERI, NREL Development Prog., Department of Energy, USA, Jun. 1981
- [3] Bolzan, V.H.; Mel, P.R.; Garcia, A. & Campos F.R. M.P. - "Silício Policristalino de Baixo Custo para Células Solares", III Simpósio Brasileiro de Microeletrônica, Escola Politécnica de USP, SP., 23 a 27 de julho de 1983
- [4] Bolzan, V.H.; Mel, P.R.; Garcia, A. & Campos F.R. M.P. - "Solidificação Unidirecional de Silício para Células Solares", 4º CIBICMAT, Rio de Janeiro, R.J., 09 a 12 de dezembro de 1984. A ser apresentada.
- [5] Fischer, H. & Paschender, W. - "Low Cost Solar Cells Based on Large Area Unconventional Silicon", IEEE Trans. Elec. Devices, vol. ED-24, No. 4, p. 439, Apr. 1977
- [6] Roy, K. et alii - "Growth Structure of Cast Silicon and Related Photovoltaic Properties of Solar Cells", 14th IEEE Phot. Spec. Conf., San Diego, Calif., USA, p. 897, Jan. 7-10, 1980
- [7] Clazsek, T.F. et alii - "Directionally Solidified Solar Grade Silicon Using Carbon Crucibles", J. Cryst. Growth, vol. 48, p. 527, 1979
- [8] Santos, P.V.; Chambeleyron, I.; Bolzan, V. & Mel, P.R. - "Polycrystalline Solar Cells from Up-graded Metallurgical Silicon", 13th IEEE PVSC, Orlando, FL., May 1984

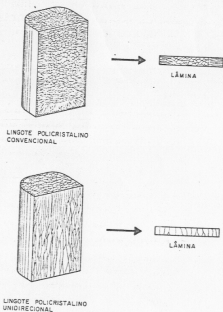


Fig. 1 - Diferença estrutural entre as lâminas obtidas a partir de lingotes solidificados com técnicas convencional e unidirecional!

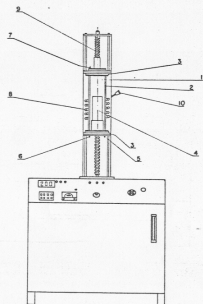


Fig. 2 - Detalhes do equipamento construído para a solidificação unidirecional do stifeo. Os números da figura referem-se às partes descritas no texto.

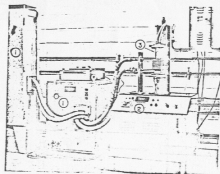
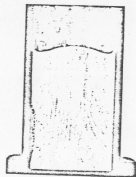


Fig. 3 - Montagem do Equipamento Unidirecional de Silício.

- (1) Forno de Indução
- (2) Painel do forno
- (3) Câmara de aquecimento



1cm

Fig. 4 - Lingote de silício de grau metalúrgico solidificado unidirecionalmente para testes do equipamento.