

Universidade Estadual de Campinas  
Instituto de Física “Gleb Wataghin”

**F 590**  
**- Iniciação Científica I –**

Texturização da superfície de silício para redução da  
reflexão em células solares



Aluno: Hugo da S. Alvarez

*hugodasilvaalvarez x(arroba)x hotmail.com*

Orientador: Prof. Dr. Francisco das Chagas Marques

*marques x(arroba)x ifi.unicamp.br*

Campinas

2011

## OBJETIVO

Este trabalho visa otimizar processos de texturização em lâminas de silício para aplicação como camada antirrefletoras de células fotovoltaicas.

### 1. INTRODUÇÃO

Dentre as chamadas fontes alternativas ou renováveis de energia, a energia solar destaca-se devido à abundância do recurso. Na solar fotovoltaica, os fótons da radiação solar (energia luminosa) são diretamente convertidos em energia elétrica através do efeito fotovoltaico. O efeito fotovoltaico foi reportado inicialmente por Edmund Becquerel em 1839, quando observou que a ação da luz em um eletrodo de platina recoberto com prata imerso em um eletrólito produzia corrente elétrica. Quarenta anos mais tarde, os primeiros dispositivos fotovoltaicos em estado sólido foram construídos por pesquisadores que investigavam a recém-descoberta da fotocondutividade do selênio. Somente em 1954 a primeira célula fotovoltaica de silício foi reportada por Chapin, Fuller e Pearson, cuja eficiência de conversão era de 6% <sup>[1]</sup>.

As células fotovoltaicas, em geral, são fabricadas utilizando-se lâminas de silício, que podem alcançar eficiência de conversão de 24,7% <sup>[2]</sup>. Diversos grupos de pesquisa trabalhando com o desafio de aumentar a eficiência de conversão das células. Por exemplo, o projeto da empresa Spectrolab, juntamente com o NREL, que alcançou a eficiência de conversão de 40,7% fazendo células de 3 junções (GaInp/GaInAS/Ge)<sup>[1]</sup>. Embora esse resultado seja muito importante, o alto custo de fabricação destas células impossibilita que essa tecnologia seja empregada pela indústria fotovoltaica.

O emprego de técnicas de menor custo visando aumento da eficiência de conversão das células é largamente encontrado na literatura. Dentre estes processos está a texturização randômica, o de pirâmides invertidas e o de colmeia <sup>[1]</sup>. Dos processos citados a texturização randômica é o mais empregado, reduzindo a reflexão da luz na superfície da célula em até 10%<sup>[3]</sup>.

Neste trabalho, serão testados processos de texturização randômica em lâminas de silício. A sequência experimental adotada na texturização das amostras já é empregada no Laboratório de Pesquisa de Fotovoltaicas (LPF/DFA/IFGW). Entretanto, o processo atual não é otimizado, o que dificulta a reprodutibilidade do experimento.

## 1.1 PROCESSO DE TEXTURIZAÇÃO

A texturização consiste em mudar a superfície da lâmina de silício para obter melhor aproveitamento da luz incidente. A ideia da texturização é aumentar a área da superfície exposta ao Sol, maximizando a absorção de fótons. Reduzir a refletância da superfície através da texturização também é um processo importante na melhoria da eficiência de células fotovoltaicas. Existem três tipos mais utilizados de texturização: a randômica, a de pirâmides invertidas e a de colméias. A texturização randômica é feita utilizando-se o agente corrosivo NaOH (hidróxido de sódio), juntamente com o álcool isopropílico (IP) que é catalizador para esta reação.

A determinação da orientação cristalográfica das lâminas usadas no processo de texturização é importante. O silício tem seus átomos arranjados em um modelo periódico tridimensional chamado rede cristalina. O silício possui a mesma rede cristalina do diamante, caracterizado por ligações covalentes tetraédricas entre os átomos. Esta estrutura pertence à família de redes cúbicas de face centrada e parâmetro de rede igual a  $3,42\text{Å}$ . Quando se fala em processos de corrosão anisotrópica, onde a anisotropia está associada à orientação cristalina dos planos atômicos do cristal, torna-se necessário definir os planos principais de uma rede cúbica e indexá-los de acordo com os índices de Miller <sup>[4]</sup>. Para a rede cristalina do silício o plano  $\langle 111 \rangle$  possui maior densidade de ligações entre átomos por unidade de área que os planos  $\langle 110 \rangle$  e  $\langle 100 \rangle$ . Portanto, espera-se que a taxa de corrosão do plano  $\langle 111 \rangle$  seja menor se comparado às demais orientações. A Fig. 1 traz um desenho dos planos cristalinos  $\langle 111 \rangle$ ,  $\langle 110 \rangle$  e  $\langle 100 \rangle$  <sup>[5]</sup>. Portanto, graças à facilidade de corrosão no plano  $\langle 100 \rangle$ , utilizam-se lâminas de silício com esta orientação

cristalográfica, pois a direção deste plano cristalino é normal a superfície da lâmina <sup>[4]</sup>.

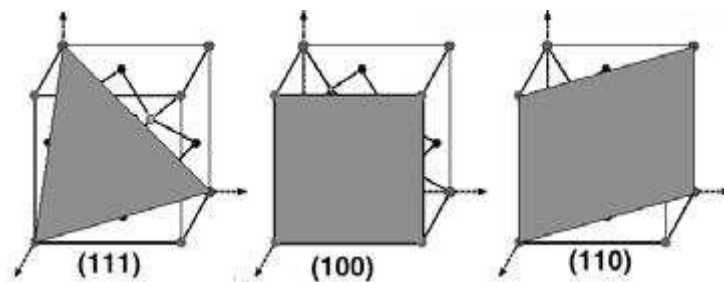


Figura 1: Planos cristalinos  $\langle 111 \rangle$ ,  $\langle 100 \rangle$  e  $\langle 110 \rangle$  respectivamente. <sup>[5]</sup>

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Antes da texturização as lâminas são submetidas ao ataque químico com solução aquosa de NaOH em alta concentração (decapagem), que tem como objetivo criar pequenos defeitos na superfície e favorecer a corrosão. A decapagem utiliza NaOH (44g) dissolvido em água deionizada (100 ml), temperatura de 89°C por 10 minutos. Após o ataque químico as lâminas são neutralizadas com água corrente e secas com gás nitrogênio.

Em seguida, faz-se a texturização das lâminas, com solução de NaOH em baixa concentração. A limpeza da lâmina com solventes orgânicos, após a texturização, é feita para remover vestígios dos produtos usados na texturização. Esse procedimento é importante antes de se iniciar o processo de confecção de células, pois qualquer resíduo poderá atrapalhar no processo de confecção das células.

Para a texturização são preparadas duas soluções: solução 1, num béquer dissolve-se NaOH (2 g) em água deionizada (10 ml). A solução 2, num balão volumétrico são diluídos 10 ml da solução 1 em 100 ml de água deionizada a temperatura da solução deve atingir ~ 90°C. Em seguida são adicionados, 10ml de álcool isopropílico, que tem função de catalizador da reação. A lâmina permanece submersa na solução por 11 minutos, tempo necessário para que a texturização ocorra em toda a superfície da amostra. Decorrido esse tempo a amostra é rapidamente retirada da solução e neutralizada com água deionizada. Em geral, a primeira lâmina texturizada

apresenta algumas manchas indicando que a texturização não foi completa. A observação que a primeira lâmina texturizada sempre apresenta manchas ainda não é bem compreendida. Trabalhos na literatura relatam esse problema e sugerem algumas hipóteses. Um dos trabalhos encontrados relata um experimento que demonstra a importância da presença de silício no início da reação [10]. No experimento são adicionados 2g de silício em pó à solução. A intenção era comparar dois processos tendo como objetivo a otimizar do tempo de texturização das amostras. O primeiro processo demorou 144 min para texturizar todas as lâminas, enquanto o segundo, onde foi adicionado 2g de silício demorou 30 min. Portanto, acredita-se que o silício seja também um catalizador da reação assim como o álcool isopropílico. Como a nossa solução inicialmente não tem silício dissolvido, utilizamos a primeira lâmina como sacrifício para fornecer silício para a solução fazendo com que o tempo de texturização das outras lâminas diminua e a texturização se realize sobre toda a superfície da lâmina.

Com o processo de texturização descrito acima, é possível texturizar quatro amostras e o tempo médio do experimento é de 44 minutos. Sendo que a cada nova lâmina são adicionados 2ml de álcool isopropílico à solução. Durante o processo de texturização parte da solução evapora ocasionando diminuição do volume e alteração da concentração de NaOH. Acredita-se que se a texturização fosse feita num sistema fechado, que permitisse coletar a água e o álcool perdidos pela evaporação e, reabastecer a solução, mantendo o volume e a concentração de NaOH constantes, seria possível prolongar e reproduzir com maior sucesso o experimento. A montagem de um novo sistema que permita reutilizar a água e o álcool perdidos durante o processo de texturização foi a motivação deste trabalho. A Fig. 2 apresenta um desenho do novo sistema projetado para ser usado na texturização das amostras. O sistema projetado constitui-se de um béquer e 2 litros, um balão volumétrico, que encaixa na saída do béquer para servir de coletor um condensador.



Figura 2: Desenho do novo sistema projetado para ser usado na texturização das amostras.

O objetivo de se montar um novo sistema para texturização é minimizar a perda da solução por evaporação. Porém, outros parâmetros também serão controlados neste novo sistema, tais como: temperatura e o pH da solução. Para isto serão utilizados um termômetro e um Phmetro, que ficarão em contato com a solução durante todo o experimento. O tamanho do bécker foi determinado primeiramente pelo tamanho do porta-amostra, já que ele definirá o volume da solução para que a lâmina fique completamente submersa na solução. O novo sistema também possui uma bureta que servirá para reabastecer a solução de álcool e água, caso seja necessário. O termômetro, o pH e a bureta ficarão presos no coletor posicionado na saída do bécher. A tabela 1 traz algumas informações sobre o termômetro, o Phmetro e a bureta usados na montagem e a disposição deles no coletor. A Fig. 3 apresenta um desenho com a disposição dos objetos. A escolha levou em consideração o torque que cada objeto faz para baixo no balão. Estas medidas foram feitas para que, quando montado, o balão não inclinasse para um lado (ou seja, o torque resultante sobre o balão deve ser zero).

Tabela 1: Informações sobre o termômetro, pHmetro e bureta escolhido para o sistema e a posição com que ficaram fixos no coletor.

	Massa (g)	Torque (N.cm)	Raio (cm)
<b>Bureta + álcool</b>	54,42 +- 0,01	2,29+-0,05	4,3+- 0,1
<b>Phmetro</b>	42,61+- 0,01	1,67 +- 0,04	4,0+-0,1
<b>Termômetro</b>	13,01+-0,01	0,38 +- 0,01	3,0+-0,1

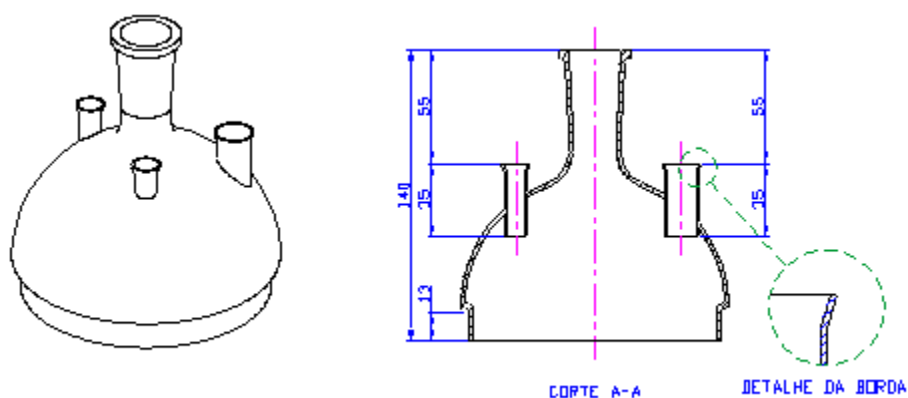


Figura 3: Desenho da tampa que será colocado na saída do Becker e a disposição do termômetro, do pHmetro e da bureta no sistema.

No novo sistema, diferente do que é feito hoje a solução será agitada, visando acelerar o processo de texturização. Para tal será utilizada um agitador magnético, que terá seu movimento limitado por uma placa de petri com furos. Essa medida é para evitar que o agitador perca a rotação e quebre a amostra durante a texturização.

### 3. RESULTADOS:

As imagens abaixo mostram o aparato idealizado para texturização já montado como também o pórtia amostras.

#### 3.1. Aparato de texturização mais porta amostras:



Figura 4: Fotografia do aparato montado com o termômetro o condensador a bureta e o porta amostras em seu interior (sem o phmetro por questões de fragilidade e manutenção).



Figura 5: Fotografia mostrando com mais detalhes o béquer onde será feita a texturização





Figura 6: fotografia da tampa

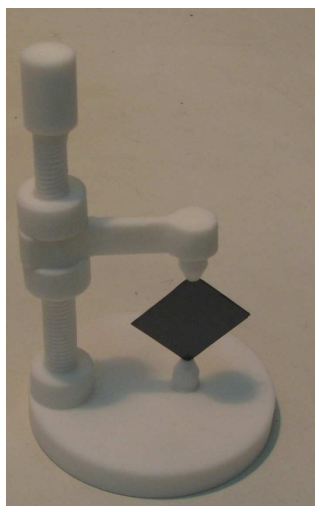


Figura 7: fotografia do porta amostras.

#### 4. CONCLUSÃO:

O aparato funcionou como deveria, fazendo com que grande parte da solução se condensasse na tampa e no condensador. Conseguiu-se a texturização de algumas pastilhas de silício, entretanto não obteve-se ainda o resultado desejado. Porém conseguiu-se alguns dados satisfatórios para saber que caminho deve-se ser tomado no experimento.

5. MEU ORIENTADOR CONCORDA COM O EXPRESSADO NESTE RELATÓRIO PARCIAL E DEU A SEGUINTE OPINIÃO:

O Hugo vem realizando um bom trabalho sobre texturização randômica de silício monocristalino (100) para uso como superfície anti-refletora em células solares. Ele tem trabalhado com dedicação e de forma sistemática. Contribue com ideias nos projetos e nos trabalhos. Já conseguiu montar o sistema para a realização controlada do processo e já obteve sucesso nas texturizações nos primeiros testes realizados.

Considero que ele tem tido um bom desempenho.

## 7. COMENTÁRIOS DO COORDENADOR:

Projeto: Projeto aprovado.

Relatório Parcial: RP aprovado. A data de 2010 não corresponde, é 1o semestre de 2011

---

## REFERÊNCIAS

- [1] PROENÇA, Fernanda PELEGRINI HONORATO. **Tecnologia Para Texturização Hemisférica Suave De Células Solares Fotovoltaicas**. Tese de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
- [2] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL.  
Disponível em:  
<[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia\\_solar/3\\_3\\_2.htm](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia_solar/3_3_2.htm)>. Acesso em: 01 de Maio. 2011.
- [3] SHU-CHUNG CHIAO; ZHOU JIU-LIN; MACLEOD, A.H. **Optimized design of an antireflection coating for textured silicon solar cells**. Applied Optics, Vol. 32, Nº 28, 1 October 1993.
- [4] SAUL, Cyro Ketzer. **Corrosão Anisotrópica de Silício em Soluções Alcalinas Fundamentos e Aplicações**. Sensores y Microsistemas, Vol I, Tecnologias de fabricacion CYTED, Subprograma IX, Microelectronica Red IX.I, Tecnologias para el Desarrollo de Sensores y Microsistemas. p. 45-76 Feb, 2004, Buenos Aires - Argentina.
- [5] COSTA, Rodolfo Felipe de Oliveira. **Investigação de aspectos topológicos de componentes e dispositivos microfabricados em silício**. Tese de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

## ENERGIA SOLAR

### 3.3.2 – Conversão Direta da Radiação Solar em Energia Elétrica

Além dos processos térmicos descritos acima, a radiação solar pode ser diretamente convertida em energia elétrica, por meio de efeitos da radiação (calor e luz) sobre determinados materiais, particularmente os semicondutores. Entre esses, destacam-se os efeitos termoelétrico e fotovoltaico. O primeiro se caracteriza pelo surgimento de uma diferença de potencial, provocada pela junção de dois metais, quando tal junção está a uma temperatura mais elevada do que as outras extremidades dos fios. Embora muito empregado na construção de medidores de temperatura, seu uso comercial para a geração de eletricidade tem sido impossibilitado pelos baixos rendimentos obtidos e pelos custos elevados dos materiais.

O efeito fotovoltaico decorre da excitação dos elétrons de alguns materiais na presença da luz solar (ou outras formas apropriadas de energia). Entre os materiais mais adequados para a conversão da radiação solar em energia elétrica, os quais são usualmente chamados de células solares ou fotovoltaicas, destaca-se o silício. A eficiência de conversão das células solares é medida pela proporção da radiação solar incidente sobre a superfície da célula que é convertida em energia elétrica. Atualmente, as melhores células apresentam um índice de eficiência de 25% (GREEN et al., 2000).

Para a geração de eletricidade em escala comercial, o principal obstáculo tem sido o custo das células solares. Segundo BAJAY et al. (2000), atualmente os custos de capital variam entre 5 e 15 vezes os custos unitários de uma usina a gás natural que opera com ciclo combinado. Contudo, nos últimos anos tem-se observado redução nos custos de capital. Os valores estão situados na faixa de US\$ 200 a US\$ 300 por megaWatt-hora e entre US\$ 3 e US\$ 7 mil por quiloWatt instalado (Tabela 3.2).

A Figura 3.7 ilustra um sistema completo de geração fotovoltaica de energia elétrica.

Tipo de célula	Eficiência (%)			Custo (US\$/Wp)
	Teórica	Laboratório	Comercial	
Silício de cristal simples	30,0	24,7	12 a 14	4 a 7
Silício concentrado	27,0	28,2	13 a 15	5 a 8
Silício policristalino	25,0	19,8	11 a 13	4 a 7
Silício amorfo	17,0	13,0	4 a 7	-

Fonte: GREEN, M. A. et al. Solar cell efficiency tables: version 16. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Sydney, v. 8, p. 377-384, 2000.



Fonte: CENTRO DE REFERÊNCIA PARA A ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO - CRESESB. Informe Técnico, Rio de Janeiro, v. 2, n. 1, jun. 1996. Disponível em: [www.cresesb.cepel.br/Publicacoes/informe2.htm](http://www.cresesb.cepel.br/Publicacoes/informe2.htm) (Adaptado).

