



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**Obtenção e caracterização de filmes finos para aplicações em células solares e dispositivos de aplicações espaciais**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
(PIBIC/CNPq/INPE)**

**Lilian Hoshida (UNIVAP, Bolsista PIBIC/CNPq)**

E-mail: [lilian@las.inpe.br](mailto:lilian@las.inpe.br)

**Dr. Antonio Fernando Beloto (LAS/CTE/INPE, Orientador)**

E-mail: [beloto@las.inpe.br](mailto:beloto@las.inpe.br)

**COLABORADORES**

**M.Sc. José Carlos Nunes Reis (LAS/CTE/INPE)**

**Tecnologista Waldeir Amaral Vilela (LAS/CTE/INPE)**

**Dr. Mário Ueda (LAP/CTE/INPE)**

**Maio 2004**

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</b>	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO 2 – A CAMADA ANTI-REFLETORA</b>	<b>5</b>
<b>CAPÍTULO 3 – OBTENÇÃO DAS CAMADAS ANTI-REFLETORAS</b>	<b>8</b>
3.1 – Preparação do substrato	8
3.2 – Deposição por CVD	8
3.3 – Deposição por evaporação	8
3.4 – Deposição por sputtering	9
3.5 – Princípio de operação do “electron beam” utilizado para evaporação por feixe de elétrons	9
3.6 – Anodização	10
3.7 – Obtenção de camadas anti-refletores por “vapour etching”	11
3.8 – Obtenção de camadas anti-refletores por “stain etching”	11
<b>CAPÍTULO 4 – RESULTADOS</b>	<b>12</b>
<b>CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES</b>	<b>15</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>16</b>

## Capítulo 1

### Introdução

Uma opção interessante na busca de fontes alternativas de energia é a conversão de energia solar em elétrica ou seja, a conversão de uma partícula luminosa com energia (fóton) em energia eletromotriz (voltaica). Células solares ou fotovoltaicas, podem converter energia solar em elétrica. A conversão direta de energia solar em energia elétrica é realizada nas células solares através do efeito fotovoltaico, que consiste na geração de uma diferença de potencial elétrico através da radiação. O efeito fotovoltaico ocorre quando fótons incidem sobre átomos do material semiconductor, provocando a emissão de elétrons, gerando corrente elétrica. Este processo não depende da quantidade de calor, pelo contrário, o rendimento da célula solar cai quando sua temperatura aumenta. A energia obtida desta maneira apresenta vantagem como não ser poluente, ser renovável, de fácil manutenção e não necessitar de longas linhas de transmissão. Mas por outro lado, existem desvantagens, como a necessidade de acúmulo de energia e o fato de ainda não serem competitivas economicamente, na maioria dos casos, como outras fontes tradicionais de energia.

A célula solar mais conhecida é a de silício monocristalino. A estrutura da célula pode ser vista na figura 1. O processo de fabricação basicamente compreende a formação de junções pn e np, obtidas pelo processo de difusão de átomos de fósforo e boro em forno de tubo aberto ou implantação iônica, a metalização, realizada por feixe de elétrons, por onde será coletada a corrente fotogerada e, a camada anti-refletora (CAR), depositada também por feixe de elétrons. No caso de uma célula solar de uso espacial, a lâmina de silício utilizada é de alta pureza (silício obtido por fusão zonal), a metalização é uma liga ternária composta de titânio, paládio e prata e a camada anti-refletora pode ser uma simples camada de  $Ta_2O_5$  ou uma camada dupla de  $ZnS/MgF_2$ . O painel solar é composto de células solares conectadas em série e em paralelo, projetado para suprir uma determinada quantidade de energia, necessária, por exemplo, para o funcionamento de um satélite.

Um dos objetivos deste trabalho é o estudo de camadas anti-refletoras obtidas por evaporação através de feixe de elétrons. Serão também desenvolvidas camadas de silício poroso, obtido por processo de ataque químico para utilização como CAR em células solares de silício.. Essas camadas serão caracterizadas utilizando-se um perfilômetro, para medida da espessura da camada, um espectrofotômetro para medidas de refletância e um microscópio eletrônico de varredura para análise da camada de silício poroso.

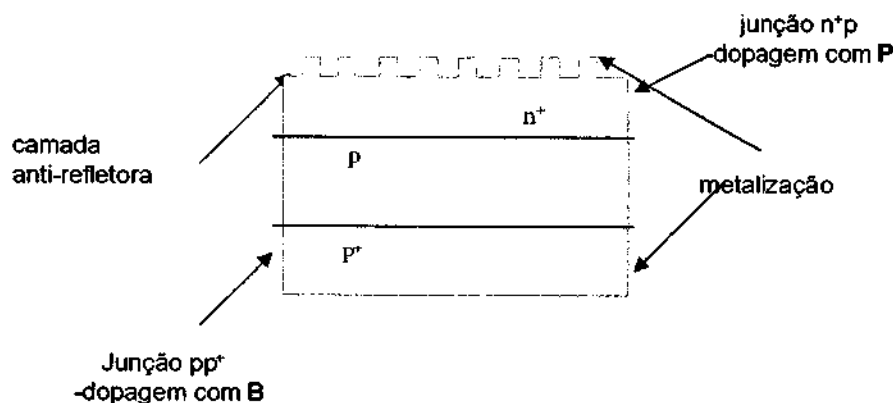


Figura 1 - Estrutura de uma célula solar de silício de aplicação espacial

O silício possui um índice de refração compreendido entre 3,5 e 4,0 para fótons do espectro solar, ou seja, implica numa reflexão de cerca de 35% da luz que incide numa superfície não tratada de silício. Essa perda resulta num dos fatores que diminuem o rendimento das células solares e, com o uso de camadas anti-refletores, pode-se reduzir essa reflexão. Essas camadas são filmes finos depositados sobre o material, cuja espessura é de um quarto de comprimento de onda, na região de máxima densidade de fótons do espectro solar, que incide sobre a superfície terrestre. As camadas são geralmente obtidas através de evaporação a vácuo, crescimento térmico, CVD, aspersão e "sputtering", e são de materiais transparentes como  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  <sup>(1)</sup>. O silício poroso, obtido através de anodização, "stain etching" ou "vapour etching", também pode ser usado como CAR.

## Capítulo 2

### A camada anti-refletora

Ao atravessar a interface entre meios de diferentes índices de refração, uma parcela da luz incidente é refletida. A quantidade de luz refletida pode ser determinada pela equação abaixo, considerando a luz passando do meio 1 para o meio 2:

$$R = \frac{(n_1 - n_2)^2 + k_2^2}{(n_1 + n_2)^2 + k_2^2} \quad (1.1)$$

onde:

R – refletividade (fração refletida da intensidade de luz com incidência normal)

$n_1$  – índice de refração do meio 1.

$n_2$  – índice de refração do meio 2.

$k_2$  – coeficiente de extinção do meio 2.

O coeficiente de extinção  $k$ , é a parte imaginária do índice de refração, onde  $k = \alpha\lambda / 4\pi$  e  $\alpha$  é o coeficiente de absorção e  $\lambda$  é o comprimento de onda.

A equação 1.1 é válida somente para incidência normal. O caso da luz incidente a um ângulo  $\theta$  com a normal é determinado pelas equações de Fresnel<sup>(2)</sup>.

As perdas por reflexão da luz incidente para uma interface silício ( $n \cong 3,8$ ) e o ar ( $n = 1$ ) são significativas (cerca de 30% na maior parte do espectro visível). O uso de uma camada anti-refletora (CAR) reduz consideravelmente estas perdas. Por possuir um índice de refração intermediário esta camada melhora o acoplamento ótico entre o ar e o silício.

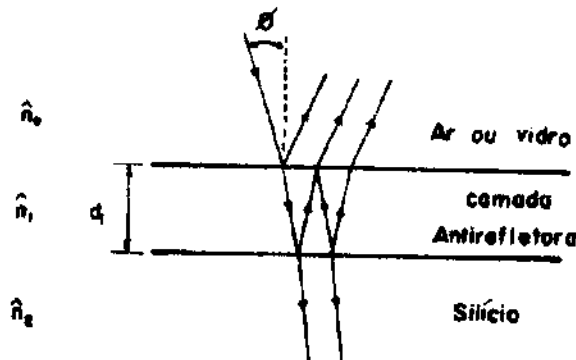


Figura 2.1 – Efeitos de interface criados por uma camada anti-refletora.

Para um feixe de luz com um ângulo de incidência  $\theta$  com a normal (figura 2.1), a quantidade de luz refletida da superfície de um material coberto por uma camada transparente de espessura  $d_1$  é<sup>(2)</sup>:

$$R = \frac{r_1 + 2r_1r_2 \cos 2\theta + r_2^2}{1 + 2r_1r_2 \cos 2\theta + r_1r_2^2} \quad (1.2)$$

onde  $r_1$  e  $r_2$  são dados por:

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \quad r_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad (1.3)$$

sendo  $n_1$  a parte real dos índices de refração ( $\tilde{n}$ ), cujos coeficientes de extinção foram considerados desprezíveis, e  $\theta$  é dado por:

$$\theta = \frac{2 \pi n_1 d_1 \cos\theta}{\lambda} \quad (1.4)$$

A refletividade, na presença de camadas intermediárias, tem um valor mínimo para um determinado comprimento de onda  $\lambda_0$  para uma espessura dada por

$$n_1 d_1 = \lambda_0 / 4 \quad (1.5)$$

cujo valor é:

$$R_{\min} = \frac{(n_1^2 - n_0 n_2)^2}{(n_1^2 + n_0 n_2)^2} \quad (1.6)$$

Este valor é zero se o índice de refração da CAR é:

$$n_1^2 = n_0 \cdot n_2 \quad (1.7)$$

Para o silício no ar, o índice de refração ótimo da CAR, é aproximadamente, 1,9. O monóxido de silício (SiO) e o dióxido de estanho (SnO<sub>2</sub>) apresentam índices de refração entre 1,8 e 2, sendo largamente utilizados como CAR.

Menor refletividade média sobre uma faixa maior de comprimentos de onda pode ser obtida usando duas camadas anti-refletoras. Numa aplicação prática, a célula solar sempre será encapsulada sobre vidro ou embebida em um material com índice de refração similar ao vidro ( $n \cong 1,5$ ). Isto constitui um sistema de duas camadas. A equação equivalente à equação 1.7 para o caso de duas camadas é:

$$\frac{(n_2)^2}{(n_1)^2} = \frac{n_3}{n_0} \quad (1.8)$$

onde  $n_3$  é agora o índice de refração do silício. Considerando o índice de refração do vidro ( $n_1$ ) igual a 1,5, pela equação 1.8 o melhor índice de refração é  $n_2 \cong 2,3$ . A figura 2.2 mostra a refletância (porcentagem refletida da luz incidente) para os casos das camadas anti-refletoras acima citadas, projetadas para mínima reflexão, em  $\lambda_0 = 600\text{nm}$ , comparadas a uma superfície de silício sem nenhum óxido.

O óxido de titânio (TiO<sub>x</sub>,  $n \cdot 2,2$ ) tem maior índice de refração e menor absorção do que o monóxido de silício ( $n \cong 1,9$ ), e ambos constituem uma boa escolha para um sistema de dupla camada. Estes dois materiais, entretanto, apresentam forte absorção para  $\lambda < 400\text{nm}$ , não sendo convenientes para células de alta resposta espectral nesta região do espectro solar. O pentóxido de tântalo (Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) tem um índice de refração conveniente ( $n$  entre 2,15 e 2,26) e menor absorção na região de comprimento de onda curto comparado aos óxidos citados sendo muito utilizado para CAR de células de uso espacial. Em 1993 Martin A. Green <sup>(3,4)</sup> propôs um sistema composto de dupla camada de MgF<sub>2</sub> (1070 Å) e ZnS (605 Å), depositadas sobre uma fina camada de SiO<sub>2</sub>, de aproximadamente 100 Å, utilizada como camada de passivação, sobre uma superfície texturizada de silício para células solares de alta eficiência.

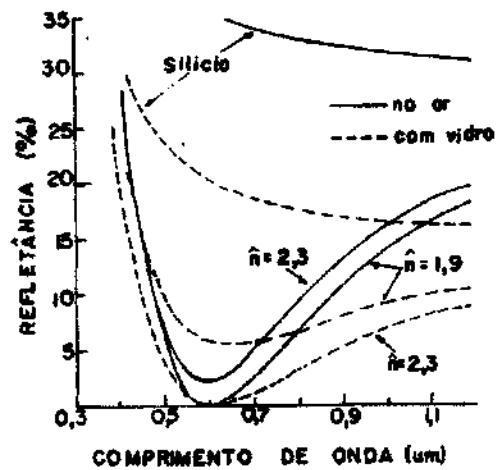


Figura 2.2 – Refletância versus comprimento de onda para CAR com índices de refração 1,9 e 2,3 otimizadas para  $\lambda = 600\text{nm}$ . A linha tracejada mostra o efeito do encapsulamento do silício com vidro ou outro material com  $n$  semelhante.

A tabela 1 mostra os índices de refração dos materiais comumente utilizados no sistema anti-refletor de uma célula solar<sup>(5,6)</sup>

Tabela 1 – Índices de refração dos materiais usados como camada anti-refletores

MATERIAL	ÍNDICE DE REFRAÇÃO
MgF <sub>2</sub>	1,37 – 1,39
Adesivo	1,41
Cobertura de vidro	1,47
SiO <sub>2</sub>	1,44
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,6 – 1,9
SiO	1,8 – 2,0
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	~ 1,9
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,15
TiOx	2,2
ZnS	2,3 – 2,4
Silício	4,1

### Capítulo 3

Neste capítulo descrevemos a preparação dos substratos e como são obtidas as camadas anti-refletoras, citando alguns processos que podem ser utilizados. Mais detalhadamente serão descritos os processos utilizados neste trabalho: evaporação por feixe de elétrons e obtenção de silício poroso por anodização e "vapour etching".

#### Preparação dos substratos

A superfícies das lâminas ou das células solares devem ser preparadas para garantir propriedades elétricas e óticas adequadas. Antes de se depositar o material ou, antes de fazer o ataque químico, é necessário que se faça uma limpeza nas lâminas de silício para se ter uma boa aderência do material a ser depositado e para a remoção de óxidos e impurezas que podem estar contidas na superfície das lâminas.

Preparação da solução:

1 a) 50 mL de  $H_2O_2$  + 100 mL de  $H_2SO_4$  na proporção (1:2)

1 b) 100 mL de HF + 100 mL de  $H_2O$  deionizada na proporção (1:1)

Para o processo de "vapour etching", segue-se o seguinte processo de limpeza: mergulha-se a amostra na acetona por 5 Seg, e depois em etanol por 5 seg. Em seguida coloca-se a amostra na solução 1 a) durante 10 min. Em seguida em  $H_2O$  deionizada (água corrente) por 2 min. Depois na solução 1 b) por 1 min e, por fim, volta-se para a  $H_2O$  deionizada (água corrente) por 4 min.

#### Obtenção de Camadas Anti-Refletoras

##### Deposição por CVD

Neste processo, os reagentes específicos e gases diluentes inertes são introduzidos em determinada quantidade (com fluxo controlado) em uma câmara de reação. Os gases difundem até a superfície do substrato. Os reagentes são então adsorvidos na superfície. Os átomos adsorvidos reagem formando o filme. Os subprodutos da reação são removidos na câmara.

##### Deposição por evaporação

A deposição de filmes finos pode ser realizada pelo aquecimento do material fonte dos filmes em um ambiente de alto vácuo. Esse material aquecido evapora e se deposita nos substratos. O processo de evaporação permite altas taxas de deposição sem causar danos à superfície do substrato devido à baixa energia das espécies incidentes, contaminação mínima do filme pelo gás residual devido ao alto vácuo e pouco aquecimento do substrato. No entanto o processo de evaporação não permite o controle da composição de ligas.

A uniformidade da espessura do filme é obtida distribuindo-se os substratos em um suporte planetário que, durante a evaporação, gira em torno de um eixo vertical da câmara de processo enquanto que os vários suportes giram em torno de um eixo secundário.

Existem três tipos de sistemas de evaporação, que diferem pelo seu método de aquecimento: aquecimento resistivo, aquecimento por feixe de elétrons e aquecimento indutivo.



O método de evaporação por aquecimento resistivo consiste em colocar o material fonte em uma barquinha metálica ou suspenso por um filamento de W. Pela passagem de corrente, processa-se então o aquecimento do suporte fundido o metal fonte. Embora simples, este tipo de evaporador apresenta várias restrições: metais refratários não podem ser evaporados devido ao seu alto ponto de fusão, evaporação do material do filamento pode contaminar o filme, não se consegue controlar com precisão a espessura do filme e não se consegue controlar a composição das ligas.

O método de evaporação por feixe de elétrons consiste num feixe de elétrons de alta energia, saindo do ânodo e direcionado por um campo magnético até o material a ser evaporado contido num cadinho resfriado. O feixe de elétrons é focalizado e varrido de maneira controlada sobre o material a ser fundido, permitindo assim filmes de alta pureza. O grande problema desse método é a produção de raios-X causada pelo freamento dos elétrons no alvo.

E o método de evaporação por aquecimento indutivo consiste no aquecimento produzido por uma fonte de rf. O cadinho é envolto por uma bobina resfriada a qual se aplica o sinal de rf. Este sistema não produz radiação ionizante mas tem a desvantagem de ter o contato direto entre o material fonte e o cadinho, o que pode provocar a contaminação do filme depositado.

### Deposição por sputtering

O sputtering inicia-se com a introdução do gás base do plasma. Geralmente utiliza-se um gás nobre com elevado número de massa como por exemplo o Argônio (Ar). O plasma é formado quando se aplica um potencial negativo ao alvo devido à ionização dos átomos de argônio. Estes íons são atraídos pelo alvo e irão desbastá-lo, causando o sputtering. Os átomos ejetados que possuírem momentum linear suficiente, viajam em direção do substrato onde serão depositados.

Neste trabalho, utilizamos o sistema de deposição de filmes finos (electron beam) Auto 306 da Edwards, existente no Laboratório de Materiais e Sensores, para deposição das camadas anti-refletoras. Foram também produzidas amostras de silício poroso através do método conhecido como "vapour etching", para serem utilizadas como CAR em células solares.

### Princípio de operação do "Electron Beam" utilizado para a evaporação por feixe de elétrons

O sistema é composto de uma bomba de vácuo mecânica, para o pré-vácuo e uma bomba criogênica para alto vácuo, que no nosso caso pode chegar a uma pressão da ordem de  $10^{-7}$  mbar. Quando a câmara de deposição está com a pressão apropriada inicia-se o processo de evaporação. A fonte de alimentação do equipamento é ligada, aquecendo o filamento de tungstênio até este se incandescer. A placa de ânodo está com o mesmo potencial negativo que o filamento e na abertura desta placa forma um feixe de elétrons.

Com um ímã permanente, são criados campos magnéticos, direcionando o feixe de elétrons num ponto dentro do cadinho. Esse feixe pode ser varrido nas direções X e Y.

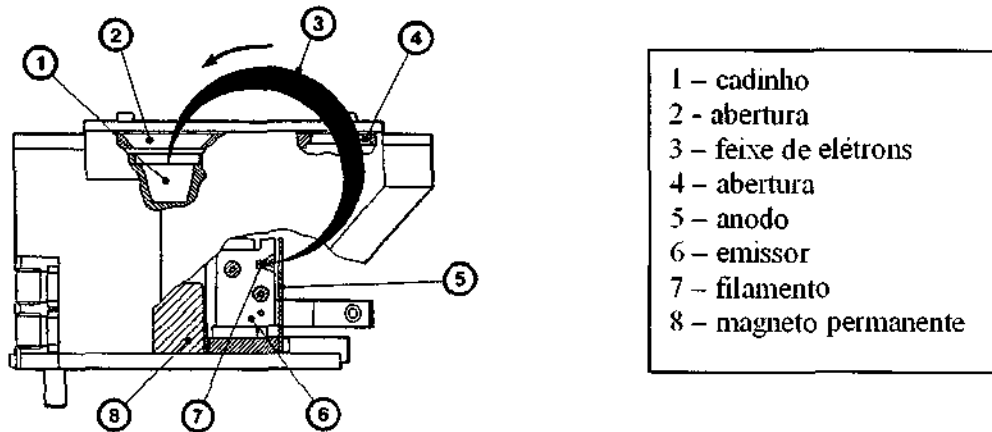


Figura 3.1 – Princípio de operação do equipamento “electron beam” Auto 306.

O feixe de elétrons formado, contém energia o suficiente para evaporar o material contido dentro do cadinho.

Alguns parâmetros importantes devem ser considerados, como: temperatura, vácuo e taxa de depósitos, que são monitorados no próprio equipamento. A espessura do material depositado é determinada pela taxa do depósito, que por sua vez depende da densidade e da impedância acústica do material. A taxa de depósito deve ser controlada, pois ela define a qualidade da camada.

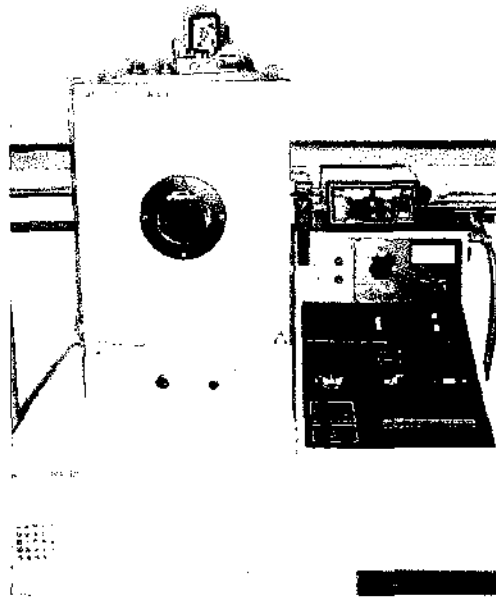


Foto 1 - Foto do equipamento utilizado: “Electron Beam” Auto 306 da Edwards.

### Anodização

Neste trabalho também foi estudada a preparação de silício poroso por anodização. Amostras obtidas por este processo, também podem ser utilizadas como CAR em células solares. Futuramente, essas amostras serão analisadas e os

resultados comparados com os obtidos pelo processo de "vapour etching" e "stain etching"

O silício poroso foi produzido por anodização em amostras de silício monocristalino do tipo n ou p. Para as amostras anodizadas (em presença de luz, amostras do tipo n e no escuro, amostras do tipo p), foi utilizada uma solução de HF + H<sub>2</sub>O + Etanol na proporção (1:1:2). Alguns parâmetros são relevantes durante a anodização tais como: densidade de corrente, tempo de anodização, concentração da solução e temperatura da solução.

Antes de se iniciar a anodização, realiza-se o processo de limpeza dos substratos de silício. Os procedimentos de limpeza estão descritos com maior detalhes no capítulo de processo de limpeza.

Para esse experimento, utiliza-se o potenciostato MQPG-01 da Micro Química, comandado por um software seguindo procedimentos específicos.

O desprendimento do hidrogênio na solução, produz formação de bolhas na superfície do silício, segundo a reação de dissolução:  $\text{Si} + 4\text{HF} \rightarrow \text{SiF}_4 + 2\text{H}_2$ . Para redução dessas bolhas e da tensão superficial é utilizado o etanol na solução.

### Obtenção de camadas anti-refletoras por "vapour etching"

O princípio do "vapour etching" consiste em expor o substrato de silício em contato com o vapor da solução ácida composta de HF, HNO<sub>3</sub> e NaNO<sub>4</sub>.

Os substratos devem estar devidamente limpos. Após a limpeza, o substrato deve ser colocado num suporte apropriado, que possa servir de tampa em algum recipiente não metálico que possa ser aquecido, no caso algum becker.

A solução é colocada no becker, tampada com o suporte contendo o substrato, e levada ao aquecimento numa temperatura de aproximadamente 70°C. É importante controlar essa temperatura, pois ela define a qualidade da camada, junto com o tempo que o substrato é exposto ao vapor da solução.

Neste trabalho foram obtidas várias camadas por esse processo, variando o tempo e em alguns casos, a temperatura.

### Obtenção de camadas anti-refletoras por "stain etching"

O princípio do "stain etching" consiste em mergulhar o substrato de silício em solução de HF, HNO<sub>3</sub> e 0,1g/L de NaNO<sub>2</sub> em tempos que variam de 1 a 10 minutos. Através desse simples processo, verifica-se porosidade nanométrica, ou seja, o silício poroso. Neste trabalho foram desenvolvidas algumas camadas através desse processo e comparadas com as outras obtidas por "vapour etching".

## Capítulo 4

Neste capítulo serão mostrados os resultados obtidos na obtenção e estudo de camadas anti-refletoras de dióxido de silício, obtidas por feixe de elétrons, utilizando-se o "electron beam" do LAS. Foram produzidas amostras com diferentes espessuras e os resultados comparados com o do silício polido, silício poroso e também com diferentes camadas de Pentóxido de Tântalo ( $Ta_2O_5$ ), já existentes no laboratório. As espessuras das camadas obtidas no trabalho foram inicialmente fixadas no electron beam, que possui equipamento apropriado para controle dessas espessuras e, posteriormente, confirmadas utilizando-se o perfilômetro existente no laboratório.

A figura 4.1 mostra a refletância em função do comprimento de onda, no intervalo de 400 a 850 nm. Geralmente, para uma célula solar de silício considera-se o intervalo de 400 a 1100 nm, que corresponde ao intervalo onde o silício absorve a radiação solar. No entanto, o espectrofotômetro utilizado para essas medidas não possui esfera integradora, utilizada nas medidas da refletância total, que cubra o intervalo completo. Apesar disso, a medida pode ser considerada satisfatória, uma vez que de 850 a 1100 nm, normalmente o valor da refletância se apresenta praticamente constante. Observa-se nesta figura, que a refletância muda com a espessura da camada de  $SiO_2$  e que o mínimo pode ser fixado para um determinado comprimento de onda. Como a região do espectro solar que apresenta maior intensidade está situada próxima a 600 nm devemos considerar a melhor camada, aquela que possuir um mínimo neste  $\lambda$ , ou seja, a camada de  $SiO_2$  com 1000 Å, que é muito semelhante à de 1100 Å, e a camada de  $Ta_2O_5$  com 695 Å. A camada de  $Ta_2O_5$  é mais apropriada, pois tem o mínimo com refletância zero, enquanto que a de  $SiO_2$  tem o mínimo com refletância em torno de 18%.

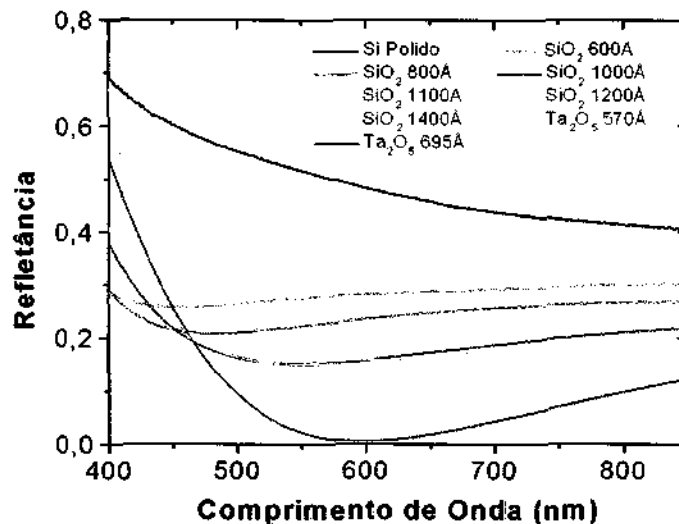


FIGURA 4.1 – Comparação das diversas camadas de  $SiO_2$  e  $Ta_2O_5$  em relação com o silício polido.

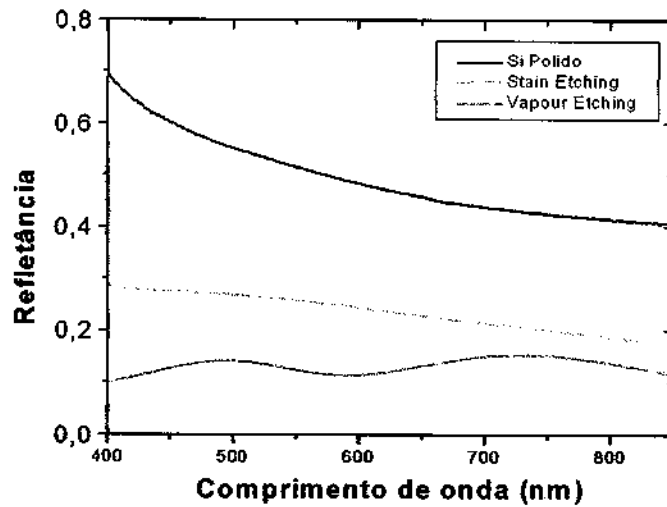


Figura 4.2 – Comparação entre dois processos “stain etching” e “vapour etching” e o silício polido.

A figura 4.2, mostra a medida da refletância para o silício polido e amostras de silício poroso obtidas pelos processos de “vapour etching” e “stain etching”. Neste caso, a refletância não apresenta um valor mínimo, mas pode-se verificar que a amostra preparada por ataque em vapor resultará em uma CAR de melhor qualidade que a obtida por ataque químico em solução, pois a refletância apresenta um valor abaixo de 10% ao longo do intervalo de interesse.

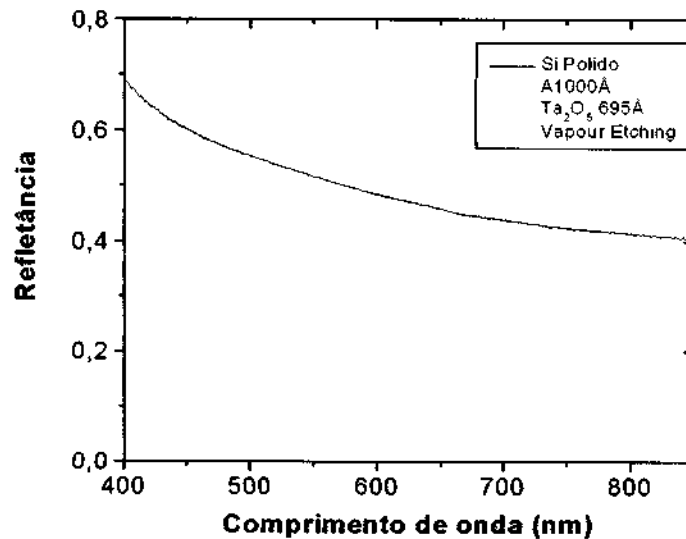


Figura 4.3 – Comparação entre as curvas obtidas com as melhores camadas.

A figura 4.3 mostra uma comparação entre as curvas de refletância do silício polido, da CAR de  $\text{SiO}_2$  com  $1000 \text{ \AA}$ , da CAR de  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  com  $695 \text{ \AA}$  e da amostra de silício poroso obtida por ataque em vapor. Neste caso, pode-se identificar claramente que o pentóxido de tântalo como a melhor opção de CAR entre as três.

Após este estudo inicial de otimização de camadas anti-refletores, foi depositada uma camada de  $\text{SiO}_2$  de  $1000 \text{ \AA}$  sobre uma célula solar para verificação do impacto da CAR sobre os parâmetros da célula. A célula solar utilizada é uma célula de silício, fabricada por pesquisadores do LAS, em substratos de Si de  $1\Omega\text{cm}$ , com área de  $4 \text{ cm}^2$  e sem a camada anti-refletores. A figura 4.4, mostra a curva corrente por tensão da célula, antes e depois do depósito da CAR. Na tabela 2, pode-se verificar que houve um aumento de  $27,9\text{mA}$  na corrente de curto circuito,  $4\text{mV}$  na tensão de circuito aberto e  $3,2\%$  na eficiência da célula.

É importante salientar que, para verificar a mudança nos parâmetros de saída da célula foi utilizada a CAR de  $\text{SiO}_2$ , pela facilidade com que ela pode ser obtida e também pelas condições do equipamento, que não permitiu o depósito da camada de  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ . Foi feita também uma tentativa de formação de uma CAR de silício poroso sobre uma outra célula de Si, mas a metalização da célula se despreendeu durante o processo, não possibilitando a verificação das mudanças dos parâmetros de saída da célula.

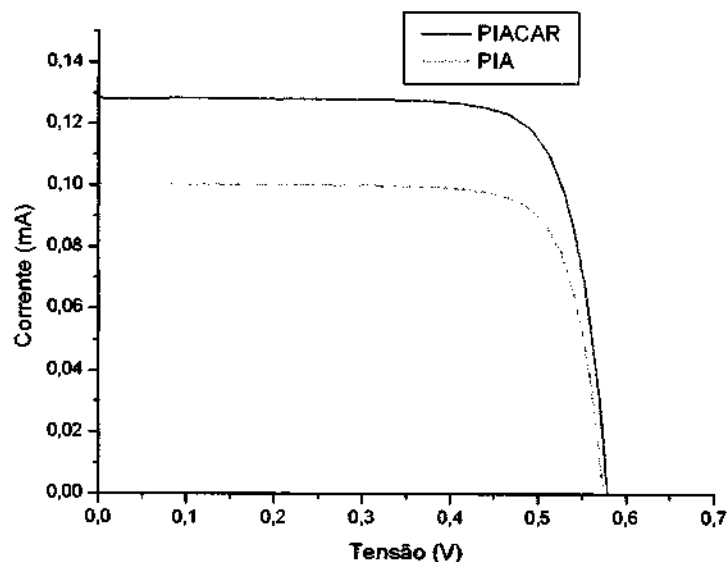


Figura 4.4 – Esse gráfico mostra a curva corrente versus tensão de uma célula solar sem a camada anti-refletores e com camada anti-refletores de  $\text{SiO}_2$  com  $1000 \text{ \AA}$ .

Tabela 2 – Resultados obtidos através da caracterização de uma célula solar de Si com e sem a CAR de  $\text{SiO}_2$ .

Célula	Corrente de curto circuito ( $I_{sc}$ )	Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ )	Eficiência
PIA sem camada	0,1003 A	0,5760 V	11,37%
PIA com camada	0,1282 A	0,5800 V	14,57%

## Conclusões

Através dos resultados obtidos podemos concluir que as camadas anti-refletoras são de grande importância para se reduzir a perda por reflexão em células solares.

Neste trabalho, foram desenvolvidas camadas anti-refletoras de  $\text{SiO}_2$  com diferentes espessuras e também camadas de silício poroso obtidas por ataque químico em vapor, que podem ser utilizadas como CAR. Posteriormente essas camadas foram caracterizadas através de medidas de refletância, perfilometria e medidas de curvas corrente por tensão de células solares, utilizadas para verificação da eficácia das camadas.

A refletância das camadas obtidas foi comparada com a do silício polido e concluiu-se que a camada de  $\text{SiO}_2$  com 1000 Å de espessura foi a mais apropriada devido ao valor de refletância mínima próximo ao comprimento de onda de 600nm, correspondente ao pico da intensidade da luz do espectro solar.

Posteriormente, foi depositada uma camada de  $\text{SiO}_2$  sobre uma célula solar de silício monocristalino, desenvolvida por pesquisadores do LAS anteriormente, e determinadas as mudanças nos valores dos parâmetros de saída dessas células. Verificou-se um aumento de 27,9mA na corrente de curto-circuito, 4mV na tensão de circuito aberto e 3,2% na eficiência da célula.

As camadas de silício poroso se mostraram bastante eficientes e promissoras apresentando uma refletância menor que 10% ao longo do intervalo de comprimento de onda de interesse.

O presente trabalho terá continuidade dando-se ênfase para a obtenção de camadas anti-refletoras de silício poroso, por ser um método de baixo custo que apresenta refletância abaixo de 10% no intervalo de 400 a 1100 Å. Também serão estudados filmes finos obtidos por implantação iônica por Imersão em Plasma de nitrogênio sobre silício e outros materiais.

## **Rerefências**

1. A. F. Beloto – Estudos das características de células solares de silício monocristalino.
2. O. S. Heaven – Optical Properties of thin solid films, Dover New York, 1965.
3. M. A. Green, Semiconductor Science Technology, vol. 8, Institute of Physics, Bristol, 1993. pp. 1-2.
4. J. Zhao, A. Wang, S.R. Wenham, M. A. Green, in: D Flood (Ed 24<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference, IEEE Press, New York, 1994. Pp. 1477-1480).
5. E.Y. Wang, F.T.S.YU, V.L.SIMMS, H.W. BRANDHORST, J.D.BRODER – In: 10<sup>th</sup> IEEE Phot. Spec. Conf., 1973, 168.
6. H.S Rauschenbach – Solar Cell Array Design Handbook.