

MEDIDA DA FOTOLUMINESCÊNCIA EM AMOSTRAS DE SILÍCIO POROSO

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

Ellen Christine de Souza Galvão (UNIFESP, Bolsista PIBIC/CNPq)

E-mail: ecsgalvao@unifesp.br

Luiz Ângelo Berni (LABAS/COCTE/INPE, Orientador)

E-mail: berni@las.inpe.br

Julho de 2017

Resumo

Neste período obtivemos amostras de silício poroso com duas concentrações de HF (48% e 40%) para diferentes tempos de ataque e densidades de corrente. Foram realizadas comparações de porosidade, índice de refração e velocidade de formação das camadas. A partir das medidas do índice de refração (n), espessura da camada (L) e da relação, $\lambda = 4nL$, onde λ é o comprimento de onda, foi possível produzir espelhos de Bragg para diversos comprimentos de onda. Todas as medidas foram obtidas pela Espectroscopia por Infiltração de Líquidos (Spectroscopic Liquid Infiltration Method - SLIM) e pelo microscópio eletrônico de varredura (FEG) que possibilitou a observação do tamanho real dos poros e seu formato colunar e espessura.

Abstract

In this period we obtained samples of porous silicon with two concentrations of HF (48% and 40%) for different attack times and current densities. Comparisons of porosity, refractive index and layer formation velocity were performed. From measurements of the refractive index (n), layer thickness (L) and the ratio, $\lambda = 4nL$, where λ is the wavelength, it was possible to produce Bragg Mirrors for different wavelengths. All measurements were obtained by Liquid Infiltration Spectroscopy (SLIM) and Scanning Electron Microscope (FEG), which allowed an observation of the actual pore size and its columnar shape and thickness.

LISTA DE FIGURAS

2.1 Amostra de silício poroso no substrato.....	2
3.1 Célula eletroquímica desmontada.....	3
3.2 Esquematização do processo de produção do SiPo	4
3.3 Célula eletrolítica e seus componentes	5
3.4 Amostras de Espelho de Bragg em diferentes comprimentos de onda.....	5
3.5 Estrutura de medição da refletância das amostras	6
3.6 Processo da Espectroscopia por Infiltração de Líquidos em diferentes meios e aplicação da FFT	7
4.1 Esquema de corrente alternada utilizado na produção do Espelho de Bragg.....	8
4.2 Gráfico de refletância para os diferentes comprimentos de onda.....	10
4.3 Gráfico de refletância para Espelho de Bragg com 700nm de comprimento de onda e múltiplas camadas	10
4.4 Poros de uma amostra de SiPo (500nm) ampliados 100 mil vezes e vista frontal da espessura da amostra ampliada 300 mil vezes.....	11
4.5 Vista de perfil de uma amostra de espelho de Bragg e comparação de espessura das camadas	12
4.6 Gráficos da Velocidade de Formação do SiPo e Porosidade	13
4.7 Gráficos do Índice de Refração para diferentes soluções_.....	13
4.8 Suporte com Película de Espelho de Bragg com 300 camadas_.....	15

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	1
2.1 Silício Poroso.....	1
2.2 Espelho de Bragg.....	2
3. MATERIAIS E MÉTODOS	3
3.1 Silício Poroso e sua produção.....	3
3.2 Espelho de Bragg.....	5
3.3 Espectroscopia por Infiltração de Líquidos (Spectroscopic Liquid Infiltration Method - SLIM)	6
4. RESULTADOS	8
4.1 Produção do Silício Poroso	8
4.2 Espelho de Bragg.....	8
4.3 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).....	11
4.4 Espectroscopia por Infiltração de Líquidos (SLIM).....	12
4.5 Mudança de Solução.....	13
4.6 Retirada da Película	14
5. DISCUSSÃO	15
6. CONCLUSÃO	17
7. TRABALHOS	18
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	18

1. INTRODUÇÃO

Historicamente, o Silício Poroso (SiPo) foi descoberto não intencionalmente pelo casal Uhlir, na década de 50, que pretendiam polir eletroquimicamente materiais semicondutores e observaram que seu polimento causou defeitos na superfície dos materiais, assim, posteriormente viram que os defeitos eram os poros gerados sobre o material semiconductor. (PAES, 2016)

Nas décadas de 70 e 80, o SiPo foi utilizado como camada dielétrica em sensores químicos, além de ocorrerem estudos de espectroscopia. Dando continuidade aos estudos, Leigh Canham observou a fotoluminescência do SiPo. E desde então, o material vem sendo estudado, possibilitando inúmeras aplicações como na optoeletrônica, microeletrônica, sensores químicos e biológicos (COSTA, 2008), baterias, células solares, dispositivos biomédicos e na área farmacêutica como veículo de drogas, resultado da característica de nanopartículas porosas (PAES, 2016).

O SiPo é oriundo do ataque eletroquímico do substrato silício pela aplicação de uma densidade de corrente selecionada por um determinado intervalo de tempo e este ataque irá gerar poros na estrutura do material. Esta nova estrutura porosa apresenta características únicas como fotoluminescência, profundidade colunar, espectro característico, refletância própria entre outros parâmetros.

Com base nas aplicações e vantagens do SiPo, o objetivo desta etapa do projeto é produzir e caracterizar o silício poroso, bem como a produção do Espelho de Bragg, observando suas características de porosidade, índice de refração, espessura, comprimento de onda ideal para os espelhos e a transmitância da película porosa.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Silício Poroso

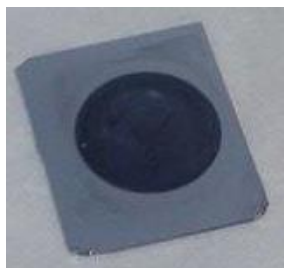
O silício poroso é um material com estrutura em forma de cristalitos de silício com dimensões nanométricas, que pode ser produzido através de inúmeros modos, como a

formação dos poros por meio de uma corrosão anódica em meio aquoso, em solução de HF (ácido fluorídrico) com ataque eletroquímico (AMARAL JR., 2014), ou em soluções de HNO₃ (ácido nítrico) e NaNO₂ (nitrito de sódio) (ABRAMOF, 2007).

Os poros são feitos no substrato de silício para que ele apresente características especiais quanto a sua fotoluminescência e funcionalidade em componentes eletrônicos voltados para a área óptica (PAES *et al*, 2014).

A Figura 2.1A apresenta uma amostra de silício poroso produzida no Laboratório Associado de Sensores e Materiais – LABAS, no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Na figura, o círculo é o SiPo que foi produzido sobre um substrato de Si (forma quadrada).

Figura 2.1 – Amostra de silício poroso no substrato.



2.2 Espelho de Bragg

O espelho de Bragg é baseado no princípio da interferência da luz em diferentes camadas, sendo que este espelho reflete somente em um comprimento de onda específico (escolhido).

Ele é formado por uma estrutura periódica composta por camadas alternadas de um alto índice de refração e uma camada de baixo índice de refração.

Com o cuidado da escolha da espessura das camadas é possível produzir um refletor de alta qualidade para comprimentos de onda na banda de parada fotônica, sendo que a camada porosa deve ter a espessura de $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda.

Para a escolha do material, são verificadas as seguintes propriedades: alto contraste entre os índices de refração dos materiais que farão parte das camadas do espelho para obter uma refletividade alta, sendo também necessário que haja uma baixa

resistência elétrica. Uma alta concentração de material dopante irá possibilitar uma melhor passagem de corrente no material escolhido, isso significa uma maior diferença no índice de refração (Δn) desse material (FILHO *et al*, 2003). E quanto maior for o valor de Δn , maior será a refletância das multicamadas.

No caso do SiPo, as multicamadas são geradas por meio de uma combinação de duas densidades de corrente diferentes, combinadas com tempos alternados (Figura 3.2). (SAILOR, 2012). De um modo geral, observa-se que a porosidade do SiPo é dependente da resistividade do material e da concentração da solução de HF.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Silício Poroso e sua produção

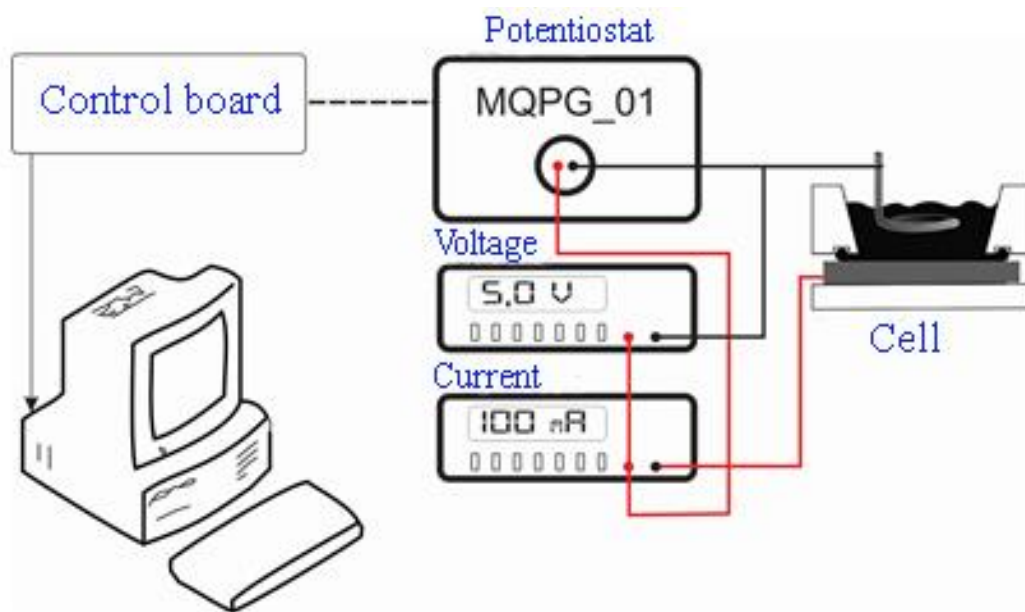
A fabricação do SiPo é realizada com ataque eletroquímico em uma amostra de silício tipo-n ou tipo-p (dopado) para a formação de uma camada porosa sobre o material. O ataque eletroquímico é realizado com ácido fluorídrico (HF) em uma célula eletroquímica, ligada a uma fonte de corrente. Na Figura 3.1, vê-se a célula eletroquímica desmontada com sua cuba em material PVC, o O'ring feito de borracha para vedação da célula, impedindo que a solução saia pela base. E vê-se também a base metálica de cobre e três parafusos que também são a base de apoio da célula.

Figura 3.1 - Célula eletroquímica desmontada.



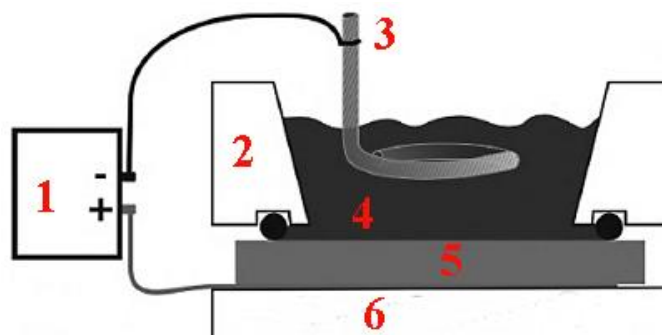
Na figura 3.2 é possível observar o processo de produção com o potenciostato, utilizado como fonte de energia e regulador das correntes e do tempo durante a produção do SiPo, controlado por um computador.

Figura 3.2 – Esquematização do processo de produção do SiPo.



A Figura 3.3 identifica os componentes da célula eletrolítica durante o processo de produção. O item 1 é a fonte de energia, o 2 é a cuba eletrolítica feita em material de PVC, o 3 é o eletrodo inerte de Platina que apenas conduz a eletricidade (catodo). Em 4, tem-se a solução eletrolítica de HF com álcool etílico. A superfície de contato com a solução é de metal condutor, como o cobre, que também proporciona condução de corrente (anodo) e sobre essa superfície metálica tendo contato direto com a solução, está o substrato de silício. O item 6 é a base de suporte da célula eletrolítica que não é condutor elétrico. Maiores detalhes sobre a produção do silício poroso se encontram no Apêndice.

Figura 3.3 – Célula eletrolítica e seus componentes.

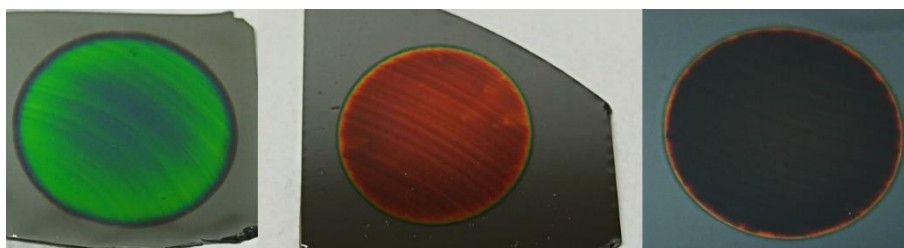


3.2 Espelho de Bragg

A produção do Espelho de Bragg é feita do mesmo modo apresentado no item 3.1 da produção da camada individual do SiPo, porém com sobreposição de múltiplas camadas.

A Figura 3.4 mostra três exemplos de Espelhos de Bragg, produzidos com diferentes comprimentos de onda, o que proporcionou as cores próximas ao verde, laranja e preto, que na literatura corresponderiam a aproximadamente 500nm, 600nm e acima de 800nm de comprimento de onda (SILVA, 2007).

Figura 3.4 – Amostras de Espelho de Bragg em diferentes comprimentos de onda.

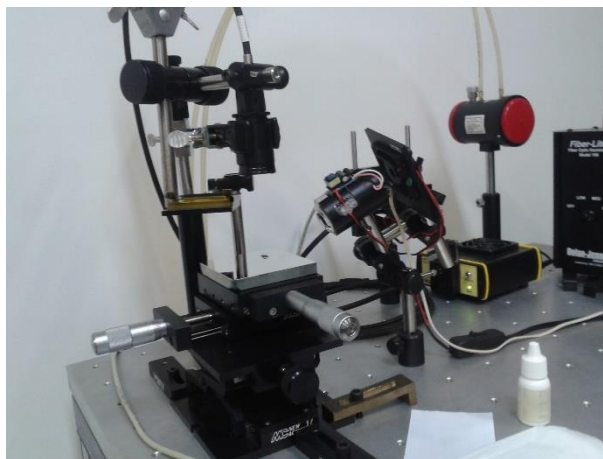


3.3 Espectroscopia por Infiltração de Líquidos (Spectroscopic Liquid Infiltration Method - SLIM)

A Espectroscopia por Infiltração de Líquidos é um método de medida da refletância não destrutivo da amostra durante o processo. O sistema é composto por uma mesa espelhada com ajuste de altura, um suporte de lente biconvexa, uma fibra ótica bifurcada para emissão de luz e recepção do sinal, uma fonte de luz com um filtro neutro de 10% de transmitância em sua saída e o espectrômetro (Figura 3.5).

O fabricante utilizado é Thorlabs (RP20) para as fibras, a fonte de luz é uma lâmpada halógena da GetSpec (getLight 3039 SET). As 6 fibras estão conectadas à fonte de luz e a sétima fibra está conectada ao espectrômetro da Oceanoptics (USB 2000), que realiza a medida da refletância.

Figura 3.5 - Estrutura de medição da refletância das amostras.

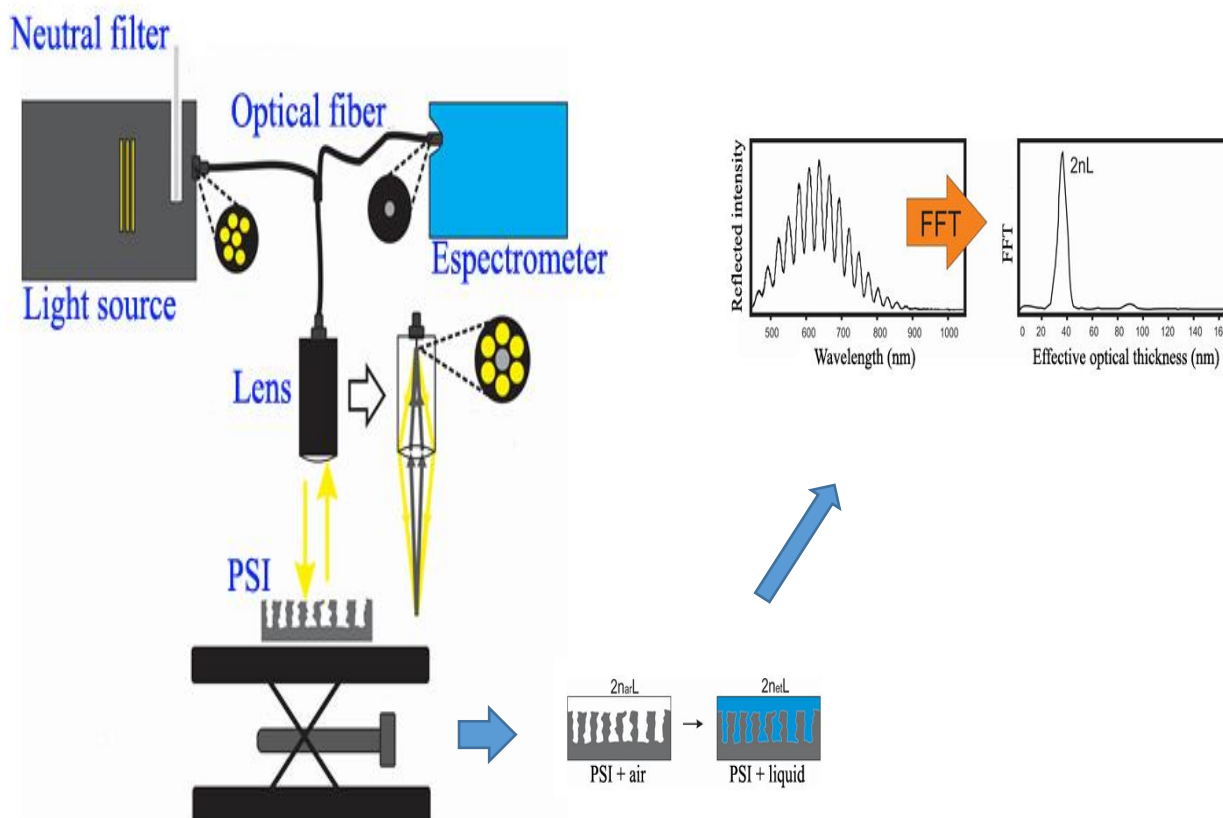


Após a captação do sinal, este é analisado com o Método de Espectroscopia de Interferência Reflectométrica por meio da Transformada de Fourier que estima a espessura e a porosidade das amostras de SiPo, sendo considerados pelo sistema os poros abertos.

O espectro obtido da intensidade refletida passa pela Transformada de Fourier, resultando em um espectro de amplitude única que irá determinar $2nL$, que é a espessura óptica do SiPo, e está relacionada ao índice de refração relativo do SiPo. (PAES, 2016)

O processo de espectroscopia SLIM pode ser visto no esquema apresentado na Figura 3.6 que demonstra a emissão de luz sobre a amostra e a captação da refletância em ambos os processos, ou seja, refletância da amostra com ar entre os poros e com o líquido de índice de refração conhecido, neste caso o etanol. E posteriormente a aplicação da Fast Fourier Transform, ou Transformada Rápida de Fourier (FFT) sobre a intensidade da luz refletida, captada pela fibra ótica.

Figura 3.6 – Processo da Espectroscopia por Infiltração de Líquidos em diferentes meios e aplicação da FFT. (PAES, 2016)



4. RESULTADOS

4.1 Produção do Silício Poroso

O silício poroso foi produzido por um processo eletroquímico em solução de ácido fluorídrico e etanol.

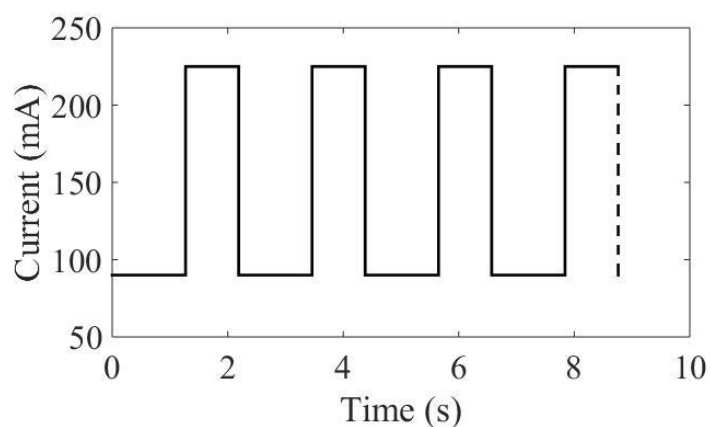
Deu-se prosseguimento à sua produção, com o substrato do tipo-p e as densidades de corrente e o tempo de reação sendo definidos previamente para cada amostra gerada. As amostras foram feitas com ataque prévio de limpeza utilizando densidade de corrente de 200 mA/cm² por 30 segundos em solução de NaOH.

As amostras foram levadas para observação da superfície no MEV/FEG e confirmar os valores de espessura obtidas pelo SLIM.

4.2 Espelho de Bragg

O espelho de Bragg foi produzido por ataque eletroquímico com corrente alternada, utilizando o mesmo processo descrito na produção de SiPo, por consistir em uma sequência de camadas porosas alternadas, com distintos índices de refração. As correntes alternadas foram programadas como no gráfico da Figura 4.1.

Figura 4.1 - Esquema de corrente alternada utilizado na produção do Espelho de Bragg.



As correntes utilizadas para sua formação foram de 90mA e 225mA que se alternavam no tempo conforme demonstrado acima na figura. Foi possível criar as estruturas de Bragg a partir de um determinado comprimento de onda escolhido e dos índices de refração de cada camada. Com os dados de comprimento de onda e índice de refração foi possível calcular o tempo de ataque, gerando assim a alternância das correntes, por meio da Equação 3.1.

$$t_i = \frac{\lambda t}{4nL} \quad (\text{Equação 3.1})$$

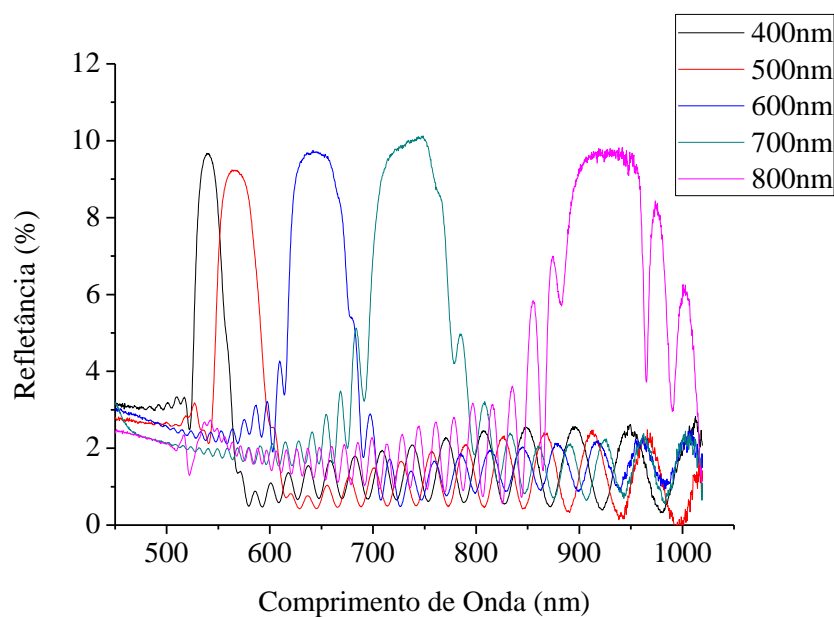
Sendo t_i o tempo desejado para a formação da camada, λ é o comprimento de onda escolhido, t o tempo adquirido empiricamente, n como o índice de refração e L para a espessura da camada.

Ao analisar a refletância individualmente das amostras de camadas únicas de silício poroso, elas apresentam a seguinte forma: ondas separadas e sem pico definido. Mas quando vistas as múltiplas camadas, aparece um espectro bem visível cujo maior pico se encontra no comprimento de onda desejado.

Para este experimento, o tempo empírico foi de 300 segundos, e os índices de refração de 2,335 e 1,994 correspondentes às espessuras de $17,728\mu m$ e $28,772\mu m$ respectivamente.

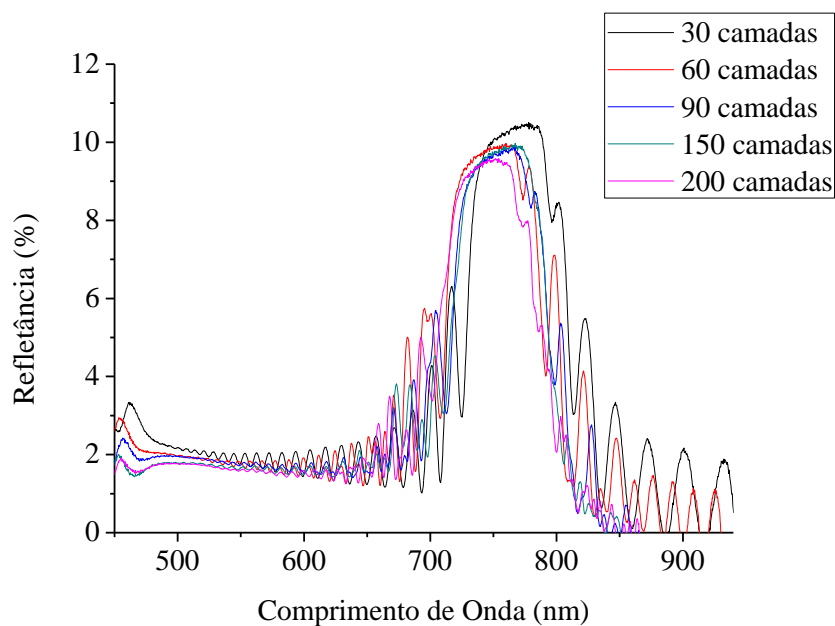
As amostras foram geradas experimentalmente para os comprimentos de onda de 400nm, 500nm, 600nm, 700nm e 800nm (Figura 4.2). Variando ou não a quantidade de camadas, tal como para o comprimento de onda de 700nm que as camadas foram produzidas nas quantidades de 30, 60, 90, 150 e 200 camadas respectivamente (Figura 4.3).

Figura 4.2 - Gráfico de refletância para os diferentes comprimentos de onda.



A Figura 4.3 mostra a refletância para o Espelho de Bragg com o Espelho de Bragg feito para o comprimento de onda de 700nm e com diferentes quantidades de camadas.

Figura 4.3 - Gráfico de refletância para Espelho de Bragg com 700nm de comprimento de onda e múltiplas camadas.



4.3 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

A microscopia auxiliou na visualização mais aprofundada do SiPo, que mostrou os poros com a vista de superfície e também foi possível identificar o tipo do poro em profundidade.

A figura 4.4A mostra a quantidade de poros nesse fragmento da amostra observado e sua uniformidade, enquanto a figura 4.4B apresenta o formato dos poros em profundidade que são em formato de colunas, como pode ser observado na imagem. A parte lisa na imagem é o substrato de silício.

É possível observar na Figura 4.5 a distribuição e alternância das camadas, de modo que suas espessuras se mantem homogêneas e de acordo com seus respectivos índices de refração. E que apesar de sobrepostas, ainda possuem sua característica colunar.

Figura 4.4 - (A) Poros de uma amostra de SiPo (500nm) ampliados 100 mil vezes. (B) Vista frontal da espessura da amostra ampliada 300 mil vezes.

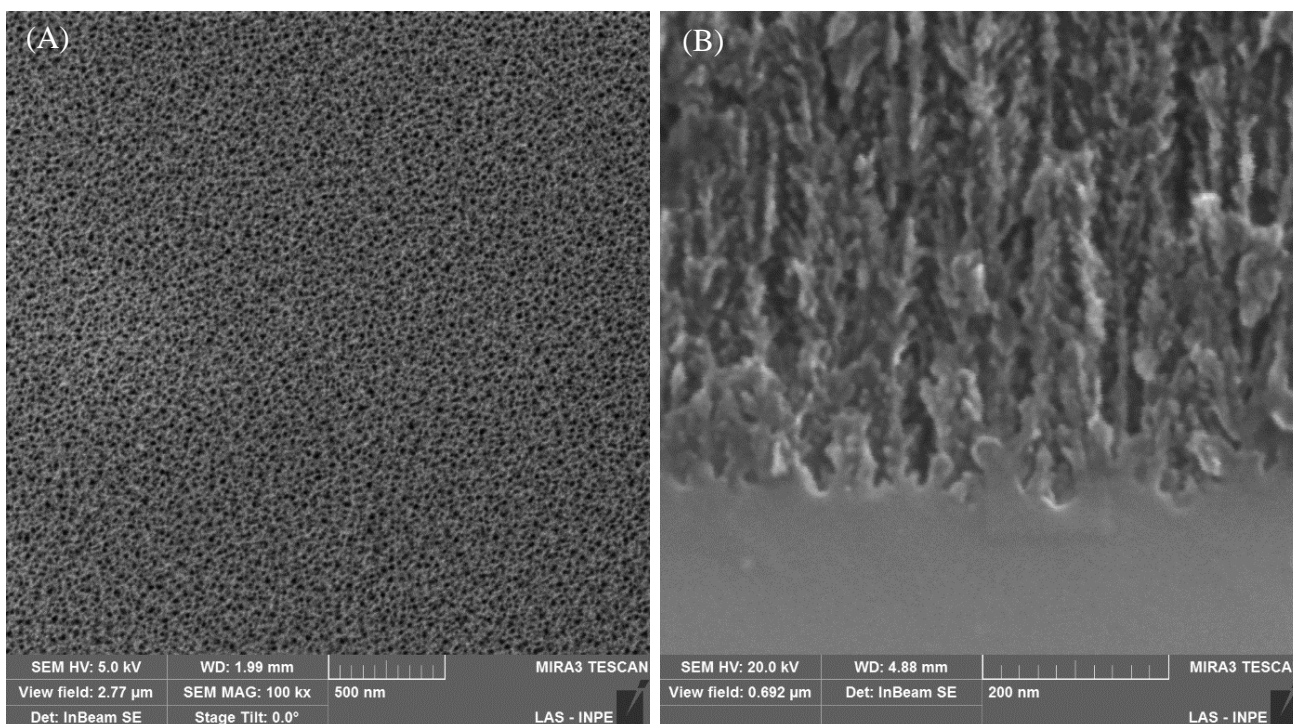
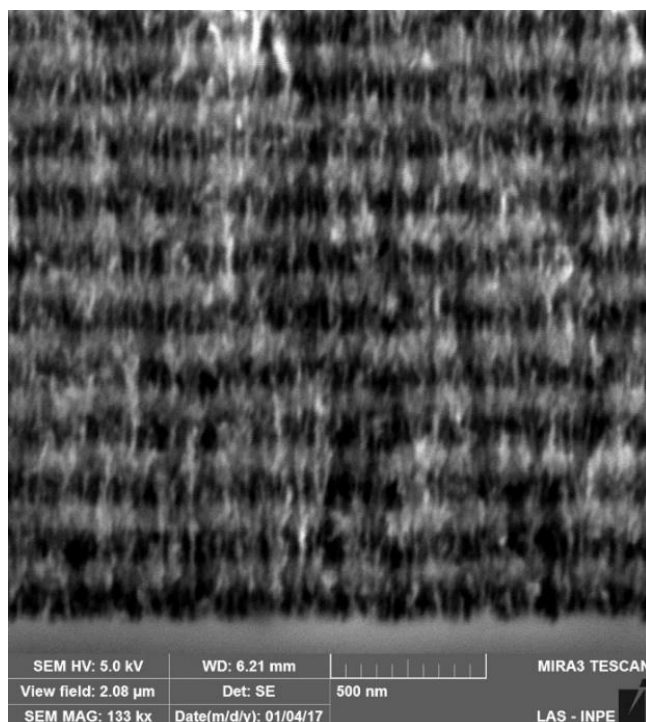


Figura 4.5 - Vista de perfil de uma amostra de espelho de Bragg e comparação de espessura das camadas.



4.4 Espectroscopia por Infiltração de Líquidos (SLIM)

As amostras também foram medidas no SLIM. Cada amostra foi medida submersa em dois meios distintos, o ar e em um líquido com índice de refração conhecido (etanol). A informação da espessura óptica da amostra é adquirida a partir da Transformada de Fourier (FFT) dos espectros de refletância das amostras, o que possibilitou que se estimassem dados como a porosidade, o índice de refração e espessura das camadas porosas.

A técnica de espectroscopia SLIM possibilitou que adquiríssemos os espectros de refletância de cada amostra de SiPo, como observado nas Figuras 4.2 e 4.3.

Com os dados obtidos no SLIM foi possível plotar os gráficos de velocidade da formação do SiPo (espessura/tempo), observado na Figura 4.6A, o gráfico de porosidade, visto na Figura 4.6B e o gráfico do Índice de Refração, Figura 4.7.

Figura 4.6 – (A) Gráficos da Velocidade de Formação do SiPo e (B) Porosidade.

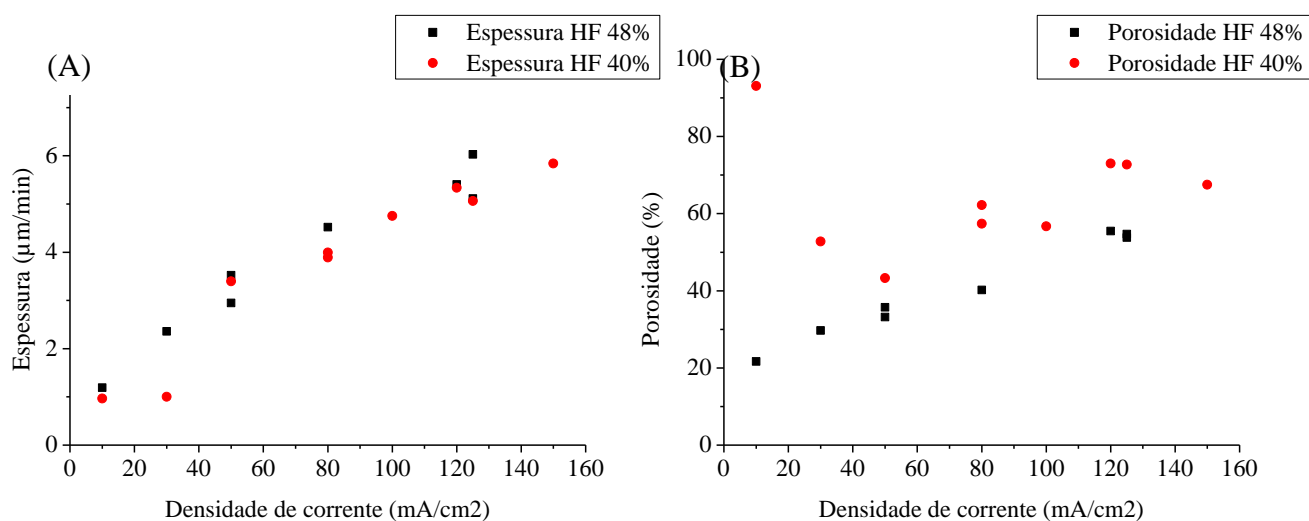
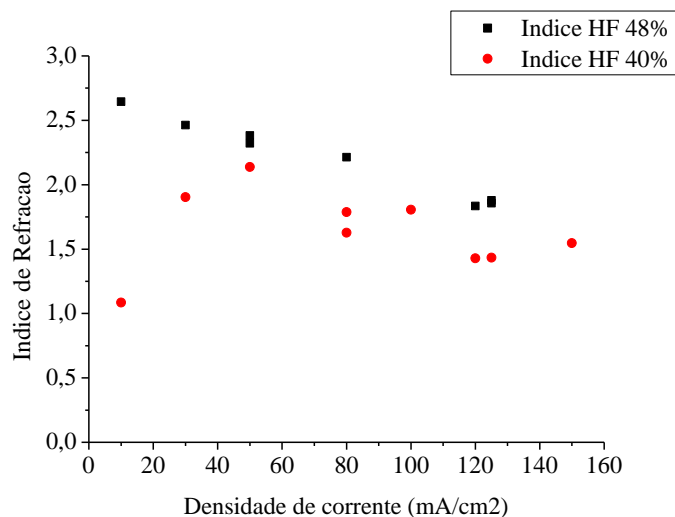


Figura 4.7 – Gráfico do Índice de Refração para diferentes soluções.



4.5 Mudança de Solução

A solução de HF 48% na proporção 3:1 com etanol foi utilizada para a produção do SiPo, como realizado pelo pesquisador Tiago Paes (PAES, 2016), porém, a solução foi mudada para a proporção de 1:1 e depois testada a solução de HF 40%, também na proporção 1:1 com o intuito de observar possíveis mudanças nas amostras conforme a troca das soluções.

Com a alteração nas soluções foi possível produzir diferentes amostras cujos resultados obtidos por SLIM foram comparados os seguintes parâmetros: velocidade de formação (Figura 4.6A), porosidade (Figura 4.6B) e índice de refração (Figura 4.7).

Para a produção do Espelho de Bragg, o processo foi semelhante. Os gráficos de camadas únicas foram observados e escolhido o comprimento de onda desejado para o espelho, em seguida escolheu-se a porosidade e o índice de refração para cada camada, calculando-se o tempo de ataque e a densidade de corrente para as camadas de maior e menor índice de refração.

Escolheu-se portanto, o comprimento de onda de 600nm para a produção de Espelhos de Bragg com a solução de HF 40%. Com base nos gráficos anteriores de espessura/tempo, índice de refração e porosidade, foi possível obter os parâmetros encontrados na Tabela 4.1, calculando o tempo de ataque com a Equação 4.1.

Tabela 4.1 – Tabela de parâmetros para a produção do Espelho de Bragg.

Parâmetros	Camada 1	Camada 2
Índice de Refração	1,9295	1,5473
Espessura (µm)	0,07774	0,096943
Tempo (s)	1,31	1,08
Densidade de corrente (mA/cm ²)	60	130
Corrente (mA)	21,12 ⁽¹⁾	45,76 ⁽¹⁾
	108 ⁽²⁾	234 ⁽²⁾

⁽¹⁾ Área igual a 0,352cm². ⁽²⁾ Área igual a 1,80cm².

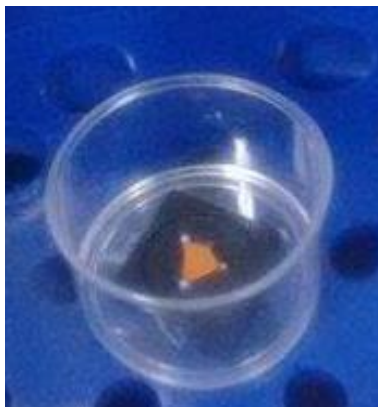
4.6 Retirada da Película

Foram produzidos diversos espelhos de Bragg com um progressivo aumento da quantidade de camadas. Iniciou-se com 40 camadas na intenção de se retirar a película porosa por inteiro, no entanto, em camadas mais finas as películas porosas se despedaçavam quando havia a tentativa de retirada. Assim, chegou-se à quantidade de 300 camadas, que proporcionou uma camada mais espessa possibilitando a retirada da

película. A retirada não foi completa, porém foi possível conseguir um tamanho suficiente que coubesse no suporte disponível, como visto na Figura 4.8.

Tendo sido retirada a película porosa, foi mantida colada no suporte e conservada a vácuo para posteriormente medir a refletância e a transmitância da mesma.

Figura 4.8 – Suporte com Película de Espelho de Bragg com 300 camadas.



5. DISCUSSÃO

A produção de SiPo foi feita seguindo a literatura (SAILOR, 2012) e pesquisas anteriores realizadas pela equipe do laboratório (PAES, 2016) e (PAES *et al*, 2014). As amostras simples foram limpas com o ataque prévio de HF e NaOH com descrito anteriormente, porém não foi realizada esta limpeza durante a produção dos espelhos. A escolha de não realizar um ataque de limpeza prévio nas amostras para produzir os espelhos ocorreu devido à observação da interferência nos resultados da intensidade da refletância.

As primeiras amostras de espelhos foram feitas para diferentes comprimentos de onda e notou-se que apesar de calcularmos os comprimentos de onda segundo os descritos na legenda da Figura 4.2, os espectros, observados no SLIM, saíam deslocados em torno de 100nm no eixo do λ , sem uma razão aparente. E conforme aumentava a quantidade de camadas, como observado na Figura 4.3, ocorria uma alteração no seu espectro, como o deslocamento no eixo do comprimento de onda, aproximando-se do valor calculado.

Assim, quanto mais camadas forem produzidas, maior será a aproximação do comprimento de onda desejado no eixo x, como pode ser visto nas Figura 4.3, que apresentam amostras testadas para 700nm. Na Figura 4.3, por exemplo, foram produzidas cinco amostras de Espelho de Bragg com o comprimento de onda de 700 nm e foi notado que com 30 camadas o espectro indicava um comprimento de onda distante do calculado, mas conforme se aumentava a quantidade das camadas, a tendência era aproximar-se do valor de 700nm.

Para observação das amostras utilizou-se a microscopia MEV/FEG que possibilitou a identificação do padrão homogêneo da camada porosa, de sua estrutura de profundidade colunar e suas camadas sobrepostas com diferentes índices de refração. A característica de homogeneidade e a profundidade porosa colunar se assemelham ao que ocorre em uma camada única, mostrando que mesmo aumentando a quantidade de camadas, as características permanecem.

Com o SLIM, foi possível estimar os valores da espessura das camadas, a porosidade e o índice de refração das amostras, identificando um padrão quase linear para os três, ou seja, conforme aumentava a densidade de corrente, aumentava a velocidade de formação do SiPo (espessura/tempo), ocorrendo semelhante para a porosidade e inversamente para os índices de refração.

No início da pesquisa, as amostras foram feitas com a solução de HF 48% e na proporção 3:1, posteriormente trocada pela proporção 1:1. Mas por questão de aproveitamento de reagentes já existentes no laboratório, testou-se uma solução de HF 40% na proporção 1:1 com etanol. O resultado foi de magnitudes menores para as amostras produzidas com solução de HF 48%, mas o padrão gráfico foi semelhante para algumas amostras. Por isso, foi decidido que seria viável continuar a pesquisa com a nova solução de HF 40% e proporção 1:1 com etanol.

O passo seguinte foi a retirada da película porosa. Houve várias tentativas da retirada da película nas amostras, no entanto, o material se mostrou quebradiço e impossível de se conseguir retirar um pedaço inteiro que coubesse no suporte disponível. Mas com um Espelho de Bragg com uma camada mais espessa de 300 camadas, foi possível retirar um fragmento suficiente para caber no suporte e que pudesse ser caracterizado.

6. CONCLUSÃO

Durante o projeto, foi observado que as características físicas dos poros, estão relacionadas ao modo de produção do silício poroso, tais como a densidade de corrente escolhida, o tempo de ataque e a concentração de ácido fluorídrico na solução utilizada para o ataque eletroquímico. Verificamos a parte física das amostras, no sistema MEV/FEG, que possibilitou a visualização das nanoestruturas porosas e com essa técnica constatamos que os poros são uniformes e homogêneos e que sua estrutura de profundidade é em forma de colunas, uma característica importante para futuras pesquisas de função para estes poros.

Após a observação real das amostras no FEG, usamos o procedimento de espectroscopia SLIM para que por meio da refletância, pudéssemos estimar os valores da espessura, porosidade e índice de refração das amostras. O resultado desse processo foi satisfatório pois, além da possibilidade de obter estes resultados de maneira mais prática, os resultados foram bastante próximos dos valores reais obtidos na visualização pelo MEV/FEG. A vantagem foi principalmente determinar a porosidade da amostra, que não era possível de se estimar no FEG. A partir desses resultados produzimos amostras no formato Espelho de Bragg, de modo que as amostras possuíssem camadas múltiplas e apresentassem refletância em uma faixa de comprimento de onda específica, o que foi efetivo e proporcionou amostras com até 300 camadas.

Como pesquisas futuras, tem-se a intenção de verificar os motivos para o desvio do deslocamento de onda observado na Figura 4.3, estudar uma possível retirada da película porosa sem que ela se despedace, dar continuidade ao uso da solução de HF 40%, estudar a degradação e a perda da função do espelho com o tempo e verificar a viabilidade do SiPo como sensor.

7. TRABALHOS

Berni, L. A. Galvão, E. C. S. Beloto. A. F. Paes, T. F.; *Investigation of optical and structural properties of porous silicon formed by electrochemical etching*; Encontro Anual da Sociedade Brasileira de Física; Natal – Rio Grande do Norte, de 03 a 07 de Setembro de 2016.

Galvão, E. C. S. Berni, L. A. Beloto. A. F.; *Fabrication and optical characterization of Bragg mirror formed by porous silicon under electrochemical etching*; XV Encontro da SBPMat; Campinas – São Paulo; de 25 a 29 de Setembro de 2016.

Tiago Franca Paes, Antônio Fernando Beloto, Ellen Christine de Souza Galvão, Luiz Angelo Berni; *Simple method for measuring the porosity, thickness and refractive index of porous silicon, based on the Fabry-Pérot interference spectrum*; Rev. Bras. Apl. Vac., Campinas, Vol. 35, N°3, pp. 117-122, Set - Dez., 2017

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMOF, P. Silício poroso obtido por ataque químico. Tese de doutorado (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos, 2007.

AMARAL Jr, M. A. Produção de Silício Poroso por processo eletroquímico e estudos da evolução morfológica e do tamanho dos cristalitos. Tese de mestrado (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos, 2014.

COSTA, A.J. Síntese e caracterização de filmes de silício poroso e carbono poroso. Dissertação de Mestrado. (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pós Graduação em

Engenharia Elétrica, Área de Processamento da Informação e Energia da Universidade Federal da Bahia, 2008.

FILHO, D. O. T. DIAS, I. F. L. DUARTE, J. L. LOURENÇO, S. A. POÇAS, L. C. LAURETO, E. NABET, B. HARMAND, J. C. Refletividade em Espelhos de Bragg de AlGaAsSb/AlAsSb sobre InP. Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, v. 24, p. 69-84; 2003.

PAES, T. F. BELOTO, A. F. BERNI, L. A. SILVA, L. M. Spectrum photoluminescence measuring system of porous silicon samples. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Laboratório Associado de Sensores e Materiais, 2014.

PAES, T. F. Silício Poroso: Estudo de Estruturas e Fotoluminescência para possíveis aplicações em sensores. Tese de doutorado (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos, 2016.

SAILOR, M. J. Porous Silicon in Practice. Preparation, Characterization and Applications. Wiley-VCH. 2012.

SILVA, M.F.F. Física na Escola. Departamento de Física da Universidade da Beira Interior Covilhã. 2007: 8(1). Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol18/Num1/v08n01a06.pdf> (Acessado em 13 de Julho de 2017).

TOSIN, M. C. Síntese e caracterização do silício poroso e de novos revestimentos luminescentes. Tese de doutorado (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, 2001.