

Universidade Estadual de Campinas  
Instituto de Física “Gleb Wataghin”

**CRESCIMENTO E  
CARACTERIZAÇÃO DE  
FILMES FINOS DE ÓXIDO DE SI**

*Camila de Oliveira Campos Camargo Sanches*  
RA 001417

**Orientador:** Prof. Dr. Ivan Emílio Chambouleyron

F809 – Instrumentação ao Ensino

17 de Junho de 2003

# Sumário

Sumário	i
Introdução	1
<b>1 Mecanismos de Crescimento</b>	<b>2</b>
1.1 Deposição por CVD .....	3
1.1.1 Sistemas para CVD .....	4
1.1.2 Óxido de Silício .....	6
1.2 Deposição por Evaporação Térmica .....	7
1.3 Deposição por <i>Sputtering</i> .....	8
<b>2 Procedimento Experimental– Oxidação Úmida do Si</b>	<b>10</b>
2.1 Corte das Lâminas .....	10
2.2 Limpeza das Lâminas .....	10
2.3 Preparativos .....	11
2.4 Oxidação .....	11
2.5 Análise das Amostras .....	12
2.5.1 Modelo Teórico .....	12
2.5.2 Espectrofotômetro Perkin-Elmer Modelo $\lambda 9$ ...	14
2.5.3 Curvas de Transmitância das Amostras .....	14
<b>3 Aplicações do Material Elaborado no Ensino de F640 (IFGW– UNICAMP)</b>	<b>21</b>
<b>Considerações Finais</b>	<b>22</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>24</b>

# Introdução

A expressão **Filmes Finos** é aplicada aos **coatings**, que possuem espessura muito fina da ordem do comprimento de onda da luz, entre 400 e 800 nm. Com o avanço da tecnologia de alto vácuo, os filmes finos passaram a ser aplicados às superfícies de componentes óticos (lentes, prismas, espelhos, filtros...) [1], nas roupas de astronautas e aeronaves, em ligas (carbeto de silício), como revestimento nos mais diversos tipos de materias (de jóias a materiais poliméricos) e, com isso, solucionam diversos problemas de engenharia de superfície [2]. Outras aplicações envolvem deposições por **sputtering** de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) e por evaporação térmica de metais na fabricação de **lasers** tipo *oxide stripe* [3].

Os **filmes finos** desempenham também uma função essencial nos dispositivos e circuitos integrados. São utilizados nas conexões das regiões ativas de um dispositivo, na comunicação entre dispositivos, no acesso externo aos circuitos, para isolar camadas condutoras, como elementos estruturais dos dispositivos, para proteger as superfícies do ambiente externo, como fonte de dopante e como barreira para a dopagem. Podem ser condutores, semicondutores ou isolantes, normalmente crescidos termicamente ou depositados a partir da fase vapor [4].

Em suma, o desenvolvimento dos filmes finos foi um importante passo na direção da capacitação científico-tecnológica e para o desenvolvimento de dispositivos e estruturas inovadoras. Entre tais estruturas destacam-se os **semicondutores**, que são materiais cuja condutividade está entre a dos metais e a dos isolantes. Eles podem ser elementos puros, tais como o silício ou o germânio, ou compostos tais como arseneto de gálio ou seleneto de cádmio. Eles podem também passar por um processo de dopagem no qual pequenas quantidades de impurezas são adicionadas ao semicondutor puro, causando uma grande mudança na condutividade do material.

Devido ao seu papel na fabricação de dispositivos eletrônicos, os **semicondutores** são essenciais em nossas vidas. São empregados em microondas, rádios, televisões, computadores, telefones, calculadoras, relógios, equipamentos médicos de diagnósticos, iluminação pública, entre outros. Embora muito desses dispositivos pudessem usar tecnologia de tubos de vácuo, o desenvolvimento da tecnologia de **semicondutor** durante os 50 anos passados fez com que tais aparelhos eletrônicos se tornassem menores, mais rápidos e mais seguros.

# Capítulo 1

## Mecanismos de Crescimento de Filmes Finos

Normalmente os filmes são formados pela condensação (solidificação) de átomos ou moléculas de um vapor sobre um substrato. O processo de condensação se inicia pela formação de pequenos aglomerados de material, denominados **núcleos**, espalhados aleatoriamente sobre a superfície do substrato. Forças de atração eletrostáticas são as responsáveis pela fixação dos átomos à superfície. O mecanismo de fixação é denominado **adsorção física** quando não ocorre a transferência de elétrons entre o material do substrato e a partícula depositada. A energia de ligação associada à adsorção física é de aproximadamente 0,25 eV. Átomos adsorvidos migram sobre a superfície do substrato interagindo com outros átomos para formar os núcleos e à medida que a interação aumenta os núcleos crescem. Tal processo é denominado **nucleação** [5]. Quando os núcleos entram em contato uns com os outros ocorre a **coalescência** que resulta em estruturas maiores. O processo continua formando canais e buracos de substrato exposto, preenchidos com novos núcleos até a formação de um filme contínuo como esquematizado na Fig. 1.1.

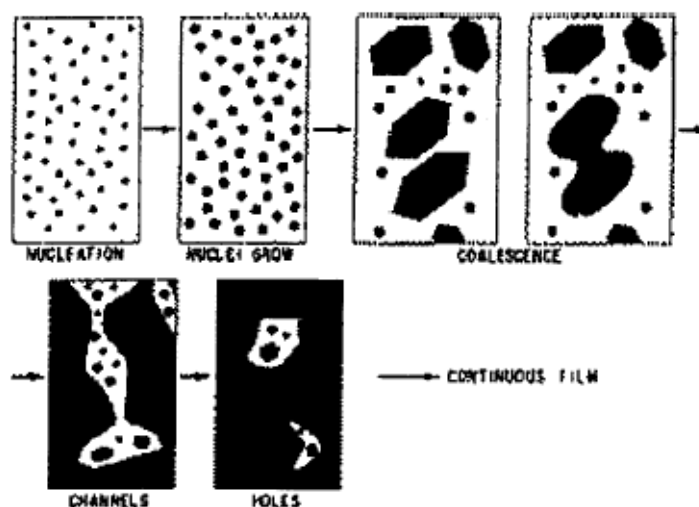


Fig. 1.1: Etapas de Crescimento

# 1.1 Deposição por CVD

O processo **CVD** (*Chemical Vapour Deposition*), pode ser descrito de forma concisa pela seguinte seqüência de etapas:

1. reagentes específicos e gases diluentes inertes são introduzidos em determinada quantidade (com fluxo controlado) em uma câmara de reação;
2. os gases difundem até a superfície do substrato;
3. os reagentes são adsorvidos na superfície;
4. os átomos adsorvidos reagem formando o filme;
5. os subprodutos da reação são desorvidos e removidos da câmara.

A energia necessária para a reação pode ser provida por diferentes fontes como calor e fótons.

No entanto, a energia térmica é a mais utilizada. Embora seja desejável que a reação química ocorra apenas na superfície, ou pelo menos perto dela (a chamada reação heterogênea), normalmente ela pode ocorrer também na fase gasosa (reação homogênea). A reação homogênea produz partículas que se introduzem no filme resultando em pouca aderência, baixa densidade e alta concentração de defeitos [6]. A reação na superfície aquecida pode ser modelada pela seguinte expressão:

$$R = R_0 e^{E_a / kT} \quad (1.1)$$

onde  $R$  é a taxa da reação,  $R_0$  é uma constante,  $E_a$  é a energia de ativação em eV,  $k$  é a constante de Boltzman e  $T$  é a temperatura em °K.

Segundo este modelo a taxa de reação aumenta com a temperatura. No entanto a velocidade da reação só pode aumentar se o suprimento de gases for suficiente. Se a situação for tal que taxa é tão alta que consome todos os gases que chegam, ela não pode crescer mais. Neste caso diz-se que a deposição está sendo limitada por transporte de massa. Se a temperatura for reduzida pode ocorrer o inverso. A taxa de reação pode ser tão baixa que os gases não são totalmente consumidos. Neste caso diz-se que a deposição está sendo limitada pela taxa de reação. Na **Fig. 1.2** representa-se esquematicamente o comportamento da taxa de reação com a temperatura para um determinado fluxo de gases.

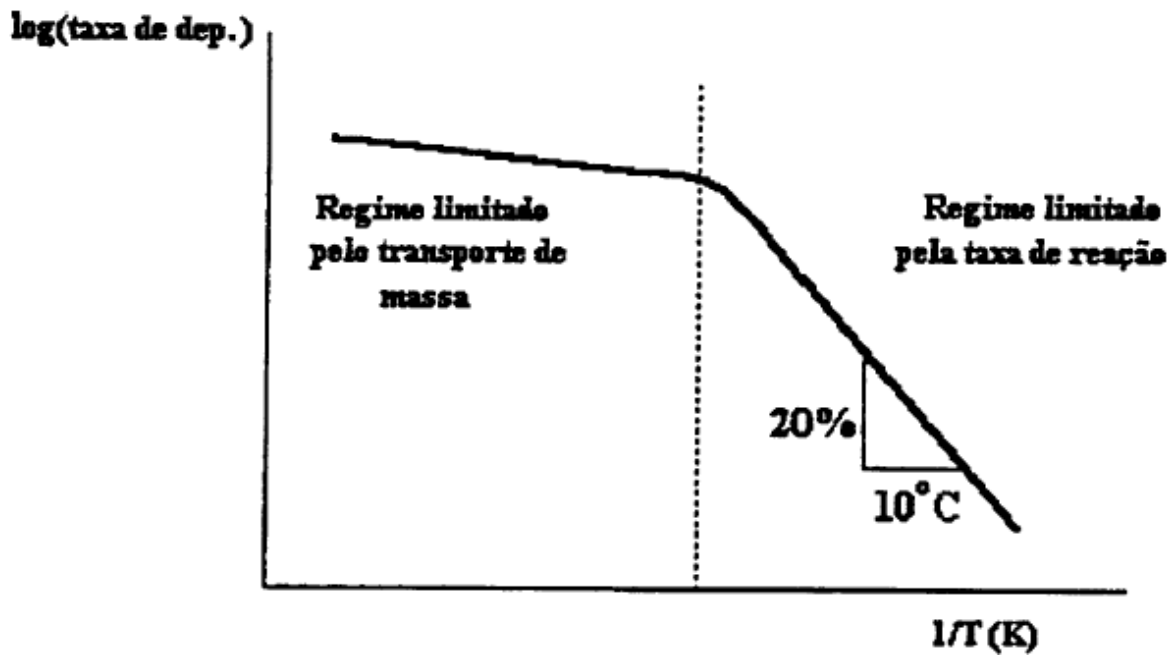


Fig. 1.2: Taxa de Reação em função da Temperatura

Num processo limitado por transporte de massa, o controle de temperatura do substrato torna-se importante. Por outro lado, num processo limitado por taxa de reação o controle da concentração dos reagentes em toda a superfície do substrato torna-se também um fator importante.

### 1.1.1 Sistemas para CVD

Na Fig. 1.3, apresenta-se uma das classificações possíveis para os sistemas CVD. Nesta classificação, considera-se fatores como pressão de operação, temperatura das paredes do reator e utilização de plasma. A energia pode ser suprida por resistência elétrica, por indução de RF, por descarga gasosa (plasma) e por fótons.

Quando a fonte de calor envolve toda a câmara de reação, tanto o substrato como as paredes da câmara ficam aquecidas. Deste modo o filme deposita-se não só no substrato mas também nas próprias paredes. Este tipo de sistema exige portanto constantes procedimentos de limpeza.

Sistemas que utilizam lâmpadas de infravermelho internas ou RF aquecem preferencialmente o substrato e seu suporte, mantendo a temperatura das paredes baixas. Em alguns casos se faz necessária a refrigeração das paredes para se garantir a temperatura baixa.

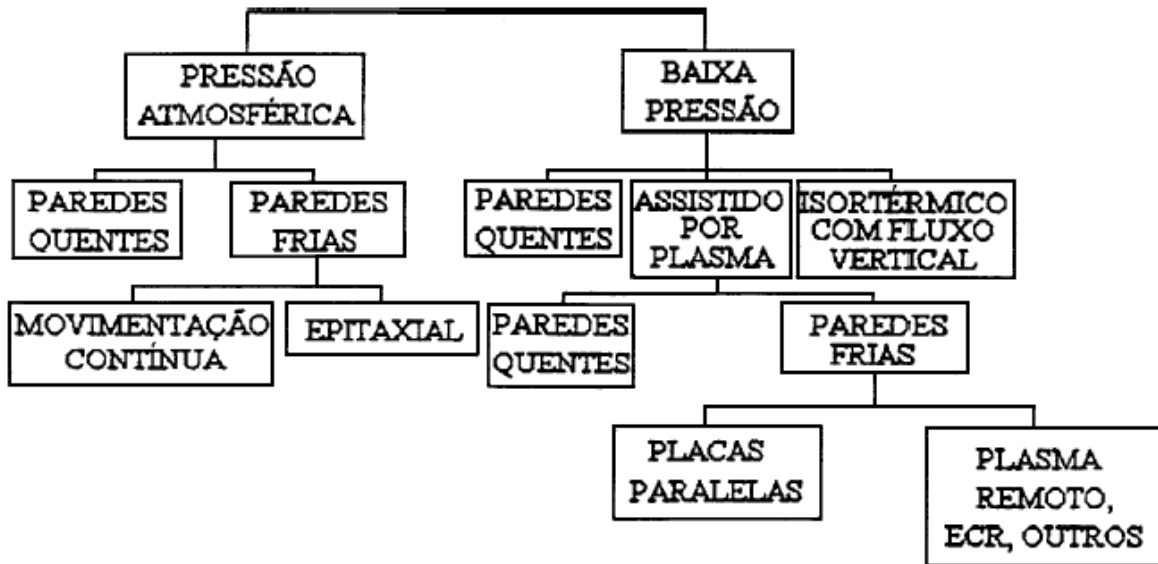


Fig. 1.3: Tipos de Reatores

Em resumo, são as seguintes as características dos reatores CVD:

### Reator APCVD

*Aplicações:* Óxidos de baixa temperatura, dopados ou não;

*Vantagens:* Simples, alta taxa de deposição e baixa temperatura;

*Desvantagens:* Cobertura de degraus ruins e contaminação por partículas.

### Reator LPCVD

*Aplicações:* Óxidos de alta temperatura, dopados ou não, Nitreto de Silício, Polisilício, W e WSi;

*Vantagens:* Excelente uniformidade e pureza, cobertura de degrau conforme, processamento de lâminas de grande diâmetro;

*Desvantagens:* Alta temperatura e baixa taxa de deposição.

### Reator PECVD

*Aplicações:* Deposição de dielétricos sobre metais em baixa temperatura, Nitreto de Silício para passivação;

*Vantagens:* Baixa temperatura, alta taxa de deposição, boa cobertura de degrau;

*Desvantagens:* Contaminação química, como H<sub>2</sub>, e por partículas.

## Reator RPECVD

*Aplicações:* Mesmas que PECVD e dielétricos de porta em estruturas MOS;

*Vantagens:* Mesmas que PECVD sem a radiação do substrato pelo plasma;

*Desvantagens:* Baixa taxa de deposição.

## Reator ECR

*Aplicações:* Mesmas que RPECVD;

*Vantagens:* Baixa temperatura, alta qualidade dos filmes depositados, alta taxa de deposição e boa cobertura de degrau;

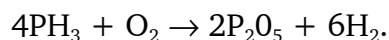
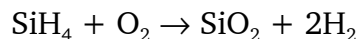
*Desvantagens:* Alto custo do equipamento.

## 1.1.2 Óxido de Silício

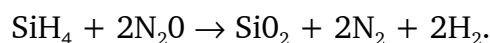
O Óxido de Silício CVD tem uma estrutura amorfa formada por tetraedros de  $\text{SiO}_4$ . Dependendo das condições de deposição a densidade pode ser menor e a estequiometria diferente da do óxido térmico, resultando em mudanças das propriedades elétricas e mecânicas. Deposições em alta temperatura ou tratamentos térmicos em alta temperatura após a deposição podem alterar as propriedades para valores semelhantes aos do óxido térmico. O valor do índice de refração é freqüentemente utilizado para avaliar a qualidade do óxido depositado: maior que 1,46 (correspondente ao óxido térmico) indica um filme rico em Silício, enquanto que menor indica um filme poroso de baixa densidade.

As faixas de temperatura utilizadas na deposição de filmes de  $\text{SiO}_2$  dependem do tipo de reator e dos reagentes empregados:

- Deposições em baixa temperatura (300 a 450 °C) - reatores APCVD, LPCVD e PECVD, e reação de silana com oxigênio. Para se obter filmes dopados adicionam-se dopantes. A adição de  $\text{PH}_3$  produz um fosforosilicato (PSG), e a adição de  $\text{B}_2\text{H}_6$  produz um borosilicato. As reações químicas que ocorrem neste caso são:



O óxido de silício produzido em baixa temperatura apresenta uma densidade menor que o óxido térmico. O óxido de silício pode ser depositado em temperatura na faixa de 200 a 400 °C por PECVD pela reação de silana com óxido nitroso:

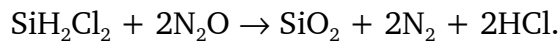




- Deposições em temperatura média (650 a 750 °C) - reatores LPCVD pela decomposição de tetraetil ortosilicato (TEOS). Os filmes depositados apresentam uma ótima cobertura conforme. A reação total é:



- Deposição em temperatura alta ( $\approx 900$  °C) - reatores LPCVD pela reação da diclorosilana com óxido nítrico. Os filmes depositados são muito uniformes com propriedades semelhantes ao do óxido térmico. A reação total é



## 1.2 Deposição por Evaporação Térmica

A deposição de filmes finos pode também ser realizada pelo aquecimento do material fonte dos filmes em um ambiente de alto vácuo -- **PVD** (*Physical Vapour Deposition*). O material aquecido se evapora e se deposita nos substratos e nas paredes da câmara de processo.

O processo de evaporação permite altas taxa de deposição (como 0,5 mm/min para o Al) sem causar danos à superfície do substrato devido à baixa energia das espécies incidentes, contaminação mínima do filme pelo gás residual [7]. devido ao alto vácuo e pouco aquecimento do substrato, sendo que tal aquecimento decorre apenas do calor de condensação do filme e da radiação da fonte). No entanto, o processo de evaporação não permite o controle da composição de ligas.

Existem basicamente três tipos de sistemas de evaporação, que diferem pelo seu método de aquecimento: aquecimento resistivo, aquecimento por feixe de elétrons e aquecimento indutivo. No aquecimento resistivo, coloca-se o material fonte em uma barquinha metálica ou suspenso por um filamento de tungstênio. Por efeito Joule (passagem de corrente) processa-se então o aquecimento do suporte fundindo o metal fonte. Embora muito simples, a evaporação por aquecimento resistivo apresenta varias 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;
- Não se consegue controlar a composição de ligas.

## 1.2 Deposição por *Sputtering*

**Sputtering** [8,9] – PVD – designa o mecanismo de ejeção de material de uma superfície (alvo) pelo bombardeamento de partículas com alta energia. O material ejetado se deposita sobre o substrato e seu suporte, colocados em oposição à superfície bombardeada. Esta técnica permite a deposição de uma grande variedade de materiais, incluindo alumínio, ligas de alumínio, platina, ouro, titânio, tungstênio, ligas de tungstênio, molibdênio, silício, óxido de silício e silicetos. Apresenta uma série de vantagens sobre a evaporação:

- Permite uma deposição uniforme sobre grandes áreas pela utilização de alvos de diâmetro grande;
- Controle preciso da espessura pelo controle dos parâmetros de processo;
- Controle das propriedades dos filmes como cobertura de degrau e estrutura de grão;
- Limpeza da superfície da amostra por **Sputtering** antes da deposição sem exposição ao ambiente;
- Deposição de multi-camadas com a utilização de alvos múltiplos;
- Não produz raios-X.

As desvantagens são:

- Alto custo do equipamento;
- A taxa de deposição de alguns materiais pode ser bastante baixa;
- Alguns materiais degradam pelo bombardeamento de alta energia;
- Como o processo é efetuado em pressões maiores que as utilizadas em evaporações, pode ocorrer uma incorporação de impurezas ao filme depositado.

As partículas de alta energia que bombardeiam o alvo, normalmente íons de argônio, são gerados em plasmas de descarga luminosa. A descarga luminosa se alto sustenta, e é produzida pela aplicação de um campo elétrico DC (com tensão em torno de 1,5 kV) entre dois eletrodos (o alvo negativo, cátodo, e o suporte da amostra positivo, ânodo) dispostos em oposição dentro de uma câmara. O argônio é colocado na câmara com pressão inicial de aproximadamente 1 torr. O espaçamento entre os eletrodos é da ordem de 15 cm.

Quando o material do alvo é um dielétrico (portanto não condutor) é necessário utilizar um campo de RF para manter a descarga. Isto se deve ao fato do dielétrico ficar carregado positivamente durante a descarga DC, diminuindo a

diferença de tensão entre o cátodo e o ânodo até um valor abaixo do qual a descarga não mais se processa.

A ionização dos átomos de argônio no plasma se processa pelas colisões com elétrons. Para se aumentar a eficiência desta ionização, pode-se confinar os elétrons perto da superfície do alvo por meio de um campo magnético. Neste caso, a técnica é denominada **Magnetron Sputtering**.

## Capítulo 2

# Procedimento Experimental Oxidação Úmida do Si\*

## 2.1 Corte das Lâminas de Silício

Inicialmente, selecionamos dois **wafers** de silício\*, sendo que desses foram cortadas, com auxílio diamante Sharp®, 13 lâminas de 1cm por 2 cm. Em seguida as lâminas foram colocadas em um suporte de teflon. Tanto para o manuseio dos wafers quanto das lâminas foram utilizadas luvas de látex e picas metálicas devidamente limpas.

## 3.2 Limpeza das Lâminas

Materiais utilizados:

- Béquer;
- Chapa elétrica operando em 300°C;
- Ultra-som Branson® 220;
- Água destilada;
- Água deionizada;
- Detergente Extran® MA02 neutro;
- Álcool etílico absoluto P.A. (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O);
- Acetona P.A. ((CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>CO);
- N<sub>2</sub> gasoso.

Primeiramente, colocamos o suporte de teflon com as lâminas no béquer. Em seguida, adicionando água destilada e detergente, colocamos o béquer na chapa elétrica até que a solução atinja fervura. Depois, levou-se o béquer com a solução ao ultra-som durante três minutos. Após isso, descartamos a solução. Tal processo foi repetido 6 vezes. Depois da 6ª vez, lavamos o

---

\* O silício utilizado foi o Topsil, 1000 Ω·cm, com orientação <111> e ambas as faces polidas.

\* Contamos com o auxílio da técnica Maria Izabel (mizabel@ifi.unicamp.br), responsável pelo Laboratório de Pesquisas Fotovoltaicas (Lab 44 – Prédio A andar inferior).

béquer inicialmente com água comum para retirar o excesso de detergente e depois com água deionizada voltando o conjunto, béquer mais água deionizada, para o ultra-som.

Após repetir isso 4 vezes, colocamos acetona no béquer e repetimos 3 vezes o mesmo procedimento feito quando a solução possuía detergente. A fim de tirar a acetona da amostra, colocou-se álcool etílico no béquer, alternando entre aquecimento e ultra-som.

Finalizado esse processo de limpeza, secamos as lâminas passando sobre elas um jato de N<sub>2</sub> gasoso. Com isso, elas se encontraram prontas para serem levadas ao forno.

## 2.3 Preparativos

Para garantir a homogeneidade de temperatura 1150°C no forno, esse foi ligado 16 horas antes de se iniciar o processo de oxidação e alguns preparativos foram feitos:

1. Aquecemos água destilada com uma manta aquecedora e um **variac** que não permitia que a temperatura ultrapassasse 95°C (equivalente a 45V);
2. Com um termopar, conferimos se o forno estava a 1150°C;
3. Liberamos O<sub>2</sub> com uma pressão de 0,5atm e com um fluxo igual a 1L/s. Conferimos a passagem do gás pelo forno, colocando na outra extremidade dele, um suporte com água deionizada, observando se ela borbulhava.

## 2.4 Oxidação

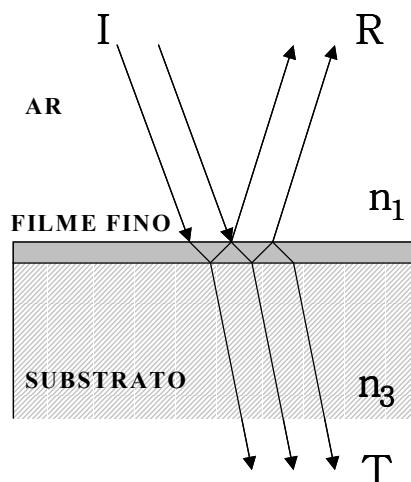
Para evitar que as lâminas quebrassem, desligamos o fluxo de O<sub>2</sub>, e através de um suporte de quartzo, inserimos 12 delas lentamente no forno até se encontrarem no centro dela. Aguardamos mais 3 minutos para que as lâminas atingissem equilíbrio térmico.

Após esse período religamos o fluxo de O<sub>2</sub>, e fomos retirando as amostras conforme segue abaixo:

Tempo de Oxidação	Número da Amostra	Tempo de Oxidação	Número da Amostra
7'	1 e 2	8' 30"	3, 4 e 5
13'	6 e 7	16'	8, 9 e 10
28'	11 e 12		

## 2.5 Análise das Amostras

Por fim, utilizamos um método interferométrico para caracterização do filme fino de óxido de silício, afim de possibilitar a medida da espessura  $d$  em função do comprimento de onda e do índice de refração  $n$  do filme.

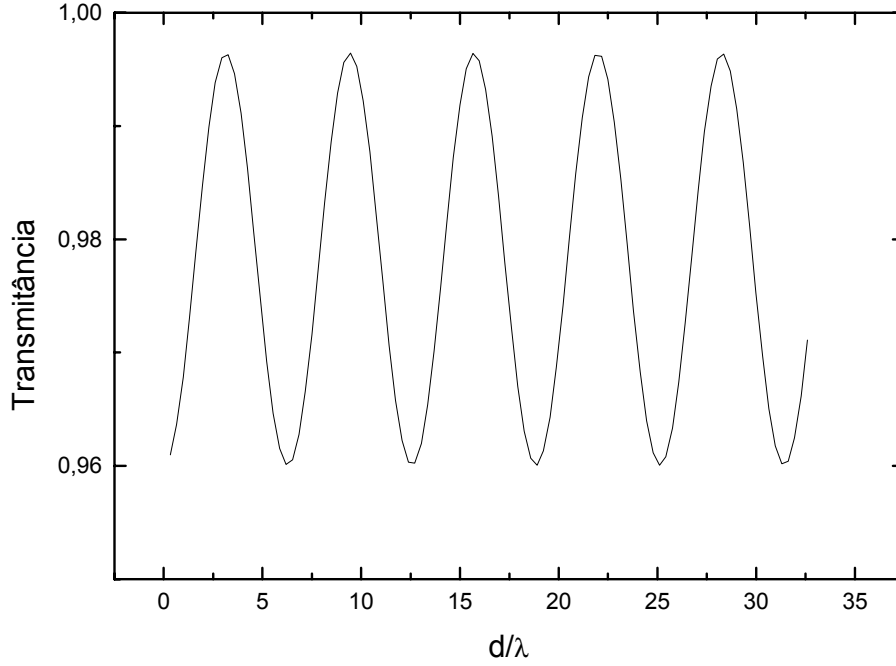


**Fig. 2.1:** Diagrama representando a luz incidindo no filme fino e sofrendo várias reflexões internas, sendo que I é o feixe incidente, R o refletido e T o transmitido.

### 3.5.1 Modelo

Quando a luz incide a partir do ar, de índice de refração  $n_1=1$ , na superfície do filme fino, de índice  $n_2$ , parte é refletida e parte transmitida. A onda transmitida encontra a interface do substrato e novamente é transmitida e refletida como ilustra a **Fig. 2.1**. A interferência entre os feixes que sofrem várias reflexões no interior do filme resulta num padrão de transmitância do sistema que varia com o comprimento de onda da luz incidente. Este padrão depende da espessura  $d$  e do índice de refração  $n$  do filme.

Utilizando as expressões para os coeficientes de reflexão e de transmissão na superfície de dois materiais obtidos a partir das condições de contorno das equações de Maxwell, podemos determinar a transmitância e refletância final do sistema. No caso de filmes transparentes, onde não há absorção, e de incidência normal, a **Fig. 2.2** mostra a transmitância em função do comprimento de onda para  $n_3 = 1,5$  e  $n = 1,3$ , onde neste exemplo  $n$  é constante por simplicidade.



**Fig. 2.2:** Curva de transmitância de um filme transparente.

Vemos que a transmitância em função do comprimento de onda exibe uma modulação onde os máximos e mínimos são dados por [10]

$$\lambda_m = \frac{4nd}{m} \quad (2.1)$$

onde  $m = 1,2,3,\dots$ , e  $nd$  é chamado de caminho óptico do filme. Os comprimentos de onda para os valores pares de  $m$  correspondem aos máximos de transmitância  $T_{\text{máx}}$ , enquanto que os ímpares correspondem aos mínimos  $T_{\text{mín}}$ . As expressões para os picos são [11]

$$T_{\text{máx}} = \frac{2n_1n_3}{n_1^2 + n_3^2} \quad (2.2)$$

$$T_{\text{mín}} = \frac{4n_1n^2n_3}{(n_1^2 + n^2)(n_3^2 + n^2)} \quad (2.3)$$

A partir da Eq. (2.3), podemos isolar  $n$ :

$$n^2 = \beta + \sqrt{\beta^2 - n_3^2} \quad (2.4)$$

onde  $\beta = (4n_3 / T_{\text{mín}} - n_3^2 - 1) / 2$ . Assim, medindo a transmitância mínima podemos determinar o índice de refração do filme para os comprimentos de onda  $\lambda_m$  com  $m$  ímpar. Utilizando a Eq. (2.1) podemos estimar  $m$  para os

comprimentos de onda dos mínimos, desprezando a variação do caminho óptico para dois mínimos consecutivos tal que  $m \cdot \lambda_m \approx (m + 1) \cdot \lambda_{m+1}$ . Voltando à determinamos a espessura do filme  $d$ . Já para calcular o índice de refração para os comprimentos de onda dos máximos ( $m$  par) fazemos o caminho inverso: sabendo a espessura do filme, o valor de  $m$ , medindo comprimento de onda e através da Eq. (2.1), podemos calcular  $n(\lambda_m)$  para  $m$  par.

## **2.5.2 Espectrofotômetro Perkin-Elmer Modelo Lambda 9**

Trata-se de um dos equipamentos mais sofisticados do mundo na área da espectrofotometria, que permite medir a transmitância (ou absorvância) e refletância nas faixas ultravioleta, visível e infravermelho próximo para comprimentos de onda que variam de 185 a 3200 nm. Este espectrofotômetro está ligado a um microcomputador que grava os dados dos espectros durante a medição ou armazenar os dados para posterior processamento.

Estes aparelhos trabalham com duas redes de difração, que têm a função de dispersar uma luz policromática em várias faixas de comprimento de onda, obtendo uma radiação quase monocromática. Esta radiação, após atravessar um compartimento contendo a amostra, atinge o detector, onde o sinal é captado e enviado a um registrador. Do registrador obtêm-se um espectrograma, que dá a intensidade da radiação transmitida quase monocromática em função do comprimento de onda.

## **2.5.3 Curvas de Transmitância das Amostras**

Medimos a transmitância em função do comprimento de onda para as nossas 13 amostras e obtivemos as curvas que se seguem.



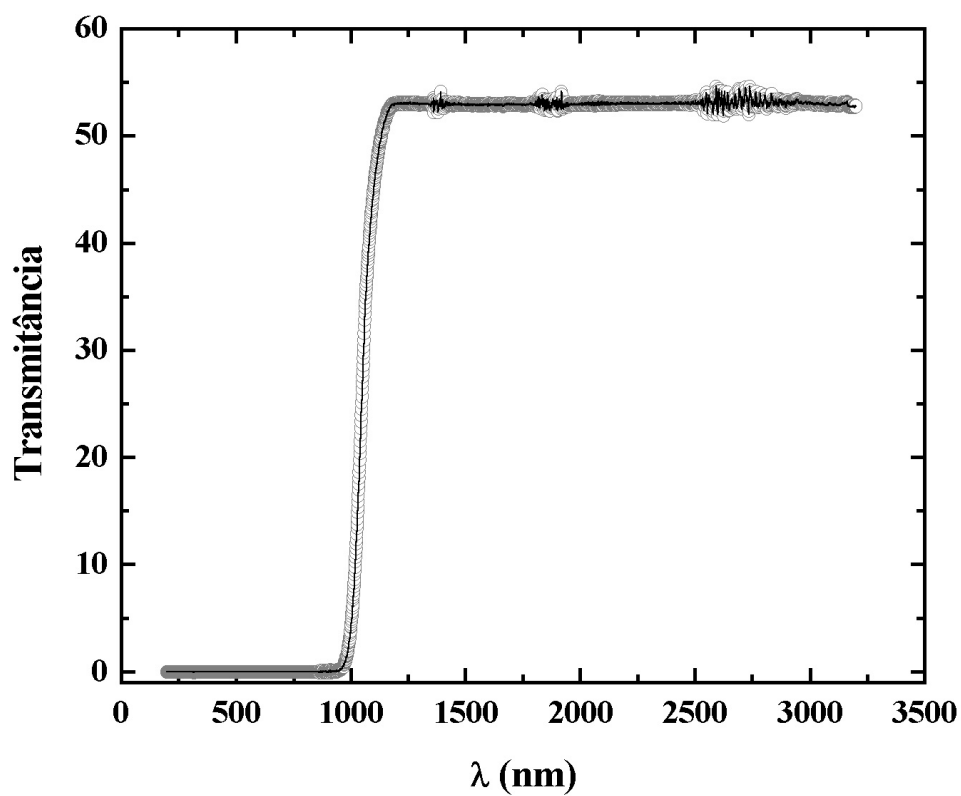


Fig. 2.3: Amostra 1 ( $T_{\text{oxidação}} = 7 \text{ min}$ , as duas faces possuem óxidos de mesma espessura)

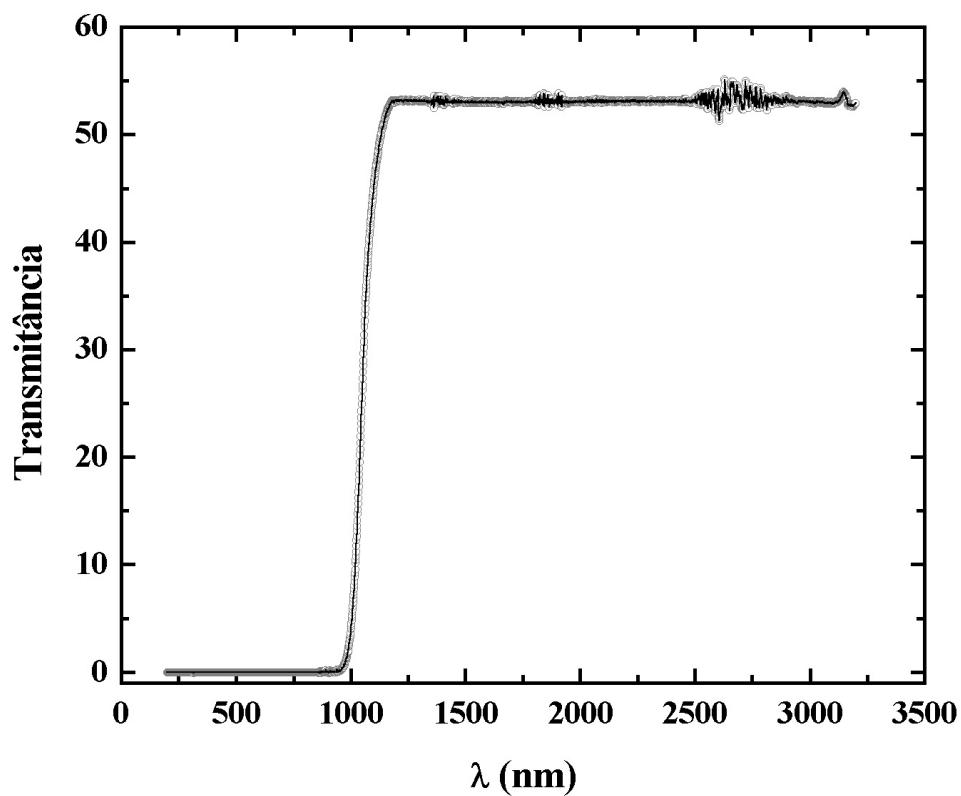


Fig. 2.4: Amostra 3 ( $T_{\text{oxidação}} = 8 \text{ ' } 30''$ , as duas faces possuem óxidos de mesma espessura)

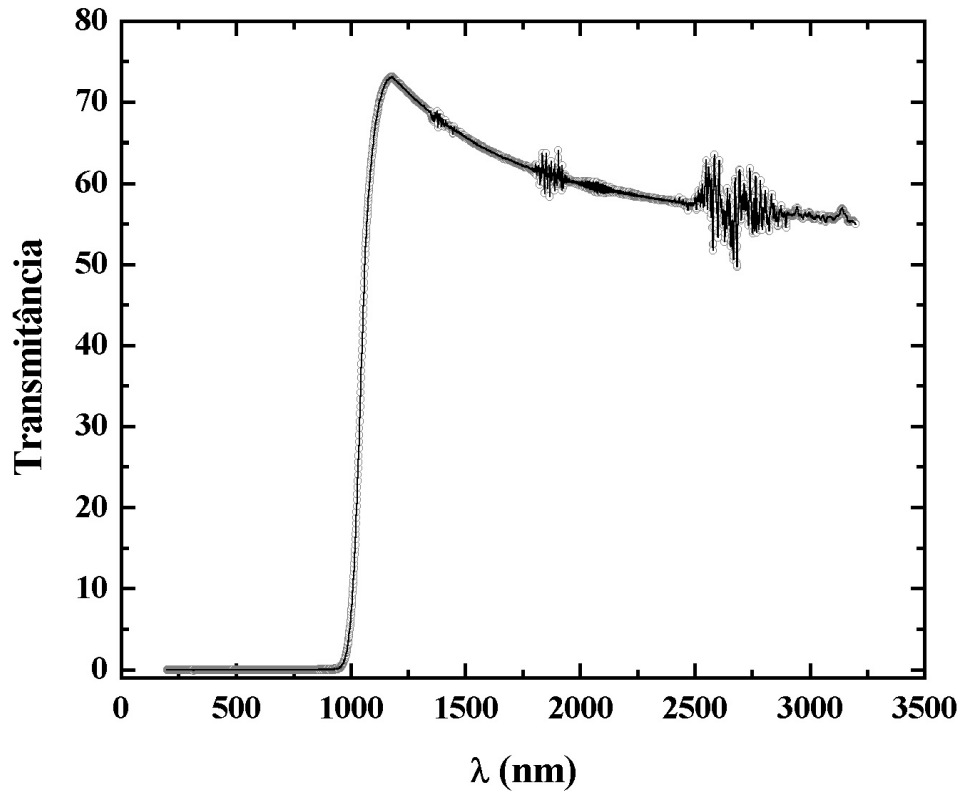


Fig. 2.5: Amostra 4 ( $T_{\text{oxidação}} = 8' 30''$ , as duas faces possuem óxidos de espessuras  $\neq$ 's)

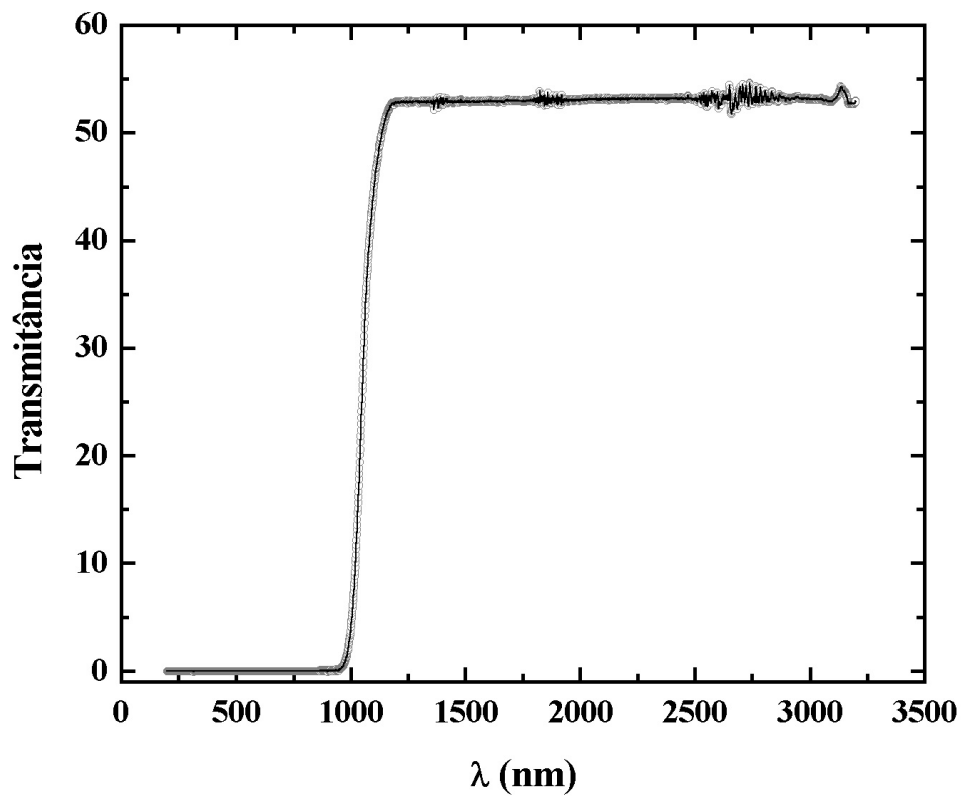


Fig. 2.6: Amostra 5 ( $T_{\text{oxidação}} = 8' 30'$ , apenas uma face possui óxido)

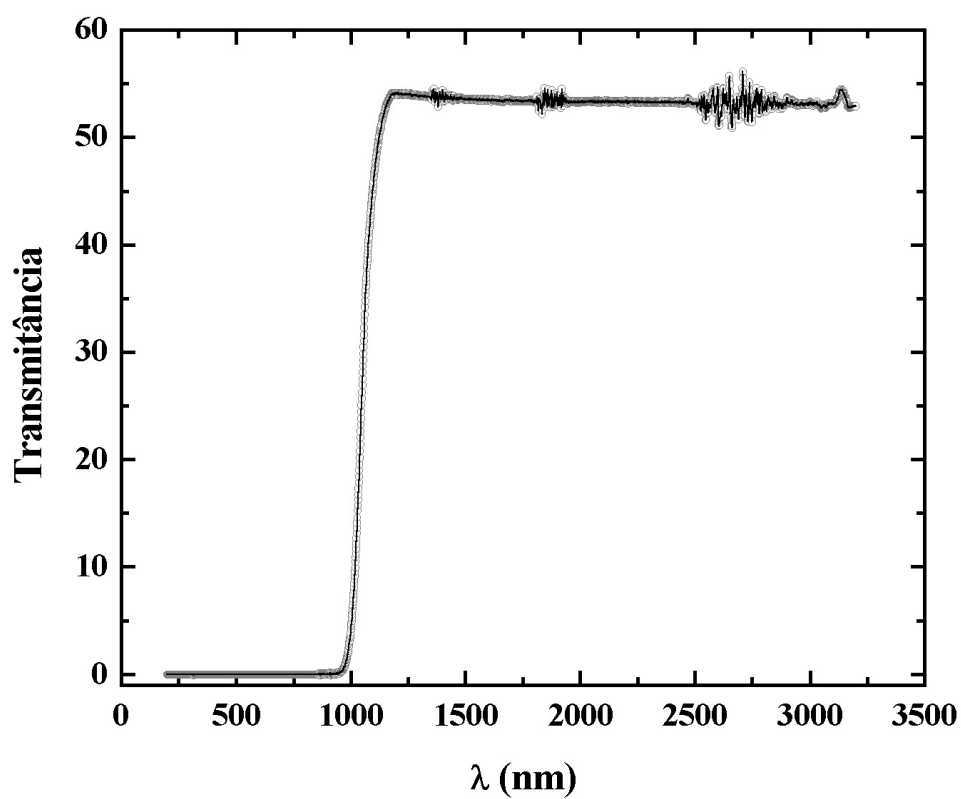


Fig. 2.7: Amostra 6 ( $T_{\text{oxidação}} = 13$  min, as duas faces possuem óxidos de mesma espessura)

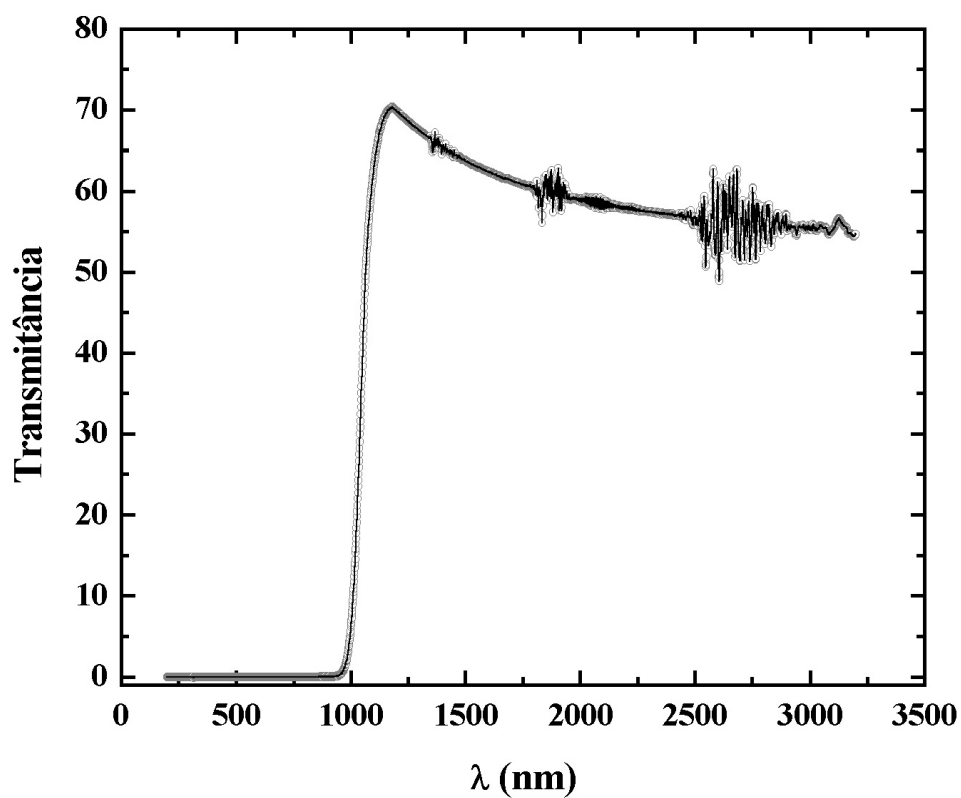


Fig. 2.8: Amostra 7 ( $T_{\text{oxidação}} = 13$  min, as duas faces possuem óxidos de espessuras  $\neq$ 's)

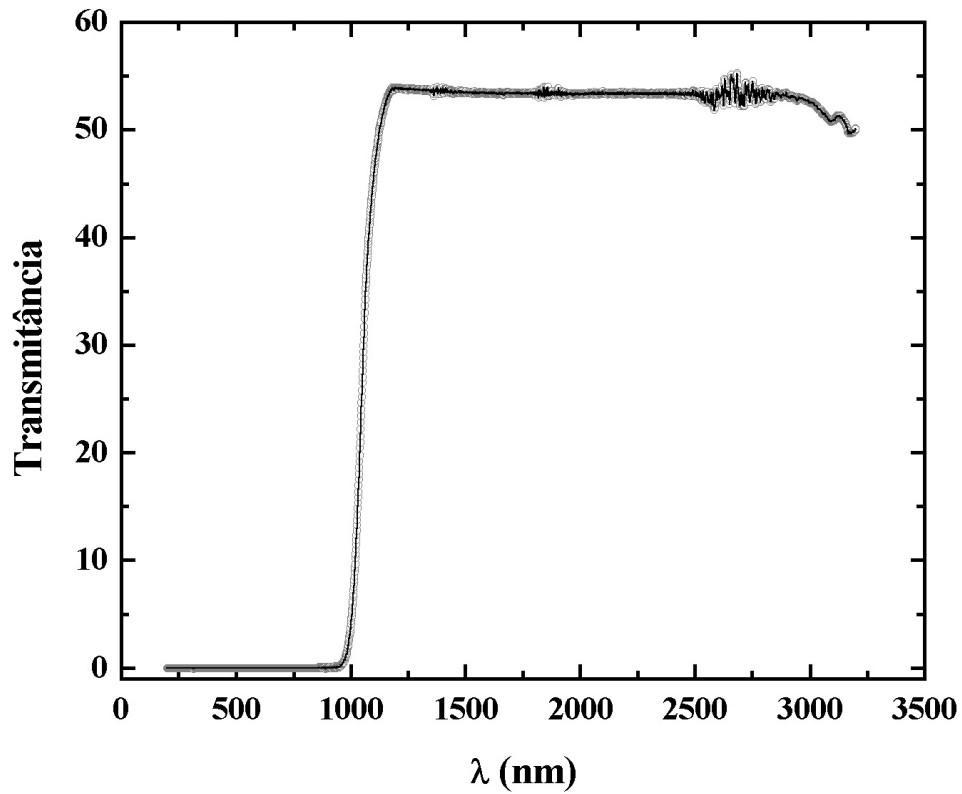


Fig. 2.9: Amostra 8 ( $T_{\text{oxidação}} = 16$  min, as duas faces possuem óxidos de mesma espessura)

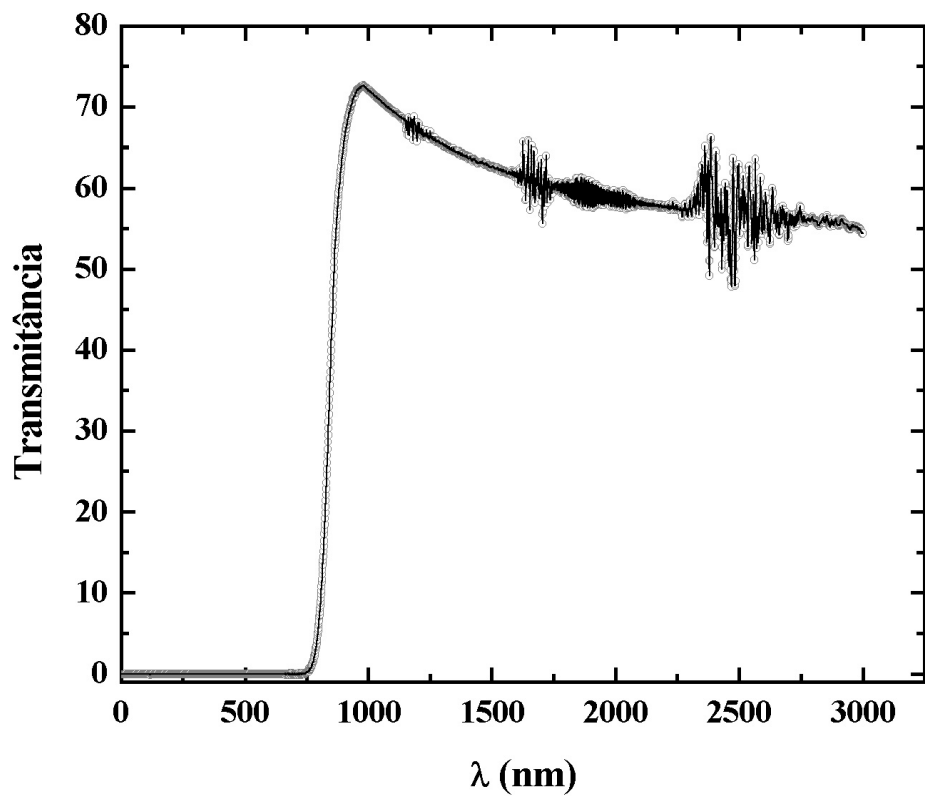


Fig. 2.10: Amostra 9 ( $T_{\text{oxidação}} = 16$  min, as duas faces possuem óxidos de espessuras  $\neq$ 's)

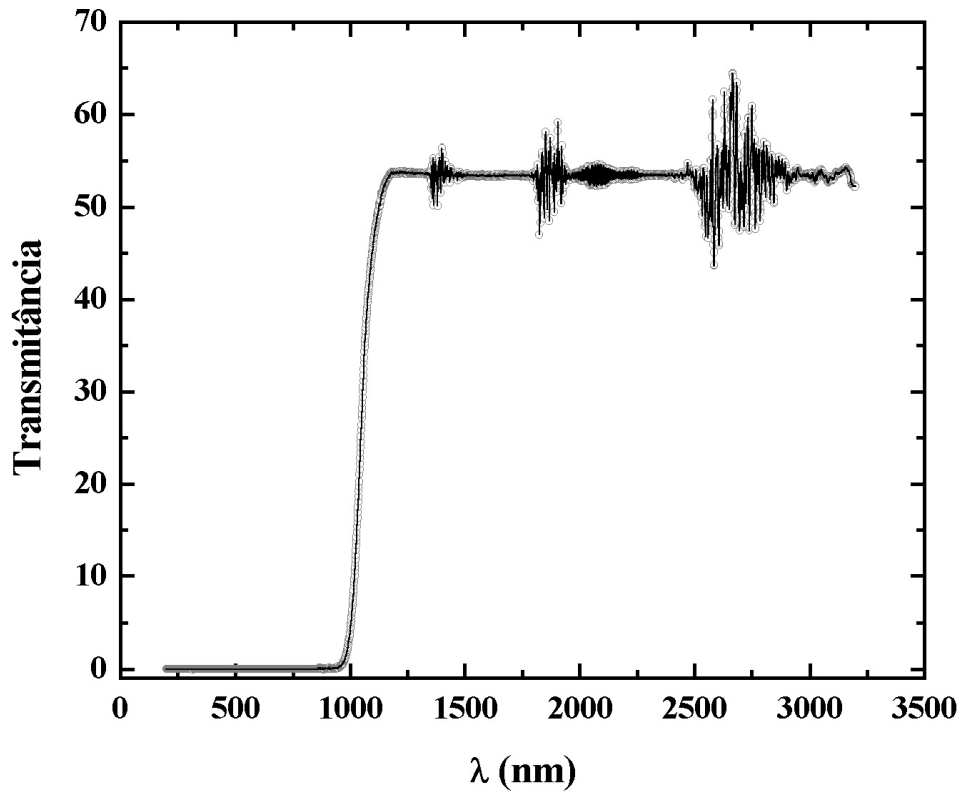


Fig. 2.11: Amostra 10 ( $T_{\text{oxidação}} = 16$  min, apenas uma face possui óxido)

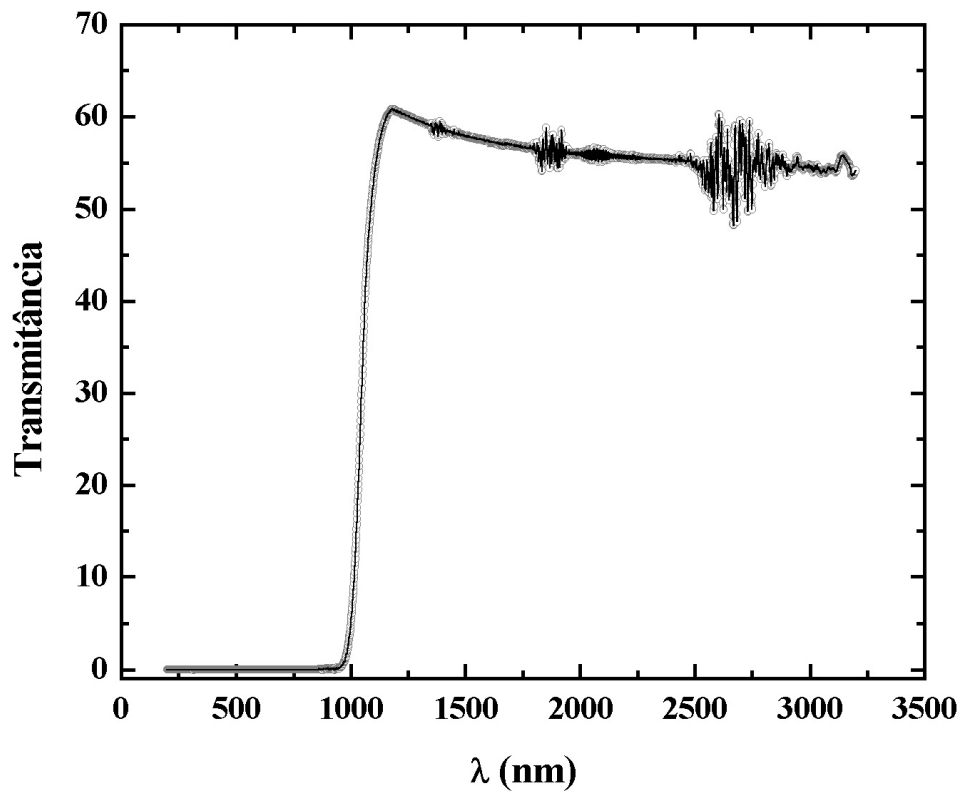


Fig. 2.12: Amostra 11 ( $T_{\text{oxidação}} = 28$  min, as duas faces possuem óxidos de mesma espessura)

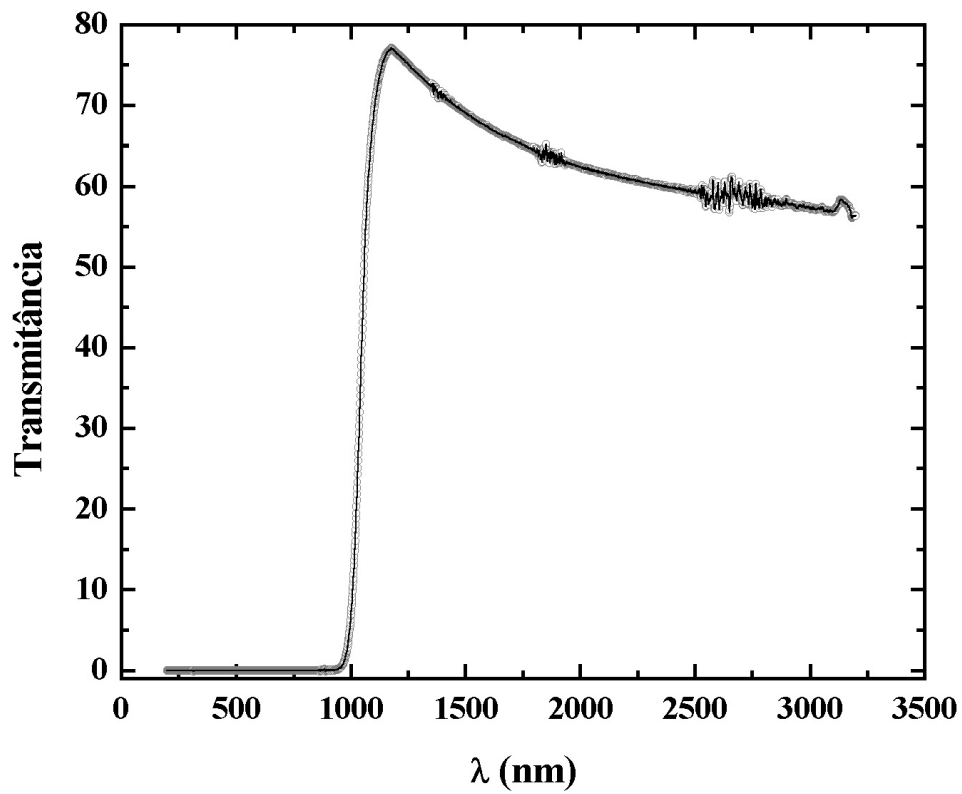


Fig. 2.13: Amostra 12 ( $T_{\text{oxidação}} = 28$  min, as duas faces possuem óxidos de espessuras  $\neq$ 's)

# Capítulo 3

## **Aplicações do Material Elaborado no Ensino de F640**

### **(IFGW – UNICAMP)**

O Instituto de Física “Gleb Wataghin” (UNICAMP) é um dos raros institutos brasileiros que disponibiliza uma disciplina de laboratório para a etapa profissional do curso de Física na qual são introduzidas as práticas básicas experimentais de crescimento de filmes finos. Contudo, tanto nos laboratórios de pesquisa acadêmica quanto nos industriais, são utilizados materiais muito mais complexos do que aqueles que são crescidos no laboratório de ensino em questão. Geralmente, é feita a deposição de várias camadas de filme fino de elementos diferentes em um substrato, que em alguns casos é um semicondutor como o silício. Por isso, a introdução das técnicas de crescimento e de caracterização desses materiais mais complexos nessa disciplina se torna muito importante.

Para isso, produzimos lâminas de óxido de silício e obtivemos suas curvas de transmitância em função do comprimento de onda da luz incidente. Assim, torna-se possível aos alunos de **F640** determinar os comprimentos de onda para as transmitâncias máxima e mínima do padrão de interferência baseando-se em nosso material. Assim, sabendo o comprimento de onda, eles podem determinar o valor de  $m$  para cada transmitância, obtendo que os valores de  $m$  pares correspondem aos máximos e  $m$  ímpares correspondem aos mínimos de transmitâncias. A partir dos valores de  $m$  obtidos, pode-se então calcular o valor do caminho óptico e utilizando então a **Eq. (2.4)**, poderão encontrar o valor de  $n$  para cada comprimento de onda correspondente aos mínimos de transmitância. A partir dos valores de  $n$  obtidos para valores de  $m$  ímpares, finalmente se torna possível determinar o valor da espessura do filme. Com o valor da espessura  $d$  em mãos, facilmente eles serão capazes de determinar o valor de  $n$  para os valores de  $m$  par, através da **Eq. (2.1)**.

# Considerações Finais

Conforme pudemos ver na **Introdução**, tanto filmes finos quanto semicondutores possuem aplicações inúmeras, porém essenciais para nossas vidas, podendo-se citar também as camadas anti-refletoras [12], superfícies refletoras de espelhos, camadas múltiplas para espelhos interferométricos, fabricação de dispositivos como células solares, transistores, xerografia, detectores, memórias magnéticas e óticas [13]. Devido a isso, o conhecimento de suas preparações e de suas propriedades faz com que tal número de aplicações venha a aumentar ainda mais. Para tanto, torna-se imprescindível um concreto investimento no ensino desses tópicos com material adequado e professores bem preparados; porém, poucas são as instituições de ensino superior que possuem infraestrutura para tal. O Instituto de Física “Gleb Wataghin” (UNICAMP) é um dos raros institutos brasileiros que disponibiliza uma disciplina de laboratório para a etapa profissional do curso de Física na qual são introduzidas as práticas básicas experimentais de crescimento de filmes finos.

Assim, começamos essa monografia discutindo, no **Capítulo 1**, o estudo e o aprimoramento das técnicas de crescimento de filmes finos que possibilitaram o desenvolvimento do semicondutor que, por sua vez, representa um imenso avanço para a tecnologia com o desenvolvimento da eletrônica e microeletrônica. Além de suas aplicações já citadas, podemos destacar ainda seu emprego em componentes eletrônicos, como por exemplo, microprocessadores, LEDs, diodos e células solares. Já no **Capítulo 2** introduzimos detalhadamente todo o procedimento experimental e, por fim, apresentamos sugestões quanto ao uso de nosso material no curso no **Capítulo 3**.

Assim, elaboramos um material de apoio voltado principalmente para a disciplina **F640 (Laboratório de Vácuo e Criogenia – IFGW)**, mas que poderá também ser utilizado em outros cursos. Com tal material o professor responsável poderá dar uma aula expositiva que introduzirá as técnicas de crescimento e de caracterização de filmes finos de óxidos de silício. A aula poderá entrar na grade curricular logo após a *experiência de semicondutores* [13]. Ela será programada para ter **1 hora e meia** de duração com **15 minutos** de acréscimo para perguntas e, após isso, poderão ser destinados mais **15 minutos** de intervalo, totalizando **2 horas**. Assim, poderá ser administrada no mesmo dia da *visita ao Laboratório de Criogenia*, que dura menos de **2 horas**. O material completo incluirá um **painel**, essa **monografia**, uma **aula expositiva** e uma **página na internet**, a qual tentaremos vincular ao site do instituto, para que ela seja de fácil acesso tanto para os alunos de **F640** quanto para os demais interessados. Acreditamos que



essa página também poderá ser de interesse para as turmas que estiverem cursando **F428 (Física IV – IFGW)** quando forem estudar o **Capítulo 46** de [14].

Acreditamos que além de benefícios para o curso de **F640** e para a formação dos alunos, o material completo sugerido motivará alguns desses alunos a começar a desenvolver um projeto de iniciação científica nessa área que, além de rica em aplicações, enriquecerá o aluno de conhecimentos em física estatística, mecânica quântica, vácuo, estado sólido, técnicas de crescimento de filmes finos, técnicas laboratoriais, espírito científico e investigativo, postura ética e profissional no laboratório e trabalho em grupo.

# Referências Bibliográficas

- [1] <http://www.opto.com.br/filmesfinos/default.htm>.
- [2] <http://www.metalmat.ufrj.br/superficie/historic.html>.
- [3] <http://www.propesq.ufpe.br/conic97/ccen/RES-20036.html>.
- [4] Maissel e Glang, *Handbook of thin film technology*, 1970.
- [5] Thun, R. E., *Structure of Thin Films*, 1963.
- [6] Wolf, W. and Tauber, R.N., *Silicon processing for VLSI era*, Lattice press 1, 1986.
- [7] Caswell, H. L., *Ultra-High Vacuum Evaporators and Residual Gas Analysis, Physics of Thin Films – Advances in Research and Development*, Volume 1, 1963.
- [8] Maissel, L. I., *The Deposition of Thin Films by Cathode Sputtering, Physics of Thin Films*, Volume 3, 1966.
- [9] Vossen, J. L. and Cuomo, J.J., *Physical Methods of Film Deposition – Glow Discharge Sputter Deposition in Thin Film Processes*, 1978.
- [10] J. I. Cisneros, A. C. da Costa, *Nota Experimental 08*, IFGW.
- [11] J. R. Reitz, J. M. Milford, R. W. Christy, *Foundations of Electromagnetic Theory*, Addison Wesley.
- [12] I. Chambouleyron, J.M. Martínez, *Chapter 12 – Optical Properties of Dielectric and Semiconductor Thin Films*, in H.S. Nalwa (ed.) *Handbook of Thin Film Materials*, Vol. 3, Academic Press, San Diego, 2001.
- [13] Marques, F. C. e Gama, S., F 640 – Vácuo e Criogenia – *Roteiro de Experimentos*, IFGW – UNICAMP, 2002.
- [14] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fundamentos de Física 4 – Ótica e Física Moderna*, 4a edição, LTC Editora, Rio de Janeiro, 1995.

**OBSERVAÇÃO :- Demais referências e dados experimentais se encontram na página do projeto.**