

3 Procedimentos Experimentais

3.1. Introdução

Este capítulo detalha o funcionamento do sistema de deposição instalado no Laboratório de Revestimentos Protetores do Departamento de Física da PUC-Rio, além dos procedimentos experimentais empregados para cada série de deposição dos filmes. Também será descrita brevemente cada técnica de caracterização empregada para a análise dos filmes.

3.2. Sistema de deposição

O sistema de deposição utiliza uma câmara de aço inoxidável, com 30 cm de diâmetro interno e 35 cm de altura, e um sistema com dois eletrodos assimétricos. O eletrodo menor (ânodo), onde foram montados os substratos, é uma peça cilíndrica de aproximadamente 7,5 cm de diâmetro, feita de cobre, refrigerada a água e posicionada na parte superior central da câmara. O canhão refrigerado de *sputtering* da *US GunTM*, onde é posicionado o alvo de TiB_2 , constitui o outro eletrodo (catodo) que está posicionado na parte inferior da câmara a uma distância aproximada de 10cm do anodo. Imagens ilustrativas do sistema de deposição são mostradas na figura 3.1.

O canhão de *sputtering* é constituído por magnetos circulares onde a geometria de campo magnético é circular e cria uma descarga anular ou toroidal de alto grau de ionização confinada sobre o alvo, tornando a erosão mais eficiente (Figura 3.2).

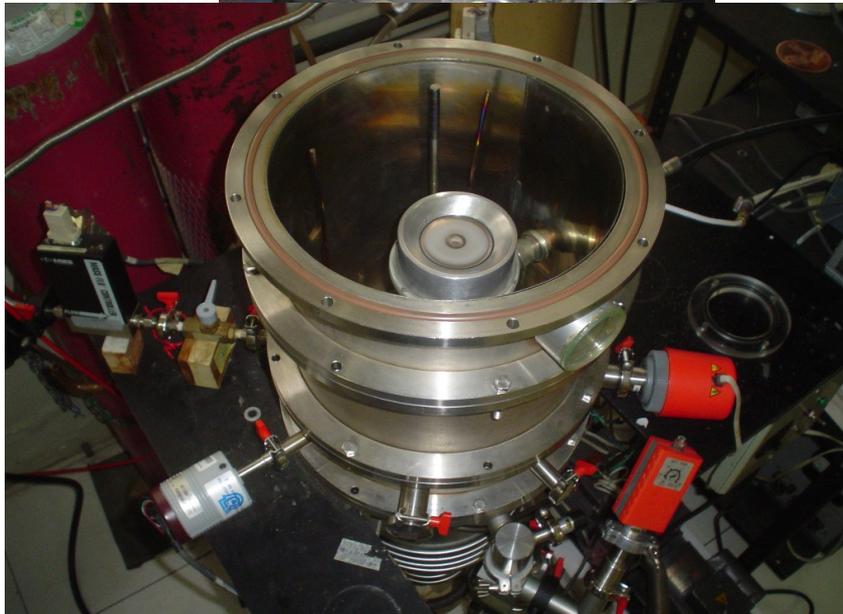
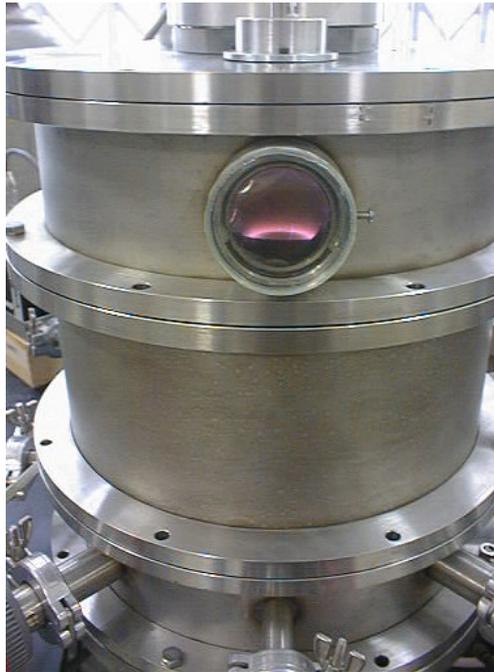


Figura 3.1 Sistema de Deposição por erosão catódica confinado por um campo magnético. Na foto acima temos o plasma de argônio.

Entre o ânodo e o canhão de *sputtering* há um anteparo móvel utilizado para proteger o substrato, impedindo a deposição do filme quando for necessário. Esse anteparo é utilizado quando queremos limpar a superfície do alvo sem que o material ejetado se deposite no substrato. Nesse caso é utilizado um plasma de rádio frequência de argônio puro.

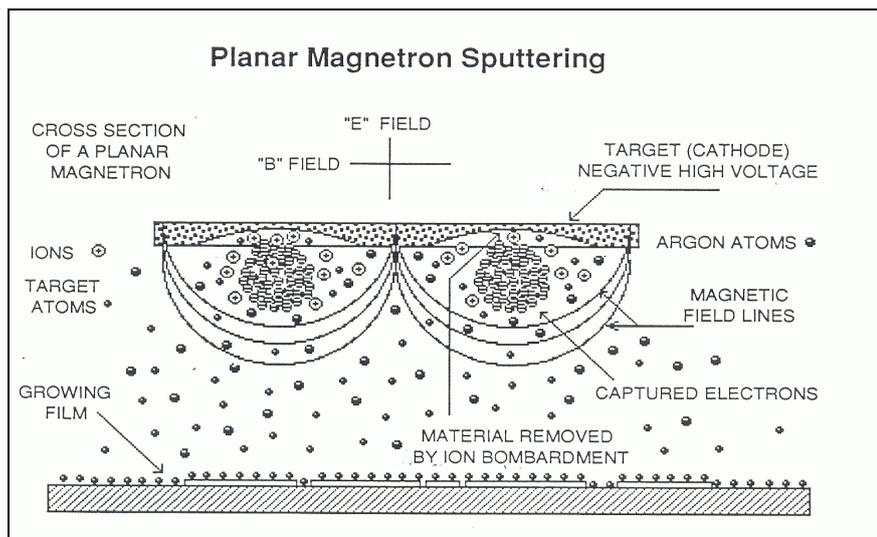


Figura 3.2 Esquema de um canhão de *sputtering* planar constituído por magnetos

O alvo consiste de um disco de TiB_2 de pureza 99.5% e de 3 polegadas de diâmetro com 0.125 polegadas de espessura da *Williams Advanced Materials*. Ele é posicionado na superfície do canhão que é refrigerado durante todo o processo de deposição dos filmes.

O sistema de vácuo é composto por um conjunto formado de uma bomba rotativa de palhetas de duplo estágio modelo E2M18 - *Edwards* e por uma bomba de tipo difusora da *Edwards* de 200l/s cuja capacidade de trabalho possibilitou atingir pressões de base da ordem de 10^{-6} torr. Conectado à câmara estão os medidores de pressão capacitiva *MKS (baratron)* e térmicos *Edwards (pirani)*, para pressões até 10^{-3} torr, além de um sensor tipo *penning* também da *Edwards* para medir pressões mais baixas. As entradas dos gases (Argônio e N_2) estão conectados com a câmara por meio de controladores de fluxo por massa da *MKS Instruments Inc*, devidamente calibrados para cada tipo de gás.

3.3. Procedimentos Experimentais

Alguns cuidados foram tomados antes da deposição dos filmes, tanto para o sistema de deposição como para os substratos. Uma limpeza geral do sistema de deposição começa com a purga dos gases residuais tanto nas tubulações como nas paredes da câmara. Isto foi realizado abrindo-se as válvulas das tubulações dos gases e mantendo as válvulas dos cilindros dos gases fechadas. Foi evacuado o conjunto câmara e conexões controlando-se o fluxo de cada gás

no controlador de fluxo por massa até que esse fluxo ficasse zerado (gás residual na câmara nulo).

Todos os filmes sem exceção foram crescidos em substratos de Si cristalino <100> com dopagem do tipo p cuja resistividade era da ordem de 20 Ω .cm. Os substratos foram selecionados (medidas de curvatura inicial) para evitar os efeitos da curvatura inicial nas medidas de tensão interna e que serão discutidas mais adiante. As lâminas de silício foram clivadas em formato quase retangular com dimensões de aproximadamente 3 cm por 1 cm. Antes de cada deposição os substratos foram limpos de acordo com a seguinte seqüência: banho em ultra-som de acetona P.A. por 10 minutos, banho de ácido fluorídrico diluída em água (1:10) por 30 segundos, lavagem rápida em água deionizada e finalmente a secagem com jatos de nitrogênio super seco. A seguir eram presos ao porta-substratos e colocados na câmara, que era então evacuada pelas bombas de vácuo até que a pressão desejada fosse atingida, sempre inferior a 3.0×10^{-6} torr, com a finalidade de remover os gases residuais de seu interior.

3.4. Técnicas de Caracterização

3.4.1. Espectrometria de Retroespalhamento Rutherford (RBS)

O método de análise por RBS (*Rutherford Backscattering Spectrometry*) faz parte de um conjunto de métodos conhecido como de análise de materiais por feixe de íons (IBA, *Ion Beam Analysis*). As medidas são baseadas no conhecimento da seção de choque de Rutherford e consiste em determinar a energia de partículas, E_1 , de um feixe incidente de íons monoenergéticos com massa m_1 e que sofreram colisões com os átomos do alvo que queremos analisar e que têm massa m_2 . Esta energia dos íons espalhados após a colisão irá depender das massas dos átomos do feixe e do material, da profundidade na amostra do átomo que causou o espalhamento e da geometria da detecção. O termo retroespalhamento é devido ao fato do detector ficar posicionado a ângulos traseiros para a detecção destes íons retroespalhados.

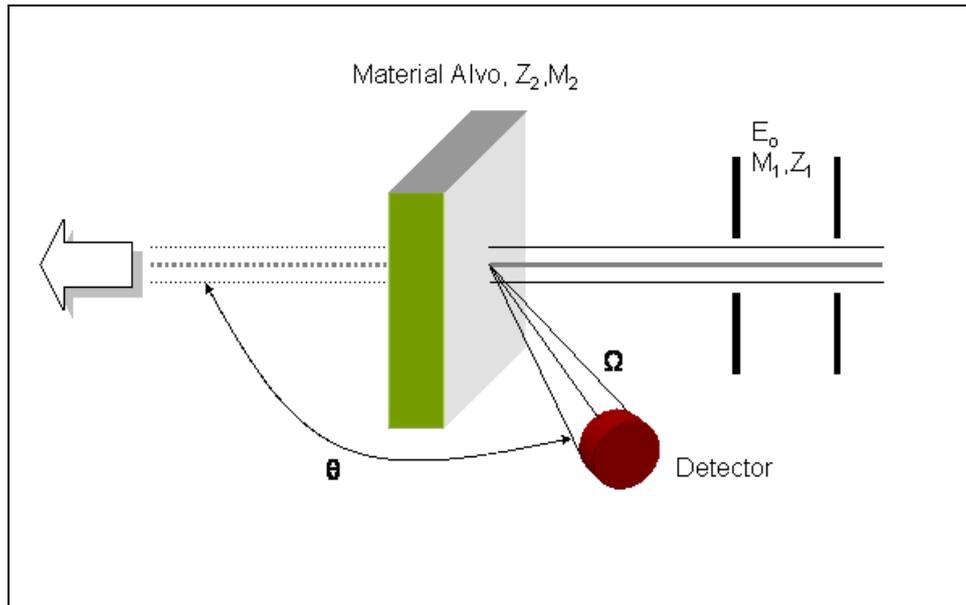


Figura 3.3 Esquema RBS, retroespalhamento elástico de íons incidentes por um alvo [47]

Definimos o fator cinemático, K , como a razão da energia cinética dos íons após a colisão dividida pela energia cinética antes da colisão, conforme a equação 3-1 (θ , ângulo entre o feixe incidente e o detector); fator que nos permitirá determinar as espécies atômicas presentes na amostra de massas m_2 .

$$K = \frac{E_1}{E_0} = \left[\frac{\left(1 - \left(\frac{m_1}{m_2} \right)^2 \cdot \text{sen}^2 \theta \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{m_1}{m_2} \cdot \text{cos} \theta}{1 + \frac{m_1}{m_2}} \right]^2 \quad (3-1)$$

Na figura 3.3 um feixe de íons, com número atômico Z_1 , massa atômica m_1 e energia E_0 atinge nosso material alvo com átomos de massa m_2 e número atômico Z_2 . Um detector é posicionado a um ângulo θ e coleta os íons retroespalhados após a colisão com os átomos de massa $m_2 > m_1$. Assim é possível fazer espectrometria de massa. Observa-se dessa figura que somente as partículas que são espalhadas dentro do ângulo sólido (Ω) chegam a ser registradas pelo detector. A probabilidade de espalhamento é definida pela seção de choque diferencial, assim:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{(\text{Número} \cdot \text{de} \cdot \text{partículas} \cdot \text{detectadas})}{(\text{Número} \cdot \text{total} \cdot \text{de} \cdot \text{partículas} \cdot \text{incidentes})} = \frac{A}{Q \cdot d\Omega \cdot N \cdot t} \quad (3-2)$$

Onde N.t (em at./cm²) é o número de átomos de uma espécie por unidade de área na amostra. O ângulo sólido é suficientemente pequeno para permitir associar dσ/dΩ a uma seção de choque média, $\bar{\sigma}$, definida por:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} \frac{d\sigma}{d\Omega} \cdot d\Omega = \sigma(\theta) \quad (3-3)$$

Onde $\Omega = a/4\pi l^2$, (a - área efetiva do detector; l – distância do detector à amostra). A partir das equações (3-2) e (3-3) é possível obter o número A de partículas detectadas em função da seção de choque de espalhamento da colisão $\sigma(\theta)$:

$$A = \sigma(\theta) \cdot \Omega \cdot Q \cdot N \cdot t \quad (3-4)$$

Da equação (3-4) conhecendo σ e Ω , e medindo-se A e Q, o número de átomos de uma espécie por unidade de área (N.t) no alvo pode ser determinado. Este número pode ser obtido através da altura (H) do espectro RBS,

$$H = \frac{\sigma \cdot \Omega \cdot Q \cdot N \cdot t \cdot E'}{(dE/dx)} \quad (3-5)$$

Onde, dE/dx é a perda de energia do projétil incidente e E' é a calibração em energia (keV/canal) do multicanal [47].

Para as medidas de RBS, utilizou-se o acelerador *Van de Graaff* KN-4000 da *High Voltage Engineering Corporation*, um acelerador eletrostático de 4 MV, pertencente ao Departamento de Física da PUC-Rio. Para as nossas medidas foi

usado um feixe de He⁺ de 2.0 MeV incidindo a 90° com a superfície do filme e detectou-se o retroespalhamento a 165° em relação ao feixe incidente. O detector utilizado foi do tipo barreira de superfície de 25 mm² de área ativa com sua superfície coberta por uma folha de tântalo com um pequeno furo de 1 mm². O ângulo sólido do detector era de 1,5 mstr e a resolução em energia do sistema de detecção e análise de pulsos era de 19 keV. Este detector é conectado à eletrônica de amplificação e a um multicanal que permitem determinar a energia das partículas retro-espalhadas

Uma foto do arranjo da câmara de análise por análise de feixe de íons pode ser vista na Figura 3.4. Um detector está posicionado a 165° com relação ao feixe incidente e conta os íons retroespalhados. Um segundo detector é posicionado atrás de um ventilador pequeno movido por um motor de passo com duas hélices que bloqueiam o feixe de íons periodicamente e provocam o retroespalhamento das partículas do feixe. Esse segundo detector é empregado para determinar a carga real que incide sobre a amostra, possibilitando a comparação entre os diferentes espectros. A calibração da carga integrada é feita deixando passar o feixe por um furo no porta-amostra até incidir sobre um copo de *Faraday* posicionado no fundo da câmara. A medida de carga integrada é feita comparando a medida de carga total que chegou no copo de *Faraday* com o número de íons retroespalhados e detectada pelo segundo detector.

Para a análise do espectro foi feita uma comparação com simulações efetuadas com o programa de computador RUMP [48,49]. Antes das medidas foi feita a calibração em energia do multicanal para os parâmetros utilizados nas medidas utilizando-se padrões de referência de óxido de silício (SiO₂) e nitreto de titânio (TiN).

Na análise dos filmes empregou-se esta técnica para quantificar a concentração atômica de cada elemento da composição das amostras além da presença de possíveis contaminantes.

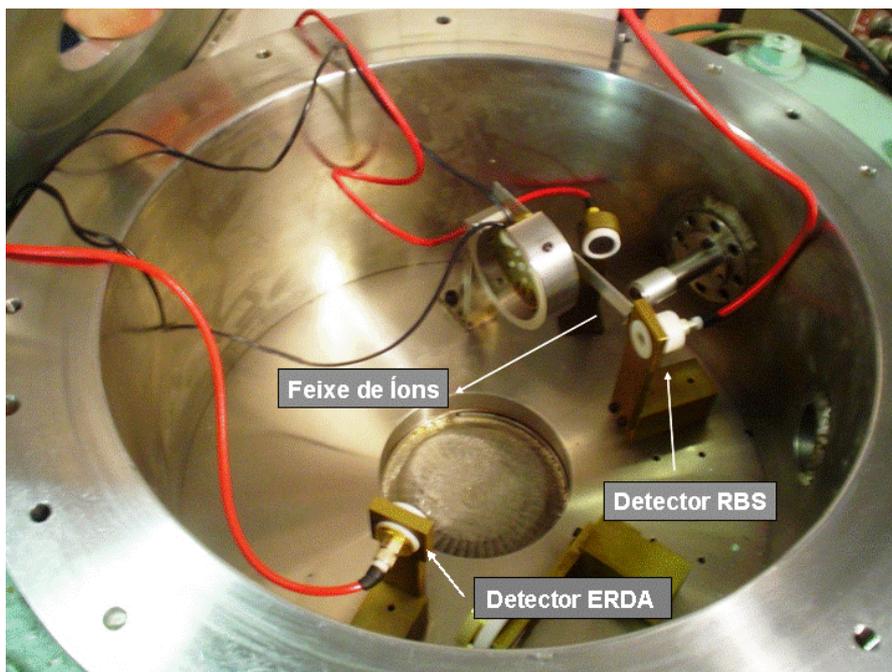


Figura 3.4 Arranjo do interior da câmara de análise por RBS

3.4.2. Difração por raios-x (XRD)

Difração por raios-x é uma eficiente técnica analítica que tem sido amplamente usada para identificar e caracterizar materiais cristalinos. O amplo uso desta técnica é devido à simplicidade do método, por ser não destrutiva, dispensar métodos complexos de preparação das amostras e pela possibilidade da análise de materiais constituídos de uma mistura de fases.

Feixes de raios-x monocromáticos são usados para determinar os espaçamentos inter-planares dos filmes a serem analisados. Quando as condições de Bragg (equação 3-6) para interferência construtiva são obtidas, um máximo de intensidade é produzido, figura 3.5. Nos espectros obtidos pela técnica de XRD, as posições, intensidades e larguras dos picos fornecem informações importantes sobre a estrutura do material a ser analisado. O esquema de um espectrômetro de difração por raios-x é representado na figura 3.6.

$$n\lambda = 2d \cdot \text{sen}\theta \quad (3-6)$$

n : número inteiro

λ : comprimento de onda dos raios-x incidentes

d : distância interplanar

θ : ângulo de difração

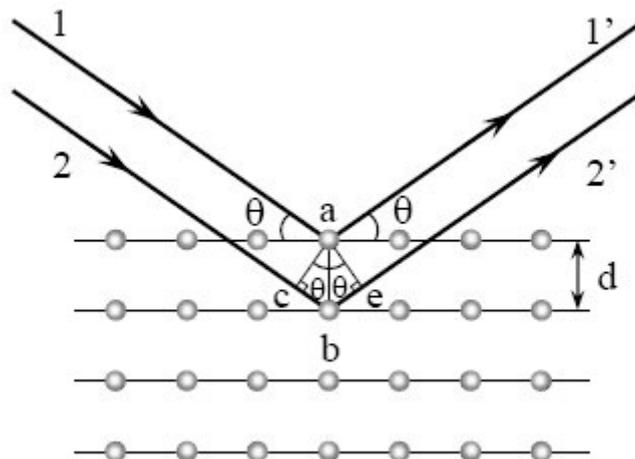


Figura 3.5 Condição para a difração de Bragg numa família de planos espaçados de uma mesma distância d .

Por outro lado, mudanças na posição dos picos podem representar tanto a variação na composição como da tensão interna das superfícies.

Devido a que os difratogramas dos filmes finos depositados num substrato podem algumas vezes serem ofuscados pela contribuição do substrato, uma variante da técnica de XRD, *glancing angle x-ray diffraction (GXRD)*, difração por raios-x por incidência rasante, foi desenvolvida para obter a informação estrutural de filmes finos, evitando a contribuição do substrato. Nesse caso ângulo de incidência é rasante com valores variando entre 0.5 até 1°. GXRD é uma técnica útil para o estudo de superfícies e interfaces

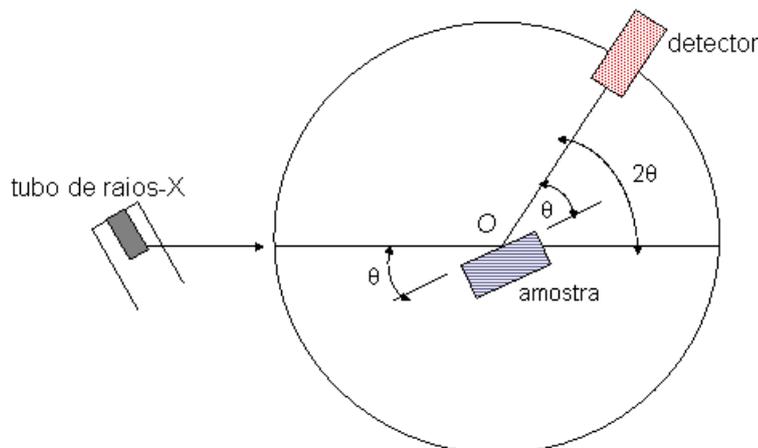


Figura 3.6 Esquema de um espectrômetro de difração por raios-x.

As medidas de difração por raios-x foram realizadas em um difratômetro *Siemens* modelo D5000, com velocidade do goniômetro de $1^\circ/\text{min}$, tubo de cobre ($\lambda = 1,542 \text{ \AA}$) pertencente ao Laboratório de difração por raios-x do Instituto de Física da Universidade Federal Fluminense. Os filmes foram alinhados numa base de teflon com uma cavidade onde um anel metálico se encaixa no braço do goniômetro. O filme é fixado com massa de modelar quando pressionado por uma lâmina de vidro até atingir a planicidade correta. O alinhamento é então confirmado, verificando-se a posição de reflexão especular. O detector (ângulo 2θ) fica posicionado a $1,0^\circ$ e o porta amostra faz uma varredura (em θ) entre $0,0^\circ$ e $1,0^\circ$. A condição de reflexão deve ocorrer em $0,5^\circ$. Todas as medidas foram realizadas no modo Bragg-Brentano ($\theta, 2\theta$).

3.4.3. Espectroscopia de fotoelétrons induzida por raios-x (XPS)

O princípio físico básico da espectroscopia de fotoelétrons induzida por raios-x (XPS, *x-ray photoelectron spectroscopy*) é o efeito fotoelétrico. Um feixe emitido por uma fonte de raios-x interage com a amostra. A energia transportada pelo fóton de raios-x é absorvida pelo átomo alvo ocasionando a ejeção de um elétron proveniente de suas camadas eletrônicas mais internas. A energia

cinética E_C do elétron (fotoelétron) que abandona o átomo alvo depende da energia do fóton incidente, $h\nu$, e é expressa pela relação de Einstein [50].

$$E_C = h\nu - E_1 - \Phi \quad (3-7)$$

Onde E_1 é a energia de ligação do fotoelétron ejetado e Φ a função trabalho do analisador.

O analisador de fotoelétrons utilizado foi o analisador hemisférico concêntrico (*concentric hemispherical analyser, CHA*), com raio 150mm, equipado com detectores de elétrons do tipo *channeltron* [50,51]. A forma básica deste analisador consiste de dois hemisférios posicionados concêntricamente com um campo elétrico aplicado entre eles permitindo que somente elétrons com uma determinada energia atravessem o analisador sem colidir com as placas. XPS é uma técnica de análise de superfícies que fornece informação das camadas superficiais das amostras, mesmo que os raios-x possam atravessar a totalidade da amostra. A informação dos elétrons detectados se origina das primeiras camadas atômicas. A espessura da camada analisada depende do tipo de material, mas não supera uns poucos nanômetros. Isto é devido ao fato de que fotoelétrons gerados em posições mais internas da amostra sofrem espalhamentos múltiplos de forma tal que sua energia quando detectados não tem mais correlação alguma com a energia de ligação do átomo estudado. Assim, é necessário utilizar a câmara de ultra-alto vácuo para que a superfície da amostra a ser analisada esteja livre de gases adsorvidos e de outros contaminantes.

As medidas de XPS foram realizadas no Laboratório do Acelerador Van de Graaff (Figura 3.7) com o auxílio do Prof. Marcelo Eduardo Huguenin Maia da Costa; empregando um analisador hemisférico CLAM4 MCD da VG *Microtech*, modelo XR 705, pertencente ao Departamento de Física da PUC-Rio.

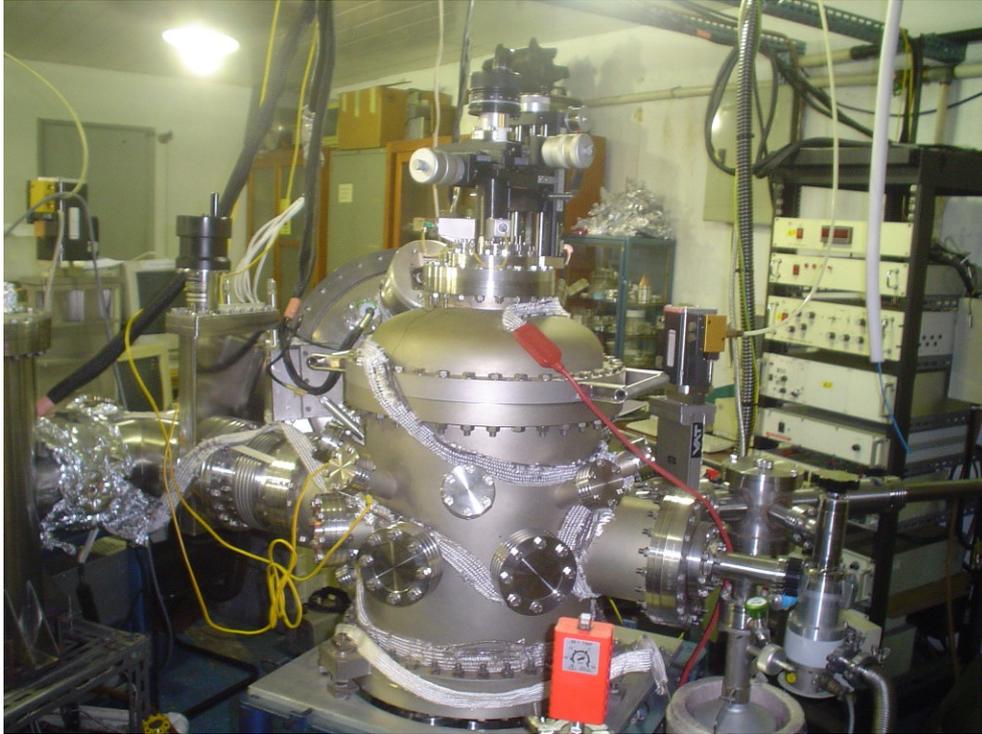


Figura 3.7 Estação de Análise por XPS do Laboratório Van de Graaff da PUC-Rio.

3.4.4. Perfilometria

Durante o processo do crescimento dos filmes a tensão interna se desenvolve seja devido à diferença da dilatação térmica entre o filme e o substrato ou devido a tensões intrínsecas pela presença de impurezas e/ou distorções das ligações químicas, como ocorre em sistemas desordenados. Muitas vezes elevadas tensões internas nas amostras provocam o descolamento do filme do substrato devido à fraca adesão entre as duas superfícies na interface. O uso da perfilometria permite a determinação da tensão interna dos filmes a partir das mudanças de curvatura dos substratos onde são crescidas as amostras. Essas mudanças são induzidas por essa tensão. A tensão dos filmes pode ser tensiva ou compressiva (Figura 3.8)

Um perfilômetro nada mais é do que um equipamento que determina e mede o perfil da superfície do filme mediante o contato e deslizamento de uma ponta de diamante sobre a mesma. Devido à superfície rugosa dos filmes a ponte sobe e desce descrevendo a topografia da superfície sobre a qual desliza.

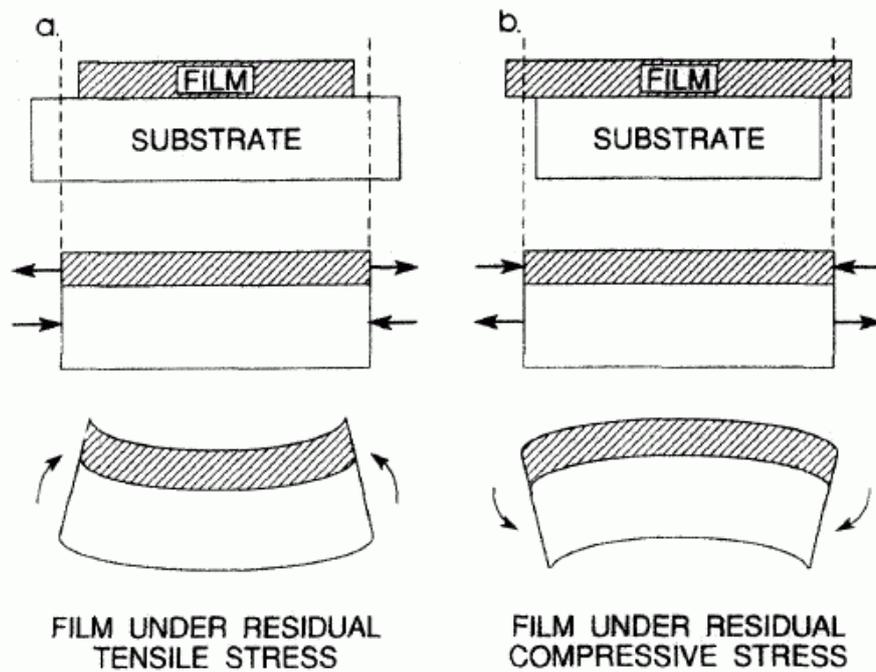


Figura 3.8 (a) tensão interna tensiva e (b) tensão interna compressiva em filmes [45].

A posição da ponta é controlada por um cristal piezoelétrico. Mediante a perfilometria medimos a curvatura do substrato antes e após a deposição do filme. Com essas medidas é possível determinar a tensão interna dos filmes. A tensão do filme é determinada pela equação de *Stoney* [52] :

$$\sigma = \left[\frac{Y}{1-\nu} \right] \cdot \left[\frac{h^2}{6t(R_f - R_i)} \right] \quad (3-8)$$

Onde Y e ν são respectivamente o módulo de Young e a razão de Poisson do substrato (para o silício $Y = 113\text{GPa}$ e $\nu = 0,42$ [53]), h a espessura do substrato, t a espessura do filme e R_f e R_i são os raios de curvatura inicial do substrato e a curvatura final do filme+substrato.

As medidas da espessura e as curvaturas iniciais e finais dos filmes foram feitas utilizando um perfilômetro *DEKTAK 3* do Laboratório *Van de Graaff* da PUC-Rio, figura 3.9. O critério de escolha dos substratos a serem utilizados foi o de selecionar substratos próximos aos idealmente planos. Um perfil típico obtido dos raios de curvatura no perfilômetro é mostrado na figura 3.10.



Figura 3.9 Imagem do perfilômetro DEKTAk 3 do Laboratório Van de Graaff.

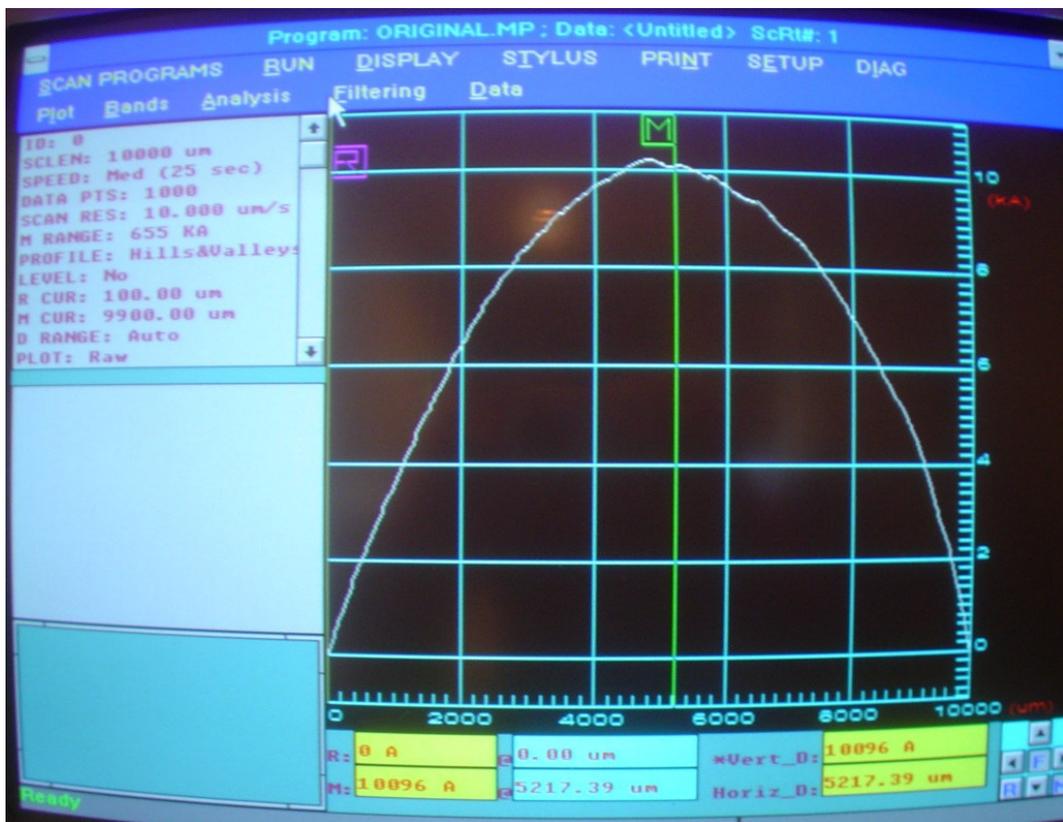


Figura 3.10 Perfil do raio de curvatura de um filme obtido no perfilômetro.

3.4.5. Medidas de ângulo de contato

O ângulo de contato de um material tem forte relação com a energia superficial. Um líquido como a água tende a se espalhar sobre uma superfície com alta energia superficial e por outro lado formar gotas sobre uma superfície de baixa energia superficial. Isso quer dizer que é necessária energia (superficial) para superar a tensão superficial de um líquido a qual vem da superfície (filme) onde o líquido repousa.

Nesta tese as medidas de ângulo de contato foram feitas empregando o método de gota *sessile* estático [54], neste método é colocada uma quantidade de água destilada em contato com o material, formando uma gota sobre a sua superfície. Na situação onde ocorre a formação da gota, o chamado ângulo de contato é definido como o ângulo entre um plano tangente à gota e o plano da superfície do material, conforme esquematizado na figura 3.11.

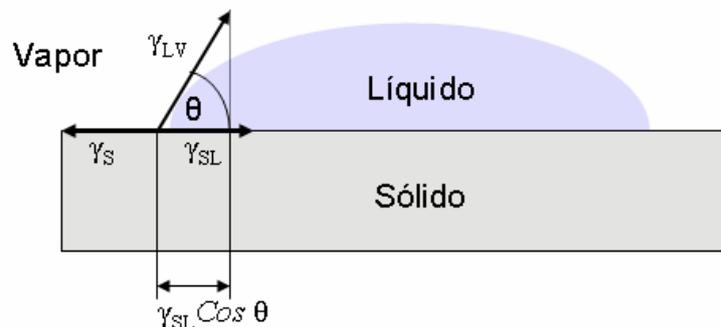


Figura 3.11 Esquema representando o ângulo de contato θ no limite das fases sólida, líquida e vapor.

De acordo com a figura 3.11, γ_s representa a energia superficial da superfície sólida na atmosfera (vapor), γ_{sl} representa a energia superficial entre a superfície sólida e a gota de água e γ_{lv} representa a energia superficial na interface líquido-vapor. Esta gota pode estender-se sobre a superfície ou assumir a forma de um segmento esférico, desde uma lente lisa até uma esfera quase completa. A primeira e melhor descrição deste fenômeno foi feita por Young em 1805 [55]. A equação 3-9 descreve o equilíbrio das forças na direção paralela à superfície do material,

$$\gamma_s = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta \quad (3-9)$$

A formação ou não da gota sobre o material dependerá da interação das interfaces sólido-líquido e líquido-vapor, a partir das condições estabelecidas das energias superficiais estabelecidas na equação de Young. Um sólido totalmente hidrofóbico não tem afinidade da água com a superfície sólida, e o ângulo de contato é aproximadamente 180°. Para sólidos hidrofílicos, o ângulo de contato se aproxima de 0°.

As medidas de ângulo de contato foram feitas empregando um goniômetro construído no Laboratório Van de Graaff da PUC-Rio [56]. Ele é formado por um trilho de alumínio sobre o qual é suportada uma câmara CCD para captura da imagem da gota, um suporte da seringa com um parafuso de movimento micrométrico para controlar o volume da gota de água, um suporte para a amostra e um suporte para uma lâmpada luminescente. Todo o equipamento é mostrado na foto da figura 3.12.

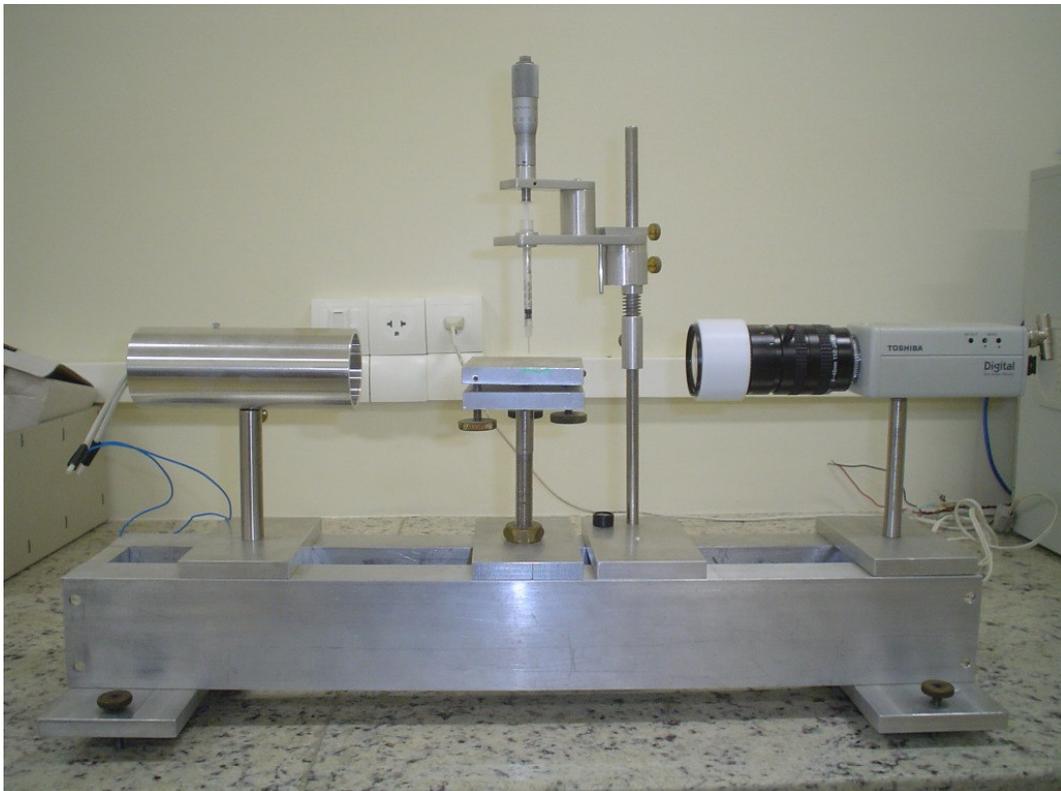


Figura 3.12 Equipamento para medida de ângulo de contato.

3.4.6. Microscopia de Força Atômica (AFM)

G. Binning, C.F.Quate e C. Gerber [57], inventaram o Microscópio de Força atômica (AFM) em 1986. O microscópio é composto basicamente por uma pequena ponta, que pode ser de Si, Si₃N₄ ou diamante, que varre a superfície da amostra a ser analisada e que é presa a um cantilever que se deforma conforme a força de interação produzida entre a ponta e a superfície, dada pela lei de *Hooke*:

$$F_n = \kappa \cdot \Delta z \quad (3-10)$$

Onde κ é a constante de mola do cantilever, F_n a força normal entre a ponta e a superfície e Δz a deflexão vertical do cantilever.

As forças de interação acontecem entre a ponta e os átomos da superfície da amostra analisada provocando a deflexão do cantilever. Esta interação resultante pode ser atrativa ou repulsiva como mostrado na figura 3.13. Quando há uma mudança na topografia da superfície temos uma mudança na deflexão do cantilever. A grandes distâncias entre a ponta e a superfície, a interação é predominantemente atrativa, devida principalmente à força de *Van der Waals*. Ao aproximarmos ainda mais a ponta da superfície, os orbitais eletrônicos dos átomos da ponta e da superfície ficam próximos e começam a se repelir.

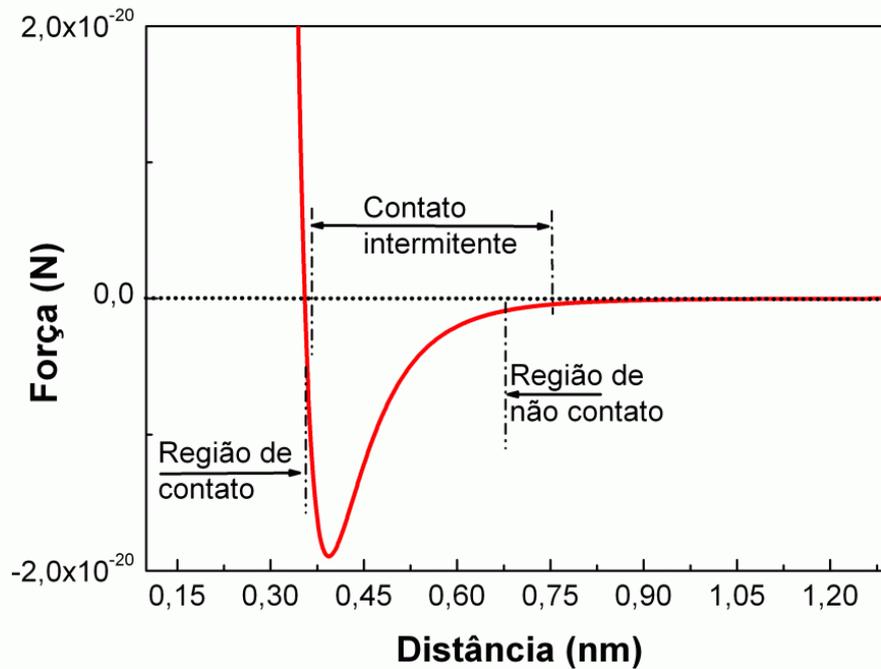


Figura 3.13 Simulação da força de interação entre um átomo da ponta e um átomo da superfície em função de sua distância obtida através do uso do potencial de *Lennard-Jones*.

A partir da figura 3.13 é possível entender os modos de operação do microscópio de força atômica de acordo com a força de interação resultante entre a ponta e a superfície,

- **modo contato**, com forças predominantemente repulsivas, provocando a deflexão vertical para cima do cantilever.
- **modo *tapping***, o microscópio trabalha em dois regimes de forças: umas vezes atrativa outras vezes repulsiva. A ponta oscila intermitentemente.
- **modo não-contato**, regime de força atrativo. O cantilever é mantido a grandes distâncias da superfície e vibra com uma pequena amplitude.

No AFM, um feixe de luz produzido por um laser diodo é direcionado na extremidade do cantilever, logo sofre uma reflexão em um espelho e então é dirigido para um fotodetector com quatro quadrantes, como mostra a figura 3.14

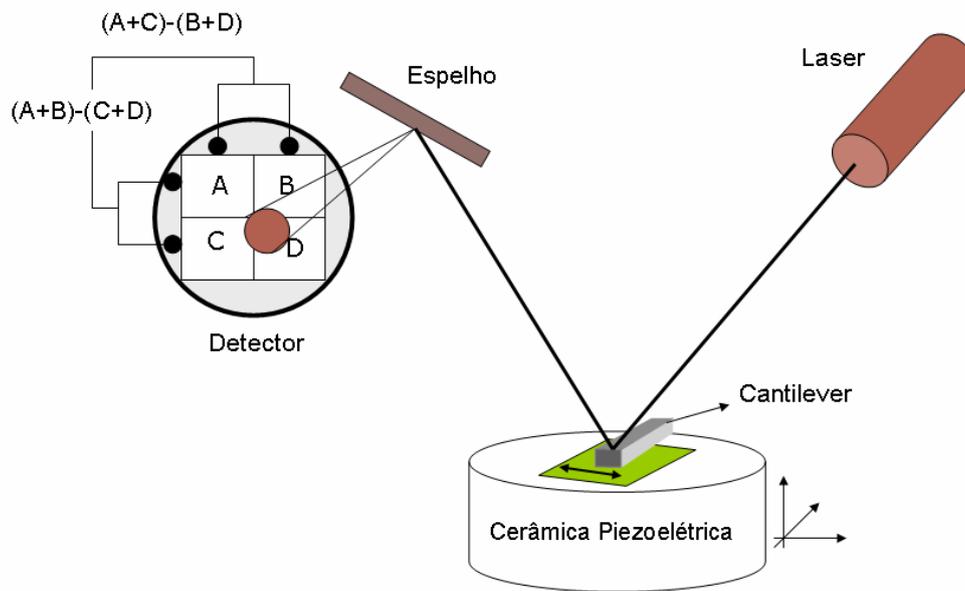


Figura 3.14 Esquema do funcionamento do AFM – Detecção da deflexão do cantilever por meio de um feixe de laser.

Quando a ponta no cantilever sofre deflexão vertical provoca o deslocamento vertical do feixe do laser sobre o fotodetector, o qual é quantificado medindo a diferença do sinal entre os quadrantes superior e inferior:

$$V_Z = \frac{[(V_A + V_B) - (V_C + V_D)]}{(V_A + V_B + V_C + V_D)} \quad (3-11)$$

A torção do cantilever provoca o deslocamento lateral do feixe do laser sobre o fotodetector, produzindo uma diferença de sinal entre os quadrantes da esquerda e da direita do fotodetector, assim:

$$V_L = \frac{[(V_A + V_C) - (V_B + V_D)]}{(V_A + V_B + V_C + V_D)} \quad (3-12)$$

Onde V_A , V_B , V_C e V_D são as tensões medidas independentes em cada quadrante do fotodetector [58,59].

O AFM nos permite medir o atrito conhecendo-se a constante de mola do cantilever e realizando medidas no modo de força lateral utilizando o método de calibração proposto por Liu [60]. Assim, conhecendo a força normal atuando

sobre a ponta; determinando a torção sofrida pelo cantilever devido ao atrito, é possível a determinação da força de atrito, utilizando a fórmula de *Neumeister* e colaboradores [61,62] para a calibração do sistema.

Outra grandeza importante a determinar é a rugosidade dos filmes. No nosso caso as medidas de rugosidade RMS (*root mean square*) foram obtidas a partir da equação 3-11.

$$Rugosidade_{RMS} = \left(\frac{\sum (Z_i - Z)^2}{n} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3-11)$$

Onde a altura de cada ponto na superfície é obtida a partir da imagem topográfica, sendo Z_i o valor da altura em um dos n pontos medidos e Z a altura média da região.

Todas as análises do atrito e rugosidade foram feitas com um microscópio de força atômica modelo *Multimode* equipado com um controlador *Nanoscope IIIa* da *Veeco* do Laboratório de Nanoscopia do Departamento de Física da PUC-Rio, pelo estudante de doutorado Henrique Duarte da Fonseca Filho. Todas as medidas foram feitas em modo de contato.