

## MONTAGEM E CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE DEPOSIÇÃO ASSISTIDA POR FEIXE DE ÍONS

K.C. Lopes\* ; M. Matsuoka; W. Sucasaire; J.C. Mittani; C.C. Perego; A.C. Tromba; O.B. de Moraes; A.O.R. Meira  
USP, Instituto de Física, C.P. 66318, 05315-970, São Paulo, SP

Recebido: 26 de Julho, 2005; Revisado: 5 de Agosto, 2006

Palavras-chave: fonte de íons, evaporador, deposição assistida por feixe de íons

### RESUMO

*A deposição assistida por feixe de íons ("ion beam assisted deposition", IBAD) é um método de revestimento que combina um método de deposição de filme fino como evaporação com irradiação simultânea por feixe de íons energéticos extraído de uma fonte de íons. Uma combinação de uma fonte de íons e um evaporador faz o método IBAD controlável, reproduzível e flexível, sendo os parâmetros de deposição tais como fluxo de íons, energia de íons, ângulo de incidência do feixe de íons e taxa de evaporação, controlados independentemente. Para utilizar essa vantagem desse método e obter as condições de processo otimizadas, é requerido caracterizar principalmente a fonte de íons. No presente trabalho, será descrito um sistema IBAD montado e instalado no Instituto de Física da Universidade de São Paulo.*

### ABSTRACT

*Ion beam assisted deposition (IBAD) is a coating method which combines vacuum deposition with irradiation by an energetic ion beam extracted from an ion gun. A combination of an ion gun and an evaporator leads to the IBAD method to be controllable, reproducible and versatile. The deposition parameters such as ion flux, ion energy, incident angle of the ion beam and evaporation rate can be independently controlled. In order to use properly this method and obtain the optimized process conditions we have to characterize the ion gun. In the present work an IBAD system constructed and installed at Institute of Physics, University of São Paulo will be described.*

### 1. INTRODUÇÃO

No método de deposição assistida por feixe de íons ("ion beam assisted deposition", IBAD), a deposição à vácuo de material sobre um substrato é combinada com bombardeamento simultâneo por íons. Íons com uma energia de centenas de eV até dezenas de keV penetram no substrato e chocam-se com átomos depositados sobre este, impelindo-os da superfície para dentro; a seguir é formada dentro do substrato uma nova fase intermediária mista de elementos do substrato, íons incidentes e átomos depositados. A formação dessa nova fase aumenta a aderência do filme depositado. As

características do método IBAD são as seguintes: (1) Boa aderência, por não existir nenhuma interface descontínua entre o substrato e o filme; (2) Aplicabilidade a substratos em baixas temperaturas, devido ao princípio do processo de formação de filmes finos; (3) Facilidade da modificação e controle das características físicas e químicas (dureza, densidade, tensão interna, morfologia, estequiometria), e propriedades cristalográficas (nucleação, densidade de nucleação, estrutura cristalina) de filmes finos com os controles independentes dos parâmetros de deposição [1-4].

Para aproveitar essa vantagem do método e obter as condições de processo otimizadas, é requerido caracterizar o sistema IBAD. No presente trabalho, relatamos as características de um sistema IBAD montado e instalado no Instituto de Física da Universidade de São Paulo (USP).

### 2. CONFIGURAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA IBAD

#### 2.1 CONFIGURAÇÃO

O sistema IBAD, como mostra a figura 1, consiste basicamente de: (1) Uma fonte de íons tipo Kaufman (MPS-3000, Ion Tech) com diâmetro de feixe de 5 cm na saída, energia de íons de 50 a 1200 eV, corrente de feixe máxima de 200 mA (densidade de corrente máxima de 10 mA/cm<sup>2</sup> na saída da fonte de íons). Foram acopladas à fonte de íons duas linhas de gás para N<sub>2</sub> e Ar com dois controladores de fluxo de massa (1179A, MKS); (2) Um evaporador por feixe de elétrons (EB3, Edwards) com um porta amostra para quatro cadinhos de 4 cc cada, potência de 3 kW (5 kV e 600 mA) e o ângulo de incidência do fluxo de átomos evaporados é aproximadamente de 45°; (3) Uma câmara de vácuo de aço inoxidável com diâmetro de 60 cm e altura de 70 cm, em que estão instalados, além da fonte de íons e do evaporador por feixe de elétrons acima mencionados, dois sensores de pressão de gás (um pirani e um penning), um suporte de substrato sobre o qual pode ser fixado um substrato de 2,5 × 2,5 cm<sup>2</sup> de área máxima com aquecedor de até 550°C e termopar tipo K, um monitor de deposição (XTC/2, Leybold) e um copo de Faraday feito de aço inoxidável com diâmetro de 2". Durante a deposição, o substrato é exposto perpendicularmente ao feixe de íons. Esta câmara de vácuo é evacu-

\* karina.lopes@if.usp.br

ada por uma bomba mecânica (taxa de bombeamento de 40 m<sup>3</sup>/h) em pré-vácuo e por uma criogênica (1500 l/s). A pressão de fundo e a pressão de trabalho foram, respectivamente, de  $9,3 \times 10^{-5}$ – $4,0 \times 10^{-4}$  e de  $1,3 \times 10^{-2}$  Pa.

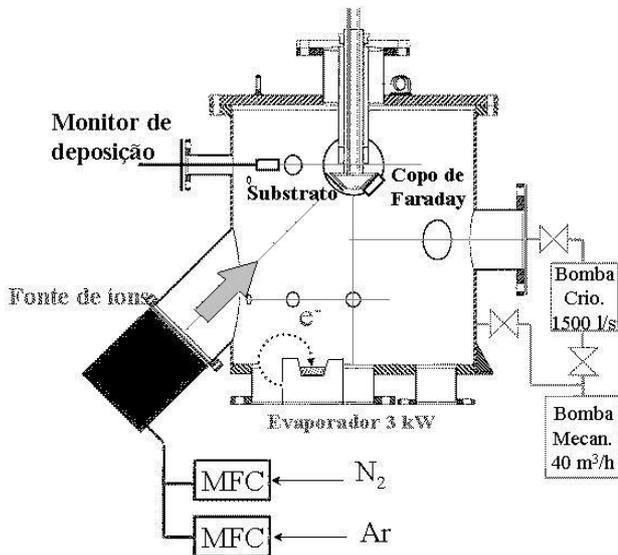


Figura 1 - Esquema do sistema IBAD.

## 2.2 EVAPORADOR

Para observar a taxa de deposição de um material evaporado sobre o substrato, foi usado o monitor de deposição instalado próximo ao suporte do substrato. Esse monitor de deposição foi calibrado para cada espécie de material a ser evaporado, correlacionando a espessura do filme depositado sobre o substrato fixado no suporte e aquela indicada pelo monitor de deposição. A espessura do filme depositado sobre o substrato foi medida usando um perfilômetro (Dektak 3030) pertencente ao Laboratório de Sistemas Integrados da Escola Politécnica da USP.

## 2.3 FONTE DE ÍONS

A fonte de íons é composta de um filamento de tungstênio (catodo) numa câmara de descarga para ionizar o gás injetado e três grades de molibdênio para acelerar e extrair o feixe de íons. Como foi dito anteriormente, para um melhor controle durante a deposição dos filmes finos, é fundamental conhecer como o procedimento operacional, as características e os limites de funcionamento da fonte de íons. Por isso, esta fonte foi testada variando seus parâmetros de operação: corrente de catodo, tensão de feixe, tensão de aceleração e fluxo de gás N<sub>2</sub>. A tensão de feixe positiva é aplicada ao anodo em relação à terra e a tensão de aceleração negativa é aplicada a grade de aceleração em relação à terra. Portanto, a tensão de feixe determina a energia de íons, enquanto a tensão de aceleração fornece uma barreira aos elétrons no feixe de íons [5]. A seguir, algumas características da fonte de íons são apresentadas.

### 2.3.1 FLUXO DE GÁS

A pressão de gás no interior da câmara de descarga é um dos parâmetros fundamentais da fonte de íons. Esta pressão é controlada pelo fluxo de gás conduzido à fonte de íons e pela velocidade de bombeamento na câmara de vácuo. Se a pressão na câmara de descarga for reduzida, a descarga cessará. A figura 2 indica a corrente total de feixe em função do fluxo de gás de nitrogênio para duas condições de tensões de feixe. Da figura, sabe-se que o fluxo mínimo é de 2,3 sccm e o fluxo ótimo é considerado em torno de 2,5 sccm.

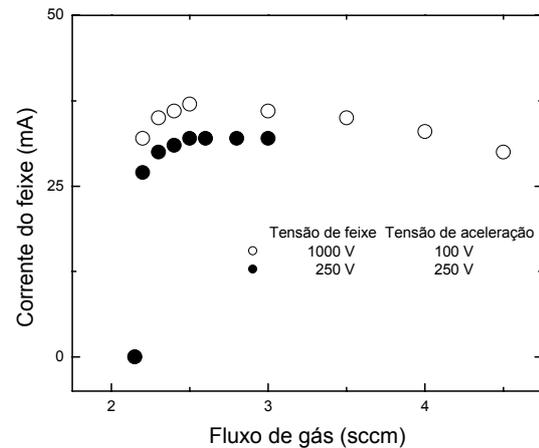


Figura 2 - Variação da corrente do feixe com o fluxo de gás nitrogênio.

### 2.3.2 LIMITE DE CARGA ESPACIAL DO CATODO

Os elétrons emitidos pelo catodo passam pelo plasma de descarga na maioria das condições de operação. Porém, em condições de pressão baixa e da tensão de descarga (aplicada ao anodo positivamente em relação ao catodo) baixa, a carga espacial dos elétrons próxima ao catodo tende a impedir elétrons adicionais de saírem do catodo e chegarem ao plasma de descarga [5]. Quando este fenômeno ocorre, o catodo estará operando na condição do limite de carga espacial. Foi observado que para a corrente de catodo acima de 3,6 A a fonte está operando nesse limite de carga espacial.

### 2.3.3 CONTRACORRENTE DE ELÉTRONS

Se os elétrons voltam ao plasma de descarga através da ótica geométrica de íons, a unidade de potência para a fonte de íons não conseguirá distinguir dos íons acelerados no feixe essa contracorrente de elétrons [5]. Variando a tensão de aceleração, porém, os dois podem ser distinguidos. A relação da corrente total de feixe em função da tensão de aceleração para três valores da tensão de feixe (250, 500 e 1000 V) indica que a tensão de aceleração acima de 100 V fica sem a contracorrente de elétrons.

### 2.3.4 CORRENTE DE ALVO

Os parâmetros de deposição mais importantes e fundamentais no método IBAD são a energia de íons relacionada à tensão de feixe e a *arrival rate ratio*,  $ARR(E/M)$ , definida como a razão do fluxo de partículas atômicas de gás de uma espécie E no feixe de íons incidente no substrato relativa ao fluxo de átomos evaporados de um material M transportados ao substrato [6]. A figura 3 mostra a densidade de corrente de íons determinada através da corrente medida pelo copo de Faraday em função da corrente de catodo para cinco valores da tensão de feixe: A densidade de corrente mínima obtida nesta figura é de  $0,047 \text{ mA/cm}^2$  para tensão de feixe de 250 V. Para  $ARR(N/M) = 1$ , a taxa de evaporação de índio é de  $0,11 \text{ nm/s}$ , suficientemente obtida pelo evaporador por feixe de elétrons.

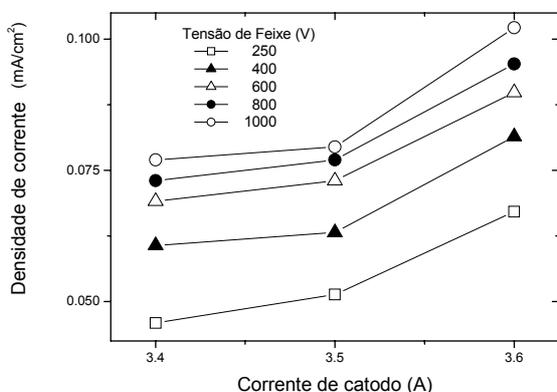


Figura 3 - Densidade de corrente de íons em função da corrente de catodo; fluxo de gás de 2,6 sccm e tensão de aceleração de 600V. As linhas cheias são para guiar os olhos.

### 3. EXEMPLOS DE DEPOSIÇÕES COM SISTEMA IBAD

Foram formados filmes depositados sobre os substrato de Si(111) mantidos em  $470^\circ\text{C}$  pela evaporação de índio metálico com a irradiação simultânea por feixe de íons de nitrogênio de 800 eV de energia. As espessuras dos filmes foram de 150 nm. As figuras 4 e 5 mostram os resultados obtidos pela técnica de difração de raios-X (XRD) para os filmes preparados com  $ARR(N/In) = 4,5$  e 6,4, respectivamente.

O favorecimento do crescimento de InN se dá através da escolha adequada de  $ARR(N/In)$ , que dentre os dois gráficos é de  $ARR(N/In) = 4,5$ , devido a uma melhor cristalinidade de InN em relação à de In.

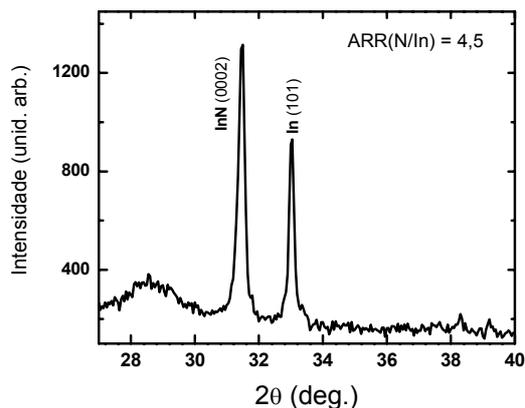


Figura 4 - XRD de filme de InN para  $ARR(N/In)$  de 4,5.

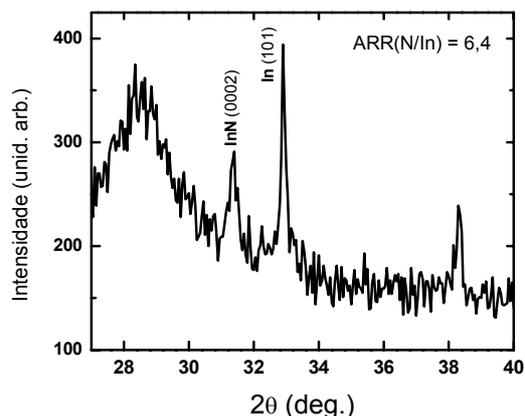


Figura 5 - XRD de filme de InN para  $ARR(N/In)$  de 6,4.

### 4. CONCLUSÃO

A fonte de íons e o evaporador por feixe de elétrons, que foram selecionados no presente trabalho, são adequados para a construção do sistema IBAD.

Observa-se que, para obter o bom desempenho da fonte durante a deposição, o fluxo de gás deverá ser em torno de 2,5 sccm, sendo a corrente de catodo abaixo de 3,6 A e a tensão de aceleração acima de 100V.

Foi verificado que as características dos filmes crescidos com o sistema IBAD são fortemente influenciadas pelos parâmetros de deposição, energia de íons e  $ARR(N/M)$ .

**AGRADECIMENTO**

Agradecemos a FAPESP pelo suporte financeiro.

**REFERÊNCIAS**

1. SMIDT, F.A., *International Materials Reviews* 35 (1990) 61.
2. OHRING, M., *Materials Science of Thin Films*, Academic Press, New Jersey, USA, 1992.
3. CUOMO, J.J.; ROSSNAGEL, S.M.; KAUFMAN, H.R., *Handbook of Ion Beam Processing Technology*, Noyes Publ., New Jersey, USA, 1989.
4. HIRVONEN, J.K., *Materials Science Reports* 6 (1991) 215.
5. KAUFMAN, J.K.; ROBINSON, R.S., *Operation of Broad-Beam Sources*, Commonwealth Scientific Corp., Colorado, USA, 1984.
6. MATSUOKA, M.; ISOTANI, S.; MITTANI, J.C.R.; CHUBACI, J.F.D.; OGATA, K.; KURATANI, N., *Journal of Vacuum Science and Technology A23* (2005) 137.