

## ESTUDO DA IMPLANTAÇÃO DE CROMO POR *RECOIL* EM SILÍCIO POR MEIO DE IMPLANTAÇÃO IÔNICA POR IMERSÃO EM PLASMA DE NITROGÊNIO

C.B. Mello<sup>1,2\*</sup>; M. Ueda<sup>1</sup>; A.F. Beloto<sup>2</sup>; J.O. Rossi<sup>1</sup>; B.L.D. Moreno<sup>2</sup>

<sup>1</sup> INPE, Laboratório Associado de Plasma, Av. dos Astronautas, 1758, 12227-010, São José dos Campos, SP

<sup>2</sup> INPE, Laboratório Associado de Sensores e Materiais, Av. dos Astronautas, 1758, 12227-010, São José dos Campos, SP

Recebido: 26 de Julho, 2006; Revisado: 07 de Dezembro, 2006

Palavras-chave: Implantação por *recoil*, implantação iônica por imersão em plasma, AES.

### RESUMO

A técnica de tratamento de superfícies de materiais conhecida por implantação iônica por imersão em plasma foi utilizada no estudo da implantação por *recoil* de átomos de cromo presentes na superfície do silício polido. O filme metálico foi depositado por evaporação e, em seguida, bombardeado por íons de nitrogênio visando à implantação dos átomos de cromo balisticamente. Simulações numéricas pelo método de Monte Carlo foram realizadas a fim de estimar o alcance médio dos íons e dos átomos implantados na matriz do silício. Análises de Rocking Curve e Espectroscopia de Elétrons Auger foram realizadas para a caracterização das amostras tratadas.

### ABSTRACT

The technique for surface treatment of materials known as Plasma Immersion Ion Implantation was used in the study of the recoil implantation of chromium atoms present in the surface of polished silicon. The metallic film was deposited by evaporation and then bombarded by nitrogen ions seeking chromium implantation ballistically. Numeric simulations based on Monte Carlo method were accomplished in order to estimate the ion range and recoil distributions of implanted atoms into silicon matrix. Rocking Curve and Auger Electron Spectroscopy analyses were used for the characterization of the treated samples.

### 1. INTRODUÇÃO

A Implantação iônica por imersão em plasma (IIIP ou 3IP) é uma técnica desenvolvida para melhorar as propriedades superficiais de materiais condutores, semicondutores e dielétricos [1], permitindo a implantação de íons tridimensionalmente, não importando o tamanho ou a geometria da peça. Os materiais sob bombardeamento iônico estão sujeitos a rearranjos atômicos significativos. Isso provoca a mistura dos átomos na interface de separação entre dois materiais diferentes, gerando contaminação das camadas [2]. Se este efeito, geralmente indesejado, é obtido propositalmente, este fenômeno é conhecido por implantação por *recoil*.

Com o objetivo de estudar a implantação de átomos metálicos por *recoil* em silício, filmes finos de cromo depositados por evaporação foram bombardeados por íons de nitrogênio pelo método 3IP. Normalmente, no processo de implantação por *recoil* são utilizados átomos pesados, mas nestes experimentos foram utilizados íons relativamente mais leves [3-5]. Simulações com o código SRIM [6] foram realizadas para estimar o alcance médio dos íons de nitrogênio e dos átomos de cromo dentro da matriz do silício.

### 2. PARTE EXPERIMENTAL

Amostras de silício polido tipo p, orientação (100), foram limpas e filme de cromo com espessuras de 20 nm, 30 nm e 40 nm foram depositados na superfície por evaporação em processo Electron Beam – Physical Vapor Deposition. Após a deposição, as amostras foram levadas à câmara 3IP (Figura 1) para tratamento nas condições relacionadas na Tabela A, variando a energia de implantação, a pressão de trabalho e o tempo de tratamento.

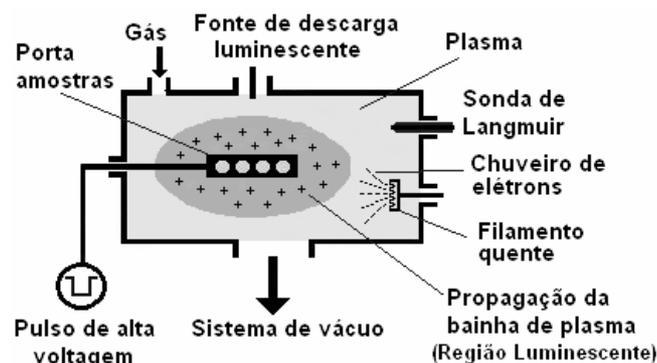


Figura 1 – Esquema da câmara de Implantação Iônica por Imersão em Plasma.

Foram feitas análises de *Rocking Curve* com sistema de Raios-X de Alta Resolução Phillips X'Pert MRD para avaliação do tensionamento da rede provocada pelo tratamento e Espectroscopia de Elétrons Auger no equipamento Fisons Instruments Surface Science, Microlab 310-F, para quantificar a profundidade alcançada pelas espécies implantadas.

\* carina@plasma inpe.br

Tabela A – Condições de tratamento

Amostra	Espessura do filme (nm)	Pressão de trabalho (mbar)	Amplitude do pulso (kV)	Largura do pulso (µs)	Frequência (Hz)	Tempo (min)
A1	20	$0,4 \times 10^{-2}$	40	1,5	100	60
A2	20	$1,0 \times 10^{-2}$	40	1,5	100	60
A3	20	$2,5 \times 10^{-2}$	40	1,5	100	60
B1	30	$7,0 \times 10^{-3}$	35	1,5	100	60
B2	30	$7,0 \times 10^{-3}$	44	1,5	100	60
C1	40	$1,2 \times 10^{-2}$	40	1,5	100	30
C2	40	$1,2 \times 10^{-2}$	40	1,5	100	150

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As simulações realizadas por meio do código SRIM mostraram que o aumento da energia de implantação provoca o aumento do alcance médio dos íons (Figura 2) e desloca o pico da distribuição de *recoil* para perto da interface de separação entre o filme e o substrato, como pode ser visto na Figura 3. As simulações mostraram também que, quanto maior a espessura do filme, maior será a energia mínima necessária para que os átomos de cromo que sofreram *recoil* no filme sejam implantados no silício.

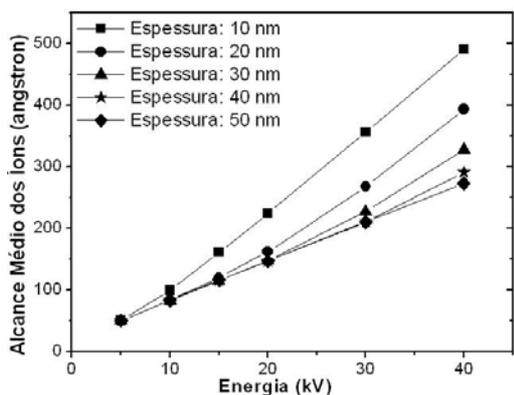


Figura 2 – Alcance médio dos íons N<sup>2+</sup> em Silício coberto por filme de Cromo (Simulação por SRIM).

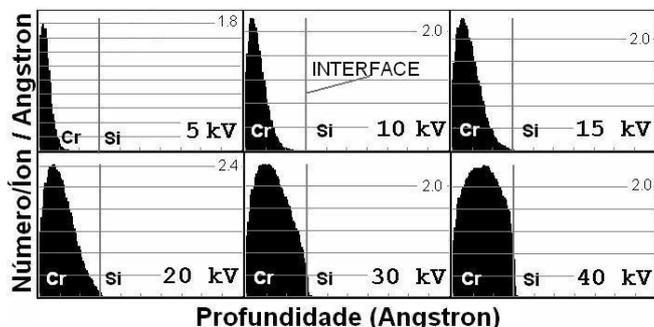


Figura 3 – Distribuição do número de átomos de Cromo que sofreram *recoil* durante a implantação (Simulação por SRIM).

A Figura 4 foi obtida pela simulação por SRIM e mostra o número de átomos que, a cada colisão com um íon, sofre *recoil*, para cada Angstrom de profundidade. É possível obser-

var que a maior parte dos átomos de cromo deslocados pelo choque com os íons incidentes permanece dentro do filme e poucos são implantados. O mesmo acontece com os átomos do substrato e formam, assim, uma estreita camada de mistura de átomos.

Nos tratamentos com variação da pressão de trabalho, a análise por *Rocking Curve* (Figura 5) mostrou uma maior distorção assimétrica do pico para pressões maiores. Isso significa que, com maior pressão, o número de partículas de gás no ambiente aumenta, levando à formação de um plasma mais denso e maior número de íons implantados. A distorção assimétrica à esquerda do pico da *Rocking Curve* representa o aumento do parâmetro de rede do silício após a implantação. Quanto mais íons implantados na rede, maior será o aumento do parâmetro de rede e maior será a distorção na curva. Os gráficos apresentam a intensidade normalizada do pico em função do ângulo de varredura  $\omega$ .

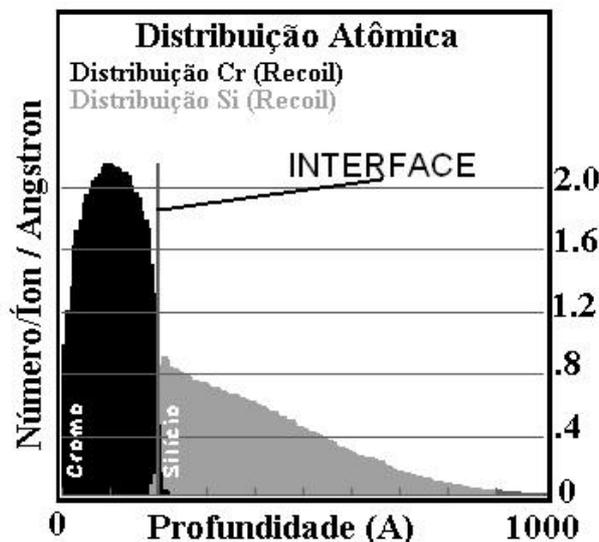


Figura 4 – Distribuição do número de átomos de Cr e Si que sofreram *recoil* durante a implantação com 40 kV (Simulação por SRIM).

O tratamento com variação de energia mostrou, a partir da análise por *Rocking Curve*, que o aumento da energia de implantação aumenta o número de íons implantados e de defeitos na rede do silício, provocando maior tensionamento e a distorção assimétrica do pico, como ilustrado na Figura 6. O tempo de tratamento é fator importante na implantação iônica e como pode ser visto na Figura 7, o aumento do

tempo de implantação resultou em maior distorção assimétrica do pico da *Rocking Curve*, significando maior quantidade de íons nitrogênio e átomos de cromo implantados nos interstícios da rede do silício. A Figura 8, obtida por Espectroscopia de Elétrons Auger, mostra o perfil de concentração dos elementos presentes nas amostras tratadas com variação de tempo de tratamento. É possível observar que, mesmo estando em profundidades similares, os átomos de cromo estão presentes em maior quantidade na amostra tratada por 150 minutos.

O tempo de tratamento é fator importante na implantação iônica e como pode ser visto na Figura 7, o aumento do tempo de implantação resultou em maior distorção assimétrica do pico da *Rocking Curve*, significando maior quantidade de íons nitrogênio e átomos de cromo implantados nos interstícios da rede do silício.

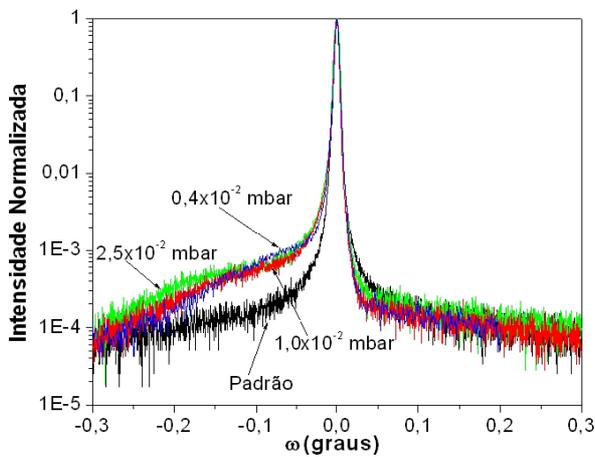


Figura 5 – *Rocking Curve* das amostras tratadas com variação da pressão de trabalho.

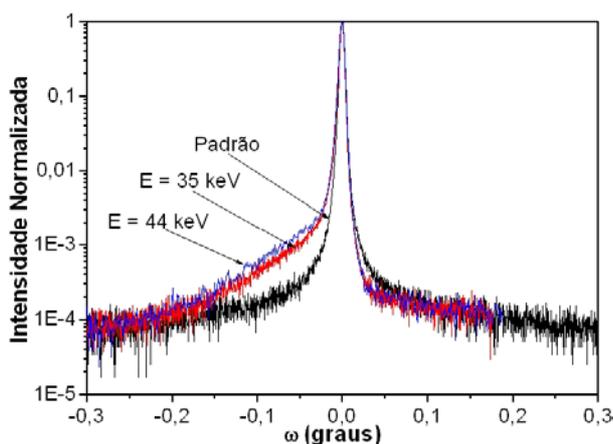


Figura 6 – *Rocking Curve* das amostras tratadas com variação da energia de implantação.

A Figura 8, obtida por Espectroscopia de Elétrons Auger, mostra o perfil de concentração dos elementos presentes nas amostras tratadas com variação de tempo de tratamento. É

possível observar que, mesmo estando em profundidades similares, os átomos de cromo estão presentes em maior quantidade na amostra tratada por 150 minutos.

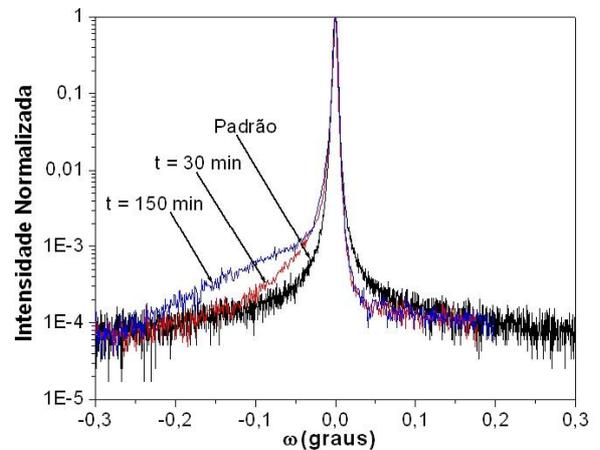


Figura 7 – *Rocking Curve* das amostras tratadas com variação do tempo de tratamento.

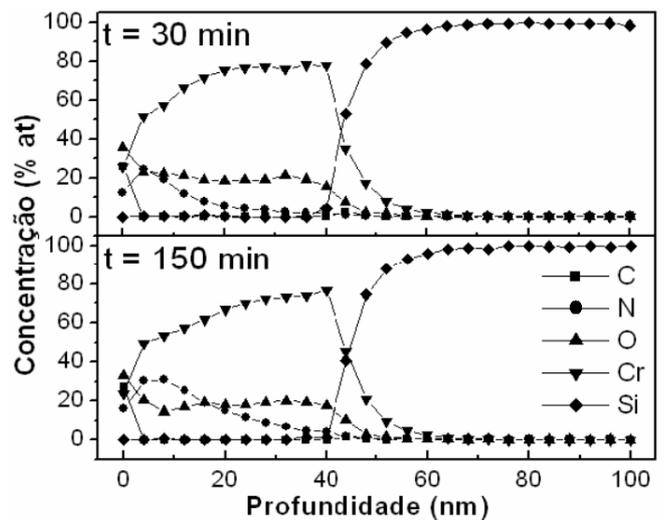


Figura 8 – Perfil de profundidade das espécies implantadas durante o tratamento com variação do tempo.

#### 4. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos nos experimentos realizados, pode-se concluir que o método de implantação por *recoil* via implantação iônica por imersão em plasma é possível e fornece bons resultados de implantação; a energia mínima necessária para implantar átomos de cromo por *recoil* deve ser bastante alta, acima de 30 kV, e aumentar com o aumento da espessura do filme; maior pressão de trabalho resulta na formação de um plasma mais denso e de implantação mais efetiva; maior tempo de tratamento resulta em maior número de íons e átomos metálicos implantados no substrato.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES pela Bolsa de Mestrado de C.B. Mello e ao Dr. Helfried Reuther pelas análises de AES.

## REFERÊNCIAS

1. CONRAD, J.R.; RADTKE, J.L.; DODD, R.A.; WORZALA, F.J.; TRAN, N.C., *Journal of Applied Physics* 62 (1987) 4591.
2. ANDERS, A., *Handbook of Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition*, Wiley-Interscience, New York, 2000.
3. GOMES, G.F.; UEDA, M.; REUTHER, H.; RICHTER, E.; BELOTO, A.F., *Surface and Coatings Technology* 196 (2005) 275-278.
4. GOMES, G.F.; UEDA, M.; REUTHER, H.; RICHTER, E.; BELOTO, A.F., *Brazilian Journal of Physics* 34 (2004) 1629-1631.
5. GOMES, G.F.; UEDA, M.; REUTHER, H.; RICHTER, E.; BELOTO, A.F., *Materials Research* 8 (2005) 387-389.
6. ZIEGLER, J.F.; BIRSACK, J.P.; LITTMARK, U., *The Stopping and Range of Ions in Matter*, Pergamon, New York, 1985.