

# EFEITOS DO CONFINAMENTO ELETROMAGNÉTICO DO PLASMA NO BOMBARDEAMENTO DO SUBSTRATO EM UM SISTEMA TRIODO MAGNETRON SPUTTERING

D.A. Duarte<sup>1</sup>; M.J. Cinelli<sup>1</sup>; J.C. Sagás<sup>2</sup>; L.C. Fontana<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>UDESC - CCT, Laboratório de Física de Plasmas, 89.223-100, Joinville, SC

<sup>2</sup>CTA - ITA, Laboratório de Plasmas e Processos, 12.228-900, São José dos Campos, SP

Recebido: 7 de janeiro, 2007; Revisado: 28 de junho, 2008

Palavras-chave: plasma, campo magnético, distância tela alvo.

## RESUMO

*Para estudar o confinamento do plasma em um sistema Triodo Magnetron Sputtering (TMS), o campo magnético central foi produzido por um conjunto de ímãs permanentes e uma bobina cilíndrica em torno dos ímãs centrais. Dessa forma torna-se possível a variação da intensidade do campo magnético com o sistema em operação. A variação da corrente no alvo e no substrato foram relacionadas com um parâmetro magnético (intensidade do campo magnético) e outro mecânico (distância tela alvo). Observa-se que o bombardeamento de íons e/ou elétrons no substrato pode ser controlado através desses parâmetros. Como essas variáveis são independentes, este sistema apresenta grande versatilidade para a deposição de filmes sobre substratos sensíveis ao bombardeamento de elétrons e/ou íons. Dessa forma, oferece diversas possibilidades para a deposição de filmes.*

## ABSTRACT

*In order to study the plasma confinement in a Triode Magnetron Sputtering system (TMS), the central magnetic field was produced by permanent magnets and a coil involving these magnets. As a result, it was possible to vary the magnetic field intensity while the system was in operation. Current variation in the target and in the substrate was related to two parameters: a magnetic (magnetic field intensity) and a mechanical (grid-target distance). Results indicate that ion and/or electron bombardment on the substrate can be controlled by these parameters. As these variables are independent, this system is very versatile with regard to film deposition on substrates sensitive to ion and/or electron bombardment. Given that, this system offers various possibilities for film deposition.*

## 1. INTRODUÇÃO

Em sistemas para deposição de filmes do tipo magnetron sputtering o plasma é confinado nas regiões próximas à superfície do alvo devido à presença de um campo magnético que aprisiona os elétrons, aumentando a taxa de ionização e resultando em uma alta taxa de deposição [1]. Muitas adaptações vêm sendo desenvolvidas, ao passar das

décadas, dentre eles o magnetron sputtering desbalanceado [2-5]. Nesse sistema, os fluxos magnético dos ímãs internos e externos são diferentes, permitindo uma maior concentração das linhas de campo no centro (tipo I) ou um “espalhamento” das linhas de campo em direção ao substrato (tipo II) [6]. Logo, os magnetrons desbalanceados do tipo II permitem um maior bombardeamento do substrato. Isto favorece a mobilidade dos átomos adsorvidos, aumentando densidade do filme que está sendo depositado, influenciando diretamente sua rugosidade e cristalinidade [7]. Para melhorar e controlar o confinamento do plasma nesses sistemas são utilizados eletroímãs internos e/ou externos ao reator, modificando a intensidade e a forma do campo magnético [2,8].

Por outro lado, o sistema Triodo Magnetron Sputtering (TMS) é uma variante do sistema Magnetron Sputtering Convencional (MSC) que tem se mostrado uma ferramenta eficiente e versátil para a deposição de filmes de vários elementos e ligas [1,10]. Este sistema difere do Magnetron Sputtering convencional pela introdução de uma grade aterrada (construída em aço inoxidável, que não afeta o comportamento espacial do campo magnético) entre o alvo e o substrato. Essa grade aprisiona os elétrons do plasma, alterando a distribuição espacial da descarga, que é confinada entre o alvo e a tela (que atua como o anodo da descarga). Dessa forma, o ajuste da distância tela-alvo permite variar de forma independente a voltagem e a corrente no alvo [11], além de permitir operar com tensões e pressões menores devido ao melhor confinamento do plasma. A operação em pressões menores aumenta o livre caminho médio dos átomos arrancados do alvo, que atingem o substrato com maior energia melhorando as propriedades dos filmes obtidos [1]. A baixa densidade do filme é um dos pontos fracos de sistemas MSC devido à baixa energia cinética das espécies que atingem o substrato, assim, um amplo número de magnetrons modificados, como plasma RF e feixe de íons têm sido utilizados para aumentar a densidade do filme e modificar outras propriedades por meio do aumento da densidade do plasma [12].

Neste trabalho foi utilizado o sistema TMS acrescentando-se uma bobina interna ao magnetron como mostra a Figura 1. O intuito é controlar o bombardeamento no substrato a partir da variação da distância tela-alvo (modificação do confinamento eletrostático) e da intensidade do campo magnético (confinamento magnético).

\* fontana@joinville.udesc.br

**2. MATERIAIS E MÉTODOS**

O magnetron foi construído em aço baixo carbono nitretado a plasma em uma atmosfera de 20% N<sub>2</sub> e 80% H<sub>2</sub> para evitar problemas com corrosão já que o aparato é resfriado à água. A armadilha possui diâmetro de 125,0 mm e altura de 60,0 mm com o imã externo orientado com polaridade N e o imã central orientado com polaridade S com mesma intensidade do campo magnético dos imãs externos, porém, como o número de imãs externos é maior, o fluxo externo é maior que o fluxo interno, conseqüentemente o magnetron é desbalanceado do tipo II [9]. Em torno do imã central foi colocada uma bobina com aproximadamente 310 espiras. Através de uma sonda Hall foram mapeadas as componentes, paralela e perpendicular, do campo magnético a uma altura de 6,0 mm do alvo de Al (pureza de 99,51%) com espessura de 3,1 mm. A corrente no alvo foi medida por um amperímetro (A<sub>1</sub>) colocado entre a fonte de tensão DC e o magnetron. O bombardeamento no substrato foi medido através de outro amperímetro (A<sub>2</sub>) colocado entre o substrato (isolado da câmara) e o terra. Inicialmente o sistema foi evacuado até a pressão base de 3·10<sup>-2</sup> mTorr (0,4·10<sup>-2</sup> Pa) (P<sub>2</sub> - Penning) e em seguida colocado o gás Ar (pureza de 99,99%) até a pressão de 3 mTorr (0,4 Pa) (P<sub>1</sub> - Baratron). A descarga foi mantida com tensão catódica constante de -600V, com uma distância de 60,0 mm entre o alvo e o substrato de aço inoxidável (diâmetro de 119,5 mm).

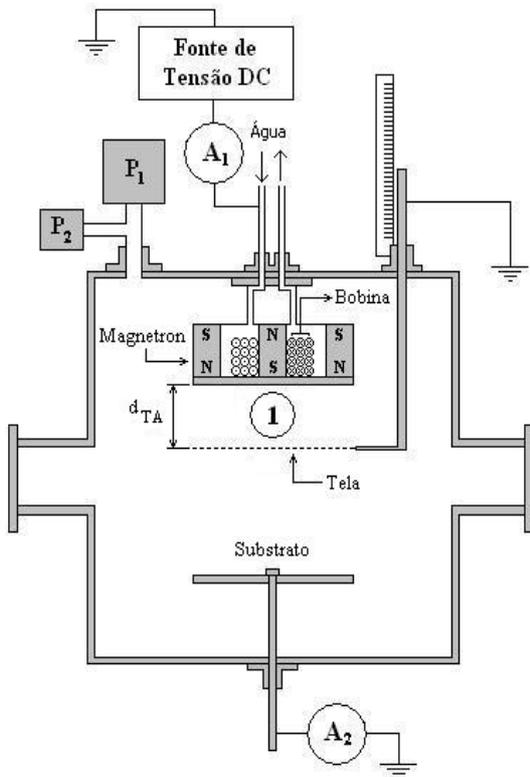


Figura 1 - Sistema Triodo Magnetron Sputtering (TMS).

A corrente na bobina foi variada de zero até 20,0A (usando uma fonte de corrente modelo EA-OS 3016-20 B) com a distância da tela variando entre 15,0 mm e 25,0 mm. As correntes fornecidas pelos amperímetros A<sub>1</sub> e A<sub>2</sub> foram obtidas simultaneamente. Foi relacionado a corrente no alvo (I<sub>A</sub>) e no substrato (I<sub>S</sub>) em função da corrente na bobina (I<sub>B</sub>) para diferentes distâncias tela-alvo (d<sub>TA</sub>). Na Figura 2 apresenta-se uma convenção para a direção e sentido do campo magnético. No sentido radial (do centro para borda do magnetron), paralelo ao alvo, o campo magnético é convencionado como positivo. Na direção perpendicular ao alvo, o campo é considerado positivo no sentido de afastamento deste e negativo no sentido de aproximação. Valores negativos da componente paralela são observados para R>R<sub>0</sub>, correspondente ao campo magnético na região externa à área de erosão do alvo (veja fig. 5), como considerado por Kadlec et al [13].

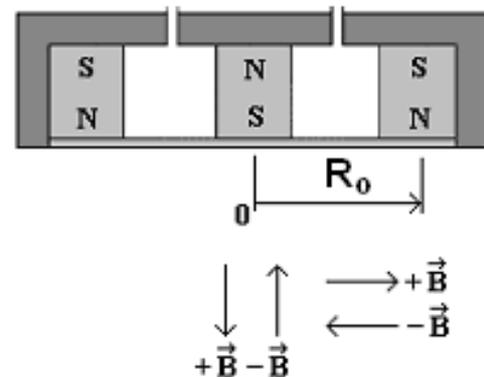


Figura 2 - Sistema de referência e convenção para a direção e sentido do campo magnético.

**3. DISCUSSÃO E RESULTADOS**

**3.1. Caracterização do Campo Magnético**

O campo magnético foi mapeado com uma sonda Hall onde foram medidas as componentes do campo magnético como mostra as Figuras 3 e 4 para I<sub>B</sub> = 0,0 A e I<sub>B</sub> = 15,0A em função da distância radial. A componente perpendicular do campo magnético é responsável por afastar o elétron do alvo, já que quando o campo elétrico é paralelo ao campo magnético as partículas carregadas são aceleradas e o passo da hélice aumenta continuamente. Assim, a região onde há o maior confinamento de elétrons são as regiões onde a componente perpendicular é próxima de zero, existindo unicamente a componente paralela ao alvo que aprisiona o elétron sem afastá-lo. Como resultado na região onde o campo magnético é paralelo ao alvo, o confinamento é mais eficiente, ocorrendo a maior taxa de sputtering que é a região representada nas Figuras 2 e 3 pelas linhas pontilhadas. Nota-se que ao variar a corrente elétrica na bobina essa região de maior erosão é deslocada em torno de 8,1 mm, de R = 10,8 mm (I<sub>B</sub> = 0,0 A) para R =

18,9 mm aproximadamente ( $I_B = 15,0A$ ). Isso permite ampliar a área de erosão do alvo.

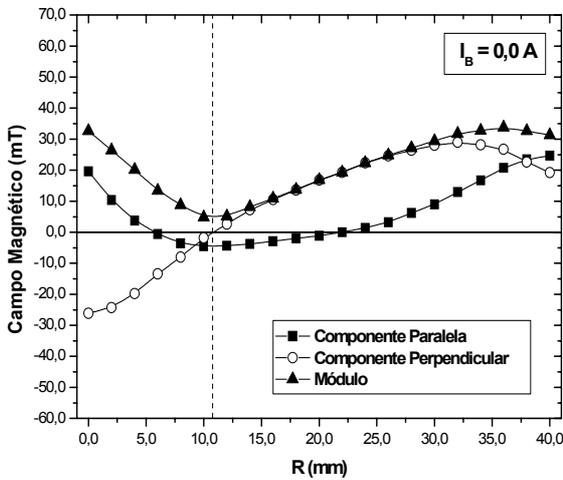


Figura 3 - Mapeamento do campo magnético com  $I_B=0,0A$ .

Valores negativos da componente paralela são observados quando a sonda Hall ultrapassa os ímãs externos, medindo a intensidade de campo que vem de fora da região do magnetron, como mostra Kadlec *et al* [13] e que pode ser observado na Figura 5.

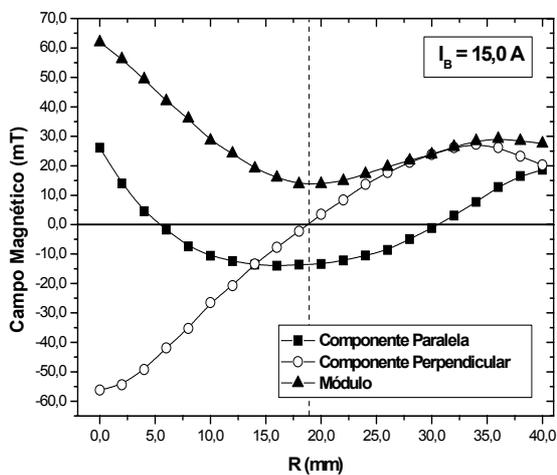


Figura 4 - Mapeamento do campo magnético com  $I_B = 15,0A$ .

### 3.2. Caracterização Elétrica da Descarga

Como a tela (aterrada) atua como o anodo da descarga, o plasma fica confinado entre a tela e o alvo (Figura 1 - Região 1). Quando a tela encontra-se próxima ao alvo, esta intercepta linhas de campo magnético, drenando elétrons da descarga, como ilustrado na Figura 5. Assim, o

confinamento do plasma pode ser controlado pela distância tela-alvo ( $d_{TA}$ ).

Na Figura 6 apresenta-se a dependência da corrente no alvo (amperímetro  $A_1$ ) em função da corrente na bobina para diferentes valores da distância tela-alvo. Com o aumento da intensidade do campo magnético o confinamento aumenta nas regiões próximas ao alvo que corresponde ao aumento da corrente elétrica ( $I_A$ ). Mantendo-se fixo um valor de  $I_B$  a corrente no alvo pode variar entre 0,1 e 0,5A dependendo da distância tela-alvo. Para todas os valores de  $d_{TA}$  a corrente no alvo permanece em um patamar constante quando  $I_B$  encontra-se entre valores 6,0 e 12,0 A.

Na Figura 7 mostra-se a corrente no substrato em função da corrente na bobina para diferentes valores da distância tela-alvo. Inicialmente, para  $I_B = 0,0 A$ , o campo magnético externo é mais intenso do que o campo magnético central formando a configuração das linhas apresentadas na Figura 5.

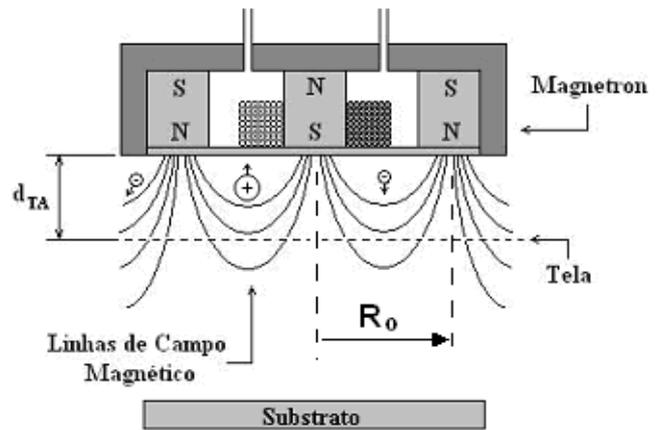


Figura 5 - Linhas de campo magnético com  $I_B = 0,0 A$ .

Quando a bobina é alimentada com corrente entre valores  $0,0A \leq I_B < 4,0A$  e a tela posicionada em  $d_{TA} = 25,0 mm$  e  $d_{TA} = 22,0 mm$ , a corrente líquida no substrato é negativa, ou seja, o bombardeamento é predominantemente eletrônico e atinge um valor máximo de aproximadamente  $-72,9 mA$  para um valor de corrente na bobina de  $I_B = 4,0A$ .

Isto sugere um maior direcionamento das linhas de campo para o substrato como mostra a Figura 8, característico de um sistema magnetron sputtering desbalanceado. A partir de  $I_B \geq 4,0A$  as linhas de campo externas tendem a fechar com o ímã central, direcionando menos elétrons ao substrato e, assim, aumentando o confinamento do plasma nas regiões próximas ao alvo. O substrato é bombardeado constantemente por espécies positivas e negativas (íons de Ar, Al e elétrons, neste caso). Inicialmente, com o plasma pouco confinado, o bombardeamento do alvo é predominantemente eletrônico. Aumentando-se a intensidade do campo magnético, os elétrons são confinados nas regiões próximas ao alvo (aumento da corrente no alvo - ver Figura 6) de forma que o bombardeamento eletrônico no substrato diminui.

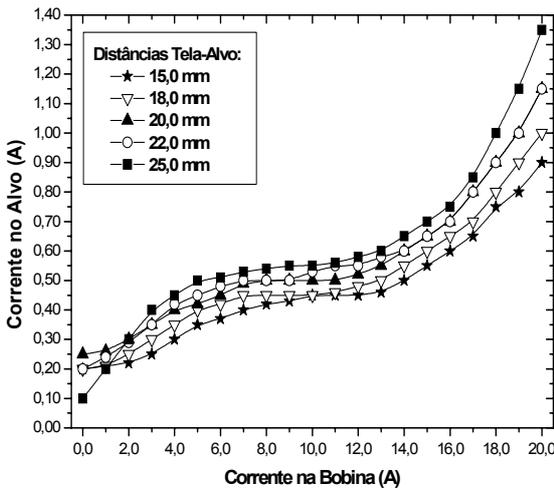


Figura 6 - Corrente no alvo em função da corrente na bobina e da distância tela-alvo.

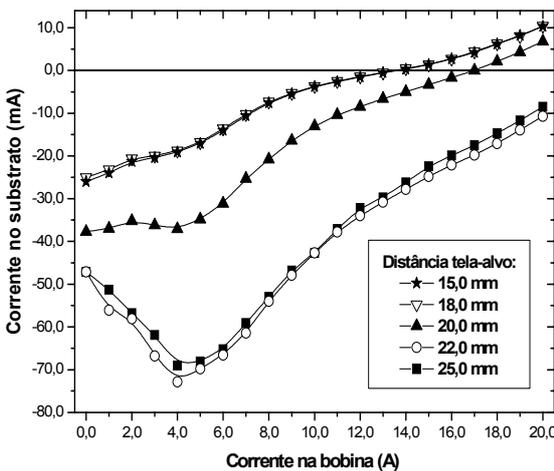


Figura 7 - Corrente no substrato em função da corrente na bobina e da distância tela-alvo.

Como os íons tem massa muito maior que os elétrons ( $m_i \gg m_e$ ), a força magnética não é suficiente para desviar sua trajetória e estes alcançam o substrato. Portanto, como o fluxo de elétrons diminui e o fluxo de íons se mantém, o bombardeamento passa de predominantemente eletrônico à predominantemente iônico com o aumento da intensidade do campo magnético central.

Aproximando-se ainda mais a tela do alvo, a corrente eletrônica no substrato torna-se cada vez menor devido à aproximação entre os eletrodos, diminuindo a eficiência da descarga, tal qual a Lei de Paschen [14] (e também porque a corrente da descarga diminui). Por outro lado, o incremento do campo magnético central, pelo aumento da corrente na bobina, também reduz o bombardeamento eletrônico no substrato em consequência do maior confinamento de

elétrons pelo campo magnético. O confinamento eletromagnético produzido pelo conjunto campo magnético e tela reduzem o bombardeamento eletrônico no substrato de maneira a manter predominantemente o bombardeamento iônico, como se observa na Figura 6 onde os valores de corrente no substrato tornam-se positivos.

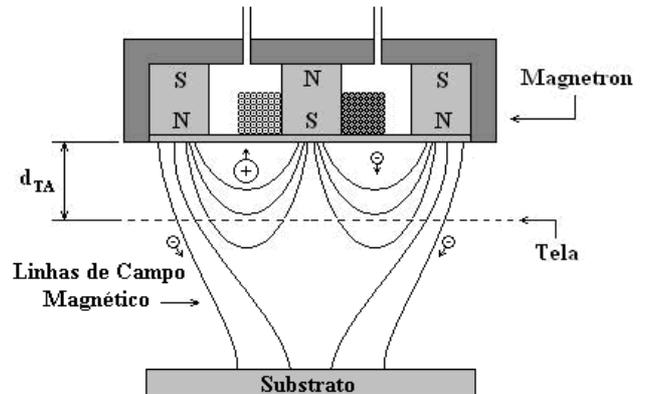


Figura 8 - Direcionamento das linhas de campo no substrato.

#### 4. CONCLUSÃO

A geração de campo magnético pela combinação de ímãs permanentes com uma bobina central, em sistemas Triodo Magnetron Sputtering, permite maior controle do confinamento do plasma pela flexibilidade na configuração do campo. Por outro lado a variação da distância tela-alvo é um parâmetro mecânico que também permite alterar o confinamento do plasma, de forma independente. Esse conjunto produz um confinamento eletromagnético do plasma que permite controlar o bombardeamento no substrato, durante a deposição de filmes, desde predominantemente eletrônico até predominantemente iônico, permitindo grande flexibilidade na escolha da forma de bombardeamento e, conseqüentemente, na taxa de transferência de energia (por íons e/ou elétrons energéticos) ao filme durante a deposição.

#### AGRADECIMENTOS

À Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC/CCT), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

#### REFERÊNCIAS

1. FONTANA, L.C.; MUZART, J.R.L., *Surface & Coatings Technology* 107 (1998) 24.
2. ENGSTRÖM, C.; BERLIND, T.; BIRCH, J.; HULTMAN, L.; IVANOV, I.P.; KIRPATRICK, S.R.; ROHDE, S., *Vacuum* 56 (2000) 107.

3. ZLATANOVIC, M.; BELOSEVAC, R.; KUNOSIC, A., *Surface & Coatings Technology* 90 (1997) 143.
4. ZONGXIM, M.; GUOQING, L.; DELIANG, C.; KAIYU, H.; CUI, L., *Surface & Coatings Technology* 193 (2005) 46.
5. MUSSCHOOT, J.; DEPLA, D.; HAEMERS, J.; GRYSE, R. D., *Plasma Sources Science and Technology* 17 (2008) 015010 (5pp).
6. SEO, S.H.; CHANG, H.Y., *Physics of Plasma* 11 (2004) 3595.
7. JUNG, M.J.; NAM, K.H.; SHAGINYAM, L.R.; HAN, J.G., *This Solid Films* 435 (2003) 145.
8. ZHANG, X.B.; XIAO, J.Q.; PEI, Z.L.; GONG, J.; SUN, C., *The Journal of Vacuum Science Technology A* 25 (2007) 209.
9. WINDOW, B.; SAVVIDES, N., *The Journal of Vacuum Science Technology* 6 (1985) 196.
10. FONTANA, L.C.; MUZART, J.R.L., *Surface & Coatings Technology* 114 (1999) 7.
11. SOETHE, V.L., *Deposição de filmes metálicos sobre Poli(Tereftalato Etileno) via Triodo Magnetron Sputtering: influência da corrente e da voltagem nas propriedades dos filmes*. Dissertação de Mestrado (2004), UDESC, Joinville (SC).
12. NAM, K.H.; JUNG, M.J.; HAN, J.G.; KOPTE, T.; HARTUNG, U.; PERTERS, C., *Vacuum* 75 (2004) 1.
13. KADLEC, S.; MUSIL, J., *The Journal of Vacuum Science Technology A* 13 (1995) 389.
14. E. NASSER, *Fundamentals of Gaseous Ionization and Plasma Electronics*, (New York) 1984.