Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo, v. 27, n. 4, 201-204, 2008. © 2008

GERAÇÃO DE UM JATO MONOATÔMICO NEUTRO ATRAVÉS DO PROCESSO DE ABLAÇÃO A LASER DE ALVOS COMPLEXOS PARA APLICAÇÕES EM SEPARAÇÃO ISOTÓPICA

J.B. de Matos[1,2*]; J.W. Neri[2]; C.A.B. da Silveira[2]; N.A.S. Rodrigues[2]
[1] *Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA-CTA, 12.228-900, São José dos Campos, SP, Brasil*
[2] *Instituto de Estudos Avançados, IEAv-CTA, 12.228-970, São José dos Campos, SP, Brasil*

Palavras-chave: ablação a laser, jato de plasma, separação de isótopos.

RESUMO

Este trabalho propõe a geração de um jato neutro de partículas de mesma espécie para futuras pesquisas de separação de isótopos. Esse estudo é motivado devido ao potencial interesse em aplicações de separação isotópica em diversas áreas como medicina, indústria, pesquisa científica. Primeiramente foi realizada uma análise dos parâmetros macroscópicos do plasma (temperatura e densidade de elétrons, densidade de íons e velocidade da pluma). Este diagnóstico se faz necessário no estudo do comportamento do jato de plasma para que sejam aplicados campos eletromagnéticos para separação das partículas ionizadas da neutras.

ABSTRACT

This work suggests the neutral jet generation of particles of same specie for future research in isotope separation. The motivation of this study is due potential interesting in isotopic separation application in many different areas, such as, medicine, industry, scientific research. Firstly macroscopic properties (electron temperature and density, ion density and plume velocity) were performed. This diagnostic was necessary on plasma behaviour study to separate ionized from neutral particles applying electromagnetic fields.

1. INTRODUÇÃO

A remoção de material de um alvo sólido pelo processo de ablação foi uma das primeiras aplicações da ferramenta laser desde sua invenção na década de 60. Este mecanismo é obtido através da iluminação da superfície do alvo sólido por pulsos de laser, onde estão presentes o aquecimento, a fusão, a evaporação térmica até a formação de plasma. Na Figura 1 observam-se os efeitos físicos em função da irradiância e do tempo de exposição de um feixe de laser na superfície de um alvo.

Há uma grande diversidade de aplicações onde está presente o processo de ablação a laser: deposição de filmes finos [1], processamento de materiais [2] (corte, solda, perfuração), produção de nanopartículas e clusters [3], espectroscopia [4]. Outros estudos e aplicações de ablação a laser podem ser encontrados em medicina, micro-usinagem, área militar e lasers de raio-X [5].

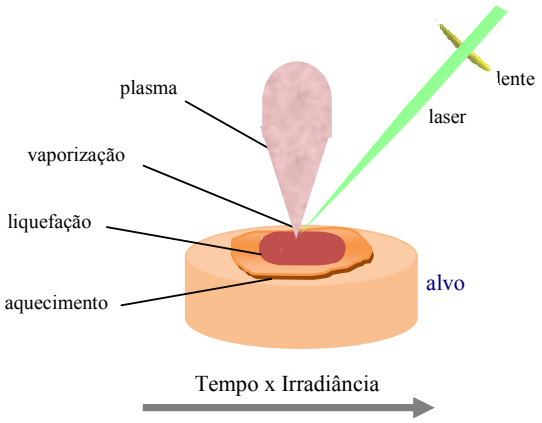

Figura 1- Processos físicos que ocorrem durante a ablação.

A primeira etapa deste trabalho foi produzir um jato de plasma por ablação a laser de vapor de cobre, entender o seu comportamento ao longo de sua expansão, utilizando uma sonda eletrostática para a caracterização de suas propriedades macroscópicas: *Te* (temperatura de elétrons), *ne* (densidade de elétrons), *ni* (densidade de íons), e *V* (velocidade do jato de plasma). Posteriormente serão aplicados campos eletromagnéticos separando as partículas ionizadas das partículas neutras. Existe um grande interesse em tornar o jato de plasma em um jato neutro para estudos de separação de isótopos utilizando técnicas de fotoionização seletiva. Propõe-se a utilização de alvos compostos de diferentes elementos (alvos de terras raras) visando aplicações para fabricação de dispositivos ópticos e produção de material para o meio ativo de lasers.

2. ABLAÇÃO A LASER

Quando o feixe de laser é focalizado sobre um metal, parte da energia do pulso é absorvida pelos elétrons livres contidos em sua superfície, e devido a colisões com a matriz, tendem a perder energia para o interior da amostra. Se a dimensão da área iluminada pelo feixe de laser na superfície da amostra for muito maior que o comprimento de difusão térmica, dado por $L_D = (4\ k\ \tau)^{1/2}$, utiliza-se o modelo de um

* juliana@ieav.cta.br

sólido semi-infinito [6] sendo aquecido em toda a superfície. Tomando o tempo de pulso do laser de vapor de cobre τ = 40 ns, e a difusividade térmica do alvo de alumínio k = 1,03, o L_D é de 4 μm, ou seja, muito menor quando comparado ao diâmetro da área iluminada pelo feixe de laser (da ordem de 170 μm). Como a absorção de calor ocorre apenas na superfície, a equação de calor em uma só dimensão pode ser solucionada por:

$$T(z,t) = \frac{2 \cdot \alpha \cdot I}{K} \cdot \sqrt{(\kappa \cdot t)} \cdot ierfc\left(\frac{z}{L_D}\right)$$

onde,

$$ierfc(z) = \int_z^{\infty} erfc(s)ds \text{ , } erfc(z) = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \int_z^{\infty} e^{-s^2} ds$$

$$erfc(z) = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \int_z^{\infty} e^{-s^2} ds$$

onde: L_D fornece a profundidade de penetração de calor na amostra durante o intervalo de duração do pulso de laser (τ); k e K são respectivamente a difusividade e condutividade térmica; I é a intensidade do feixe de laser; α é o coeficiente de absorção e z é a profundidade na amostra.

A eficiência do processo de ablação é diretamente dependente das propriedades do feixe de laser (duração do pulso, taxa de repetição, energia, comprimento de onda e perfil espacial de energia) como também das propriedades do material (ópticas e físicas) e das condições do meio (gás, pressão de fundo) onde acontece a interação [5]. Na Tabela 1 encontram-se as principais características do laser de vapor de cobre utilizado de geração de plasma [7].

Tabela 1 - Parâmetros do laser de vapor de cobre (LVC)

Características LVC	Valores
comprimento de onda	511-578 (nm)
largura do pulso	40 (ns)
energia por pulso	2 (mJ)
taxa de repetição	5 (kHz)
potência de pico	40 (kW)
potência média	8 (W)
densidade de potência	90 (MW/cm^2)

3. APARATO EXPERIMENTAL

As Figuras 2 e 3 apresentam o diagrama e a imagem do sistema experimental empregado para a geração e a caracterização do jato de plasma. O laser de vapor de cobre foi focalizado a 45° com relação a superfície do alvo metálico com uma lente de distância focal de 30 cm. Dentro da câmara de evaporação, com pressão de trabalho de 10^{-6} mbar, o alvo foi colocado sobre um porta amostra acoplado a um passador de rotação que girava a 50 rpm, com finalidade de evitar processos indesejáveis na geração de vapor. Foi observado que quando o laser atinge várias vezes a mesma posição no alvo, forma uma cavidade cônica, e nessas circunstâncias, a ionização ocorre no interior da cavidade, modificando as condições de contorno na formação do plasma (devido a existência de paredes laterais).

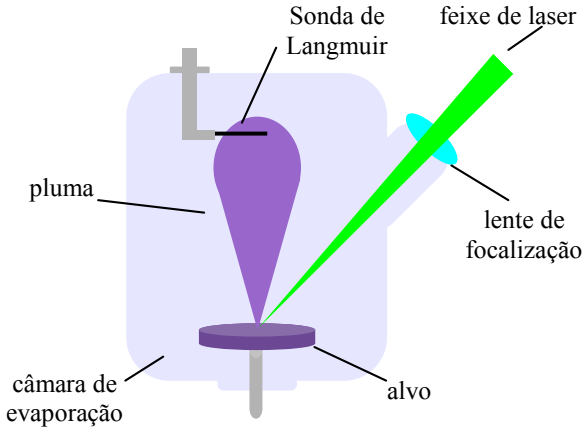

Figura 2 - Diagrama experimental empregado para geração de uma jato de plasma e sua caracterização.

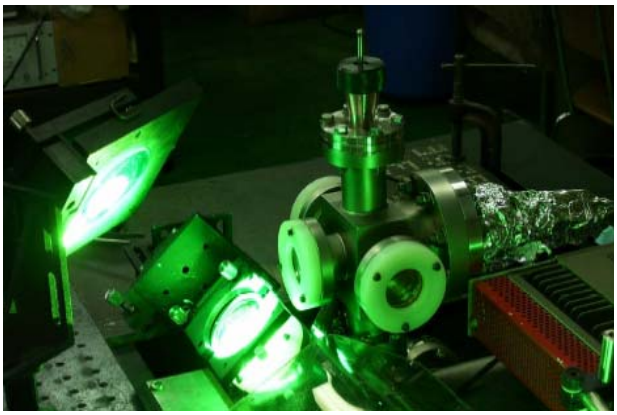

Figura 3 - Imagem da câmara de evaporação utilizada nos experimentos de ablação a laser.

Os primeiros estudos de sonda eletrostática imersa em um plasma foram desenvolvidos por Irving Langmuir [8], em 1924. Embora seja uma técnica bastante atrativa para caracterização de plasmas estáticos ou em expansão, uma vez que a implementação e o arranjo experimental são simples, os processos físicos e químicos não o são.

Uma sonda de Langmuir com dimensões de 10 mm de comprimento por 250 μm de diâmetro foi imersa no jato de plasma com polarizações que variavam de -300V a 300V. A coleta de partículas negativas era obtida quando a sonda era polarizada com tensões positivas, gerando uma corrente eletrônica. Do mesmo modo, uma corrente iônica era gerada

quando a tensão aplicada à sonda era negativa. A Figura 4 apresenta as curvas de sinal de corrente coletadas pela sonda de Langmuir em função do tempo de aquisição

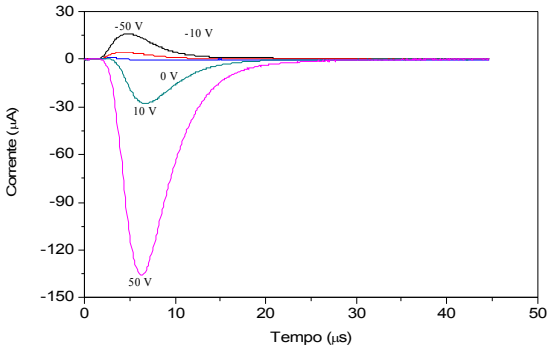

Figura 4 - Evolução temporal das curvas de corrente em função da tensão de polarização aplicada à sonda.

A partir dessas curvas de corrente versus a tensão aplicada à sonda obtém-se a curva característica de Langmuir, mostrada na Figura 5, que possibilita inferir os parâmetros de interesse do jato de plasma.

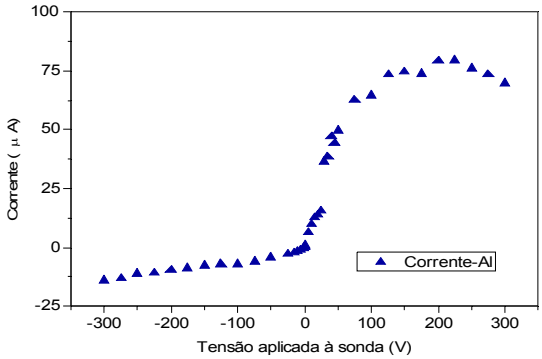

Figura 5 – Curva característica de Langmuir.

A teoria baseada em análise de sonda de Langmuir atribui a informação de densidade de íons ao plateau onde as tensões são negativas. A inclinação da curva característica de Langmuir (em escala logarítmica) onde na vizinhança a tensão é quase nula, obtém-se informação sobre a temperatura de elétrons. Esta informação de temperatura eletrônica é necessária juntamente ao plateau onde as tensões são positivas para o cálculo de densidade de elétrons [9]. A análise da velocidade do jato de plasma foi inferida pelo método de tempo-de-vôo (TOF).

4. ALVOS EVAPORADOS

Os alvos de interesse desta primeira etapa do trabalho são amostras metálicas de alumínio, cobre e tungstênio [10]. Essas amostras foram escolhidas por apresentarem diferentes propriedades físicas e químicas entre si. Isso permitiu analisar a interação do feixe de laser de vapor de cobre em alvos com distintos valores de coeficiente de absorção, difusividade térmica, densidade, potencial de ionização, entre outros parâmetros.

Todas as amostras foram cortadas manualmente, de forma circular, com um diâmetro médio de 20x1 mm de espessura, para serem inseridas na câmara de evaporação, sobre o porta mostra. Antes de serem colocadas na câmara de evaporação, todas as amostras passaram por processos de polimento (lixa d'água nº 600) e de imersão em solventes (acetona e ácido nítrico à 10% de concentração), a fim de diminuir a quantidade de impurezas existentes na superfície. Após a incidência de pulsos de laser na superfície das amostras, foram observadas trilhas que indicam a o local da ejeção de material por ablação, como é mostrado na Figura 6 para amostra de cobre.

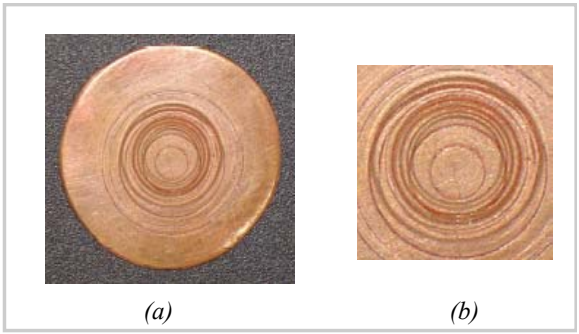

Figura 6 – Em (a) temos o alvo de cobre com dimensões de 22mm x 1mm. Em (b) as trilhas no alvo são causados pela ejeção de material da superfície pelo processo de ablação a laser.

5. RESULTADOS

Diagnosticar os parâmetros do jato de plasma é de interesse na primeira etapa deste projeto para a futura geração de um jato neutro. Os jatos de plasmas de alumínio, cobre e tungstênio gerados pelo processo de ablação a laser de vapor de cobre e caracterizados via sonda de Langmuir possuem os seguintes resultados:

- ► Temperatura de elétrons = 10 eV
- ► Densidade de elétrons = 10^8 - 10^9/cm^3
- ► Densidade de íons = 10^9 - 10^{10}/cm^3
- ► Velocidade do jato de plasma = 10 km/s

Os resultados estão registrados detalhadamente na ref. [10] em função do tempo, intensidade do feixe de laser e distância do alvo à sonda.

A análise desses dados se baseou na teoria de sonda de Langmuir para plasmas em expansão juntamente com o modelo de expansão hidrodinâmico estabelecidos nas ref. [11-13].

Esses resultados são coerentes com a literatura [11-17] apesar das densidades entre íons e elétrons serem distintas [18].

Diagnosticado os parâmetros do jato de plasma, pode-se a partir de agora, aplicar campos eletromagnéticos para a separação das partículas carregadas das neutras. O objetivo final é confirmar a neutralidade do jato resultante, utilizando técnicas de espectroscopia a laser.

AGRADECIMENTOS

A autora agradece à CAPES e ao CNPq pela concessão de bolsas de pós-graduação e ao IEAv pela infra-estrutura cedida.

REFERÊNCIAS

1. PRONKO, P.P.; VANROMPAY, P.A.; ZANGH, Z.; NEES, J.A., *Phys. Rev. Letters* 83 (1999) 2596-2598.
2. CHARSCHAN, S.S., *Guide to Laser Material Processing*, Laser Institute of America, Orlando (USA), 1993.
3. TILLACK, M.S.; BLAIR, D.W.; HARILAL, S.S., *Nanotechnology* 15 (2004) 390-403.
4. HARILAL, S.S.; O'SHAY, B.; TILLACK, M.S., *Journal of Appl. Phys.* 98 (2005) 013306.
5. RUSSO, R.E.; MAO, X.L.; LIU, C.; GONZALES, J., *J. Anal. At. Spectrom.,* 19 (2004) 1084-1089.
6. DULEY, W.W. CO_2 *Lasers: Effects and Applications*, Academic Press, New York (USA), 1976.
7. RIVA, R.; WATANUKI, J.T.; CHRIST, B.; SCHWAB, C.; RODRIGUES, N.A.S., *Revista de Física Aplicada e Instrumentação* 12 (1997) 119-125.
8. HUDDLESTONE, R.H.; LEONARD, S.L., *Plasma Diagnostic Techniques*, Academic Press, New York (USA), 1965.
9. RODRIGUES, N.A.S.; MATTOS, J.B.; GIÃO, M.A.P.; TARELHO, L.V., *Laser Ablation as a Tool for Elemental and Isotopic Separation: a Prospective Study.* In: Proceedings of the 9th Workshop on Separation Phenomena in Liquids and Gases, Beijing (China), 2006.
10. MATOS, J.B. *Caracterização do Jato de Plasma Gerado pelo Processo de Ablação a Laser de Vapor de Cobre*. Dissertação (Mestrado em Física), ITA, São José dos Campos (SP). 2007.
11. TOFTMANN, B.; SCHOU, J.; HANSEN, T.N.; LUNNEY, J.G., *Phys. Rev. Letters* 84 (2000) 3998-4001.
12. SEGALL, S.B., KOOPMAN, D.W., *Physics of Fluids* 16 (1973) 1149-1156..
13. KOOPMAN, D.W., *Physics of Fluids* 14 (1971) 1707-1716.
14. HAFEZ, M.; KHEDR, M.; ELAKSHER, F.; GAMAL,Y., *Plasma Source Sci. Technol.* 12 (2003) 185-198.
15. KOOLS, J.C.S.; BALLER, T.S.; ZWART, S.T.;. DIELEMAN, J., *J. Appl. Phys.* 71 (1992) 4547–4556.
16. PAPPAS, D.; SAENGER, K.; CUOMO, J.; DREYFUS, R , *J. Appl. Phys.* 72 (1992) 1197-1199.
17. MANNION, P.T.; FAVRE, S.; O'CONNOR, G.; DOGGETT, B.; LUNNEY, J.G.; GLYNN, T.J., *Proc. SPIE 5827* 457-466 (2005).
18. ZANGH, Z.; VANROMPAY, P.A.; NEES, J.A.; PRONKO, P.P., *J. Appl. Phys.* 92 (2002) 2867-2874.