



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

**INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS**

INPE -- 4938.



PALAVRAS CHAVES/KEY WORDS

AUTORES  
AUTHORS

Íons de hidrogênio Plasma com íons negativos  
Íons negativos Descarga termiônica

AUTORIZADO POR/AUTHORIZED BY

*Gerson Otto Ludwig*  
Gerson Otto Ludwig  
Chefe do LAP

AUTOR RESPONSÁVEL  
RESPONSIBLE AUTHOR

*José Leonardo Ferreira*  
José Leonardo Ferreira

DISTRIBUIÇÃO/DISTRIBUTION

INTERNA / INTERNAL  
 EXTERNA / EXTERNAL  
 RESTRITA / RESTRICTED

REVISADO POR / REVISED BY

*Renato Sérgio Dallaqua*  
Renato Sérgio Dallaqua

CDU/UDC

533.9:537.7

DATA / DATE

31.07.89

PUBLICAÇÃO Nº  
PUBLICATION NO

INPE-4938-PRE/1428

TÍTULO/TITLE

ESTUDO EXPERIMENTAL DE FORMAÇÃO DE ÍONS  
NEGATIVOS DE HIDROGÊNIO NA MÁQUINA DE PLASMA  
QUIESCENTE DO INPE

AUTORES/AUTHORSHIP

José Leonardo Ferreira  
Júlio Guimarães Ferreira  
Wills Clemente Damásio

ORIGEM  
ORIGIN

LAP

PROJETO  
PROJECT

PQUI

Nº DE PAG.  
NO OF PAGES

05

ÚLTIMA PAG.  
LAST PAGE

04

VERSÃO  
VERSION

Nº DE MAPAS  
NO OF MAPS

RESUMO - NOTAS / ABSTRACT - NOTES

Neste trabalho são mostrados os resultados preliminares do estudo de geração de íons positivos e negativos de hidrogênio em um plasma produzido por uma descarga termiônica confinada superficialmente por campos magnéticos. No interior desta descarga foi inserida uma sonda eletroscópica de Langmuir para medir as concentrações de  $H^-$ ,  $H^+$ ,  $H_2^+$  e  $H_2^{+2}$  em um plasma formado a partir da mistura dos gases argônio (Ar) e hidrogênio ( $H_2$ ). Este método de medida das concentrações das diversas espécies de íons poderá ser aplicado para controle da produção de íons positivos e negativos de H nestas descargas.

OBSERVAÇÕES / REMARKS

Trabalho apresentado no X CBRAVIC, 24 a 26 de julho de 1989, ITA(CTA), São José dos Campos, SP.

# ESTUDO EXPERIMENTAL DE FORMAÇÃO DE IONS NEGATIVOS DE HIDROGÊNIO NA MÁQUINA DE PLASMA QUIESCENTE DO INPE

José Leonardo Ferreira, Júlio Guimarães Ferreira e Wills Clemente Damásio

Laboratório Associado de Plasmas - LAP  
Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE

Neste trabalho são mostrados os resultados preliminares do estudo de geração de íons positivos e negativos de hidrogênio em um plasma produzido por uma descarga termiônica confinada superficialmente por campos multidipolo magnéticos. No interior desta descarga foi inserida uma sonda eletroscópica de Langmuir para medir as concentrações de  $H^-$ ,  $H^+$ ,  $H_2^+$  e  $H_2^+$  em um plasma formado a partir da mistura dos gases argônio (Ar) e hidrogênio ( $H_2$ ). Este método de medida das concentrações das diversas espécies de íons poderá ser aplicado para controle da produção de íons positivos e negativos de H nestas descargas.

## 1 - INTRODUÇÃO

A máquina de plasma quiescente (PQUI) do INPE vem sendo utilizada desde 1981 para estudo de plasmas formados por várias espécies de íons negativos e positivos<sup>(4)</sup>. A maneira pela qual o plasma é gerado nesta máquina tem atraído atualmente a atenção de diversos campos da física de plasmas voltados à tecnologia<sup>(2)</sup>. A descarga termiônica com confinamento magnético multidipolar é hoje utilizada para produzir feixes de íons com aplicações na propulsão espacial (propulsor iônico), no tratamento de superfícies (implantação iônica) e no aquecimento de plasmas termonucleares (injeção de partículas neutras).

O maior interesse na produção de íons negativos de hidrogênio está na sua utilização em fontes de íons para injetores de partículas neutras<sup>(3)</sup>. A produção de um feixe de partículas neutras, suficientemente energético para elevar a temperatura do plasma até a fusão termonuclear autosustentada, é fortemente influenciada pela eficiência de neutralização do feixe de íons. O gráfico da fig. 1 mostra que para energias acima de 100keV a eficiência de neutralização para íons positivos (especialmente  $H^+$  e  $D^+$ ) sofre um grande decréscimo, enquanto que para os íons de  $H^-$  permanece quase constante.

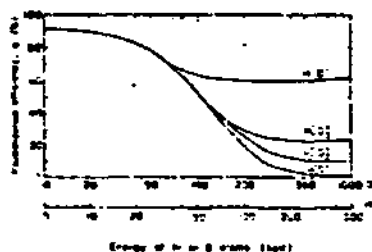


Fig. 1 Eficiência de neutralização em função da energia da partícula, onde  $n$  = potência de saída dos átomos neutros/potência de entrada do feixe de íons no neutralizador.

FONTE: Kunkel, W.B. (1981).

O objetivo deste trabalho é mostrar que uma quantidade apreciável de íons negativos de hidrogênio pode ser gerada na máquina PQUI. Também é mostrada a possibilidade de se usar sondas eletrostáticas e medidores de pressão por ionização para estimar as concentrações dos diversos íons de H formados na descarga. O método de obtenção destas concentrações foi utilizado com sucesso no estudo de propagação de sólitons de rarefação em plasma com íons negativos, realizado também na PQUI<sup>(4)</sup>.

## 2 - DESCRIÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL

Este experimento está sendo realizado em uma máquina de plasma quiescente formada por duas câmaras cilíndricas de aço inox (304L) isoladas eletricamente, podendo formar dois plasmas independentes separados por uma cerca magnética ajustável (fig. 2).

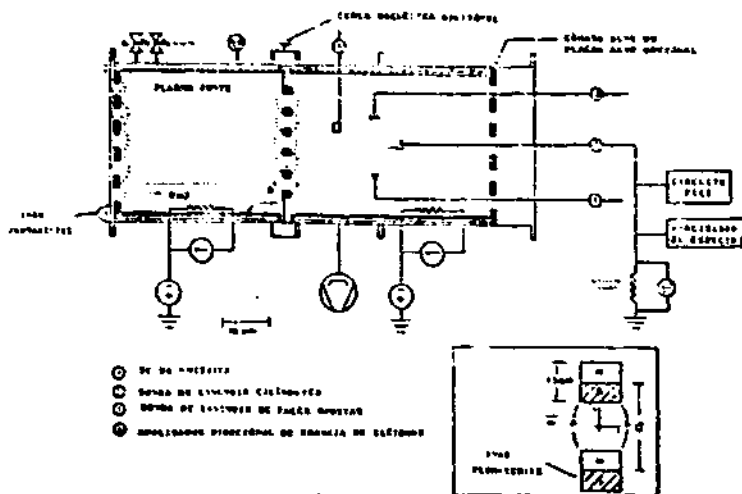


Fig. 2 Esquema da máquina de plasma multidipolo magnético. A figura mostra as duas câmaras para plasma e um detalhe da cerca magnética ajustável.

Neste experimento em particular utiliza-se somente o plasma fonte, pois nosso interesse é o de usá-lo como fonte de íons negativos. A cerca magnética funciona como um "filtro" de partículas carregadas, deixando passar apenas as de maior massa. Verifica-se no entanto, que devido a interação dos elétrons da parte "fria" da função de distribuição de energia com campos elétricos de ondas turbulentas na região da cerca magnética, alguns destes elétrons conseguem escapar da barreira magnética<sup>(5)</sup>, e migrar para a câmara alvo.

A descarga no plasma fonte é feita a partir do efeito termiônico produzido pela passagem de corrente por um filamento de tungstênio (W) ( $D=1,0\text{mm}$  e  $L=10\text{cm}$ ) coberto com uma camada de BaO para aumentar a emissão de elétrons. Este filamento é polarizado negativamente com relação às paredes da câmara de vácuo com uma tensão de  $-40\text{V}$  e a corrente de descarga para uma pressão de Ar de  $5,0 \times 10^{-6}\text{mbar}$  é da ordem de  $1,0\text{A}$ . Nestas condições um plasma com densidade eletrônica ( $n_e$ ) da ordem de  $10^{19}\text{part/cm}^3$  com uma temperatura de elétrons e íons igual a  $1,7\text{eV}$  e  $0,1\text{eV}$ , respectivamente, é gerado. O hidrogênio é introduzido no sistema até uma pressão máxima de  $8,0 \times 10^{-6}\text{mbar}$  (para não danificar o medidor de pressão por ionização) e observa-se que a densidade eletrônica diminui à medida que a pressão de hidrogênio aumenta.

Os parâmetros do plasma são medidos com uma sonda eletrostática de Langmuir de geometria cilíndrica constituída por um eletrodo de W com  $D=0,1\text{mm}$  e  $L=4\text{mm}$  instalada no centro do plasma fonte.

O restante dos diagnósticos na fig. 2 são utilizados para monitorar as características das partículas que conseguem escapar do confinamento magnético superficial ( $B \approx 200\text{ Gauss}$ ).

As pressões de gases são monitoradas

por um medidor da Leybold (Ionivac IM210D). O sistema de vácuo com uma bomba difusora de  $280\text{l/s}$  e uma mecânica de  $12\text{m}^3/\text{h}$  é capaz de atingir pressões de fundo de  $5,0 \times 10^{-7}\text{mbar}$  e uma pressão de base de  $9,0 \times 10^{-7}\text{mbar}$ . O fato das paredes do sistema de vácuo serem cobertas por barras de ímãs permanentes de ferrita aumenta o tempo necessário para atingir estas pressões ( $\sim 7$  dias).

### 3 - RESULTADOS DO EXPERIMENTO

Para medir as concentrações dos íons negativos de hidrogênio nesta descarga foram utilizadas as medidas de corrente de saturação de elétrons e íons da sonda eletrostática de Langmuir inserida no interior da descarga.

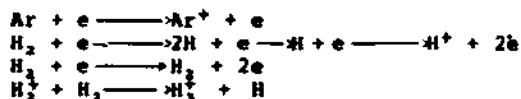
O experimento tem início com um plasma de Ar a uma pressão de gás neutro de  $5,0 \times 10^{-6}\text{mbar}$ . O hidrogênio molecular ( $\text{H}_2$ ) é introduzido através de uma válvula a qual se controle fino e o acréscimo na pressão é detetado pelo medidor de vácuo. À medida que o  $\text{H}_2$  é introduzido, a corrente de saturação de elétrons ( $I_{es}$ ) diminui (Tab.1) e a corrente de saturação de íons ( $I_{is}$ ) aumenta. A razão pela qual isto ocorre deve-se à contribuição de partículas de menor massa no caso de  $I_{is}$  e de partículas de maior massa no caso de  $I_{es}$ . De fato, baseando-se em medidas realizadas com espectrômetro de massa de setor magnético<sup>(6)</sup> íons positivos ( $\text{H}^+$ ,  $\text{H}_2^+$  e  $\text{H}_3^+$ ) e íons negativos ( $\text{H}^-$ ) são formados em proporções semelhantes neste tipo de descarga. É importante ressaltar que a presença inicial do plasma de Ar é fundamental para o sucesso deste método, pois é sabido que só se formam íons positivos de Ar nesta descarga.

P <sub>Total</sub> (x10 <sup>-6</sup> ) mbar	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
I <sub>es</sub> (μA)	513,6	495,4	427,3	386,4	359,1	340,9	331,8
I <sub>is</sub> (μA)	13,7	14,1	14,5	15,9	17,1	18,0	18,3

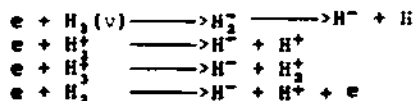
I<sub>eso</sub>=513,6μA; I<sub>iso</sub>=13,7μA; P<sub>Ar</sub>=5,0x10<sup>-6</sup>mbar  
I<sub>D</sub>>1,0A; V<sub>D</sub>=45V; V<sub>pes</sub>=+10V; V<sub>pis</sub>=-80V

Tab. 1 Tabela de correntes de saturação da sonda em função das pressões.

Os principais processos de formação das diversas espécies de íons positivos são os seguintes (7):



Os processos de formação de íons negativos mais importantes neste tipo de descarga são (6):



O primeiro desses processos envolve níveis de energia vibracional da molécula de H<sub>2</sub> de terminação por v. Neste tipo de descarga sabe-se que este é o processo de maior seção de choque (para v=6 → 0,5 x 10<sup>-17</sup>cm<sup>2</sup>).

A concentração absoluta de íons negativos de H<sup>-</sup> depende das densidades das várias espécies de íons, e é dado por:

$$r_- = \frac{n_{\text{H}^-}}{n_{\text{Ar}^+} + n_{\text{H}^+} + n_{\text{H}_2^+} + n_{\text{H}_3^+}}$$

As densidades de corrente de saturação (J<sub>es</sub> e J<sub>is</sub>) são proporcionais às densidades de elétrons e de íons através das relações

$$J_{es} = (1/4) e (n_e v_e + n_{\text{H}^-} C_{\text{H}^-})$$

$$J_{is} = (0,6) e (n_{\text{Ar}^+} C_{\text{Ar}^+} + n_{\text{H}^+} C_{\text{H}^+} + n_{\text{H}_2^+} C_{\text{H}_2^+} + n_{\text{H}_3^+} C_{\text{H}_3^+})$$

onde v<sub>e</sub> = (k<sub>B</sub> T<sub>e</sub>/m<sub>e</sub>)<sup>1/2</sup> é a velocidade térmica dos elétrons e C<sub>i</sub> = (k<sub>B</sub> T<sub>e</sub>/m<sub>i</sub>)<sup>1/2</sup> é a velocidade crítica de Bohm para os íons. As concentrações dos diversos íons positivos de H são dadas por:

$$r_i = \frac{n_i}{n_{\text{Ar}^+} + n_{\text{H}^+} + n_{\text{H}_2^+} + n_{\text{H}_3^+}}, \quad i = \text{H}^+, \text{H}_2^+, \text{H}_3^+$$

As pressões parciais são proporcionais às densidades das várias espécies, e podem ser estimadas a partir das pressões lidas no medidor de vácuo por ionização e corri-

gidas pela seção de choque para formação destes íons na descarga e no interior da câmara do medidor. Neste caso:

$$r_i = \frac{\alpha (u)^{1/2} (P_i/P_{\text{Ar}})}{1 + \alpha (u)^{1/2} (P_i/P_{\text{Ar}})}, \quad i = \text{H}^+, \text{H}_2^+, \text{H}_3^+$$

onde u = n<sub>i</sub>/n<sub>Ar</sub> e α = (σ<sub>i</sub>/σ<sub>Ar</sub>) descarga/(σ<sub>i</sub>/σ<sub>Ar</sub>) medidor.

A concentração de íons negativos de H<sup>-</sup> poderá então ser estimada a partir das correntes de saturação através da seguinte equação:

$$r_- = 1 - \frac{J_{es} J_{is}}{J_{eso} J_{iso}} (1 + u_{\text{H}^+}^{1/2} u_{\text{H}^+} + u_{\text{H}_2^+}^{1/2} u_{\text{H}_2^+} + u_{\text{H}_3^+}^{1/2} u_{\text{H}_3^+})$$

As concentrações absolutas de íons positivos e negativos na descarga em função da pressão total de gás neutro (Ar + H<sub>2</sub>) são mostradas no gráfico da fig. 3. Observa-se que a quantidade de íons negativos de H<sup>-</sup> é sempre maior que a quantidade de H<sup>+</sup> e H<sub>2</sub><sup>+</sup> como confirmado por outros experimentos (6). A estimativa da concentração de H<sub>3</sub><sup>+</sup>, no entanto, foi mais alta que a observada nestes experimentos. A razão pela qual isto ocorre deve-se à grande quantidade de moléculas H<sub>2</sub> neutras, (a eficiência de ionização nesta descarga é baixa, menor que 10%) que aumenta a produção de H<sub>3</sub><sup>+</sup> através da reação:

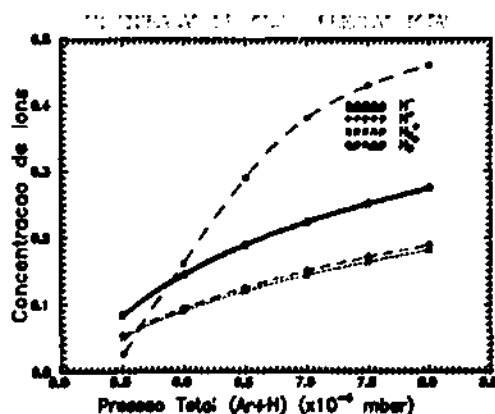


Fig. 3 Gráficos das concentrações de H<sup>-</sup>, H<sup>+</sup>, H<sub>2</sub><sup>+</sup> e H<sub>3</sub><sup>+</sup> em função da pressão total.

#### 4 - CONCLUSÃO

Uma sonda eletrostática de Langmuir e um medidor de vácuo por ionização foram utilizadas para avaliar a concentração de íons positivos e negativos de hidrogênio em uma descarga termiônica multidipolo magnética. A grande concentração de íons H<sup>-</sup> na descarga se deve ao alto valor da seção de choque vibracional da molécula de H<sub>2</sub> para as energias de elétrons (entre 0,1 eV e

25eV) do plasma gerado na PQOI. A diferença da concentração entre os íons  $H_2^+$  e os  $H^+$  e  $H_2^+$  deve-se à grande quantidade de moléculas  $H_2$  e à grande seção de choque ( $\sigma \approx 3,6 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$  para  $E_{H_2^+} \approx 0,1 \text{ eV}$ ). Os resultados destes trabalhos serão verificados em futuro próximo com a utilização de um espectrômetro de massa de setor magnético miniaturizado, ora em desenvolvimento no LAP-INPE (fig. 4). Com este dispositivo será possível medir diretamente as concentrações das várias espécies de íons sem a necessidade do plasma inicial de Argônio.

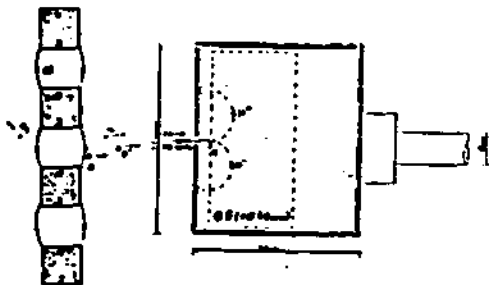


Fig. 4 Esquema do espectrômetro de massa miniaturizado em desenvolvimento.

#### REFERÊNCIAS

- (1) FERREIRA, J.L. "Fenômenos acústico-iónicos lineares e não-lineares em descargas multidipolo magnéticas". Tese de Doutorado. São José dos Campos, INPE, set. 1986, (INPE-4100-TDL/257).
- (2) FORRESTER, A.T. in "Large Ion Beams: Fundamentals of Generation and Propagation" John Wiley & Sons, Inc. 1988.
- (3) KUNKEL, W.B. "Neutral-Beam Injection". Fusion, vol. 1, part B edited by E. Teller Academic Press, 1981.
- (4) LUDWIG, G.O.; FERREIRA, J.L.; NAKAMURA, Y. "Observation of Ion-Acoustic Rarefaction Solitons in a Multicomponent Plasma with Negative Ions". Phys. Rev. Lett., 52(4), 275-378, jan. 1984.
- (5) FERREIRA, J.L.; LUDWIG, G.O.; FERREIRA, J.G. and MONTES, A. "Anomalous Particle Diffusion Through a Magnetic Picket Fence" a ser publicado no Proc. of Symp. on Small Scale Laboratory Plasma Physics of 1989 ICTP, Trieste, Italy.
- (6) LEUNG, K.N.; KUNKEL, W.B. "H-Formation Process in a Multicusp Ion Source" Phys. Rev. Letters, 52(4), 275-378, jan. 1984.
- (7) CHAN, C.F.; BURREL, C.F. and COOPER, W.S. "Model of Positive Ion Source for Neutral Beam Injection". Journal of Appl. Phys. 54(11), 6119-6137, Nov. 1983.