

## PRIMEIROS RESULTADOS DO DESENVOLVIMENTO DE UM PROPULSOR À PLASMA POR EFEITO HALL

I.S. Ferreira\*<sup>‡</sup> e J.L. Ferreira

Laboratório de Plasmas

Instituto de Física – Universidade de Brasília

Campus Universitário Darcy Ribeiro – Asa Norte, DF

CEP: 70919070 Caixa Postal:04455

\* Divisão de Astrofísica - INPE

Palavras-chave: propulsão elétrica, fonte de plasma.

### RESUMO

*Este trabalho possui o intento de reportar a primeira série de medidas que caracterizaram o comportamento estacionário de uma fonte de plasma por efeito Hall. Como se pretende que esta seja aplicada na propulsão de artefatos espaciais, calcularemos ao final quantidades, como empuxo e impulso específico, com os quais se poderá comparar este com outros propulsores.*

### ABSTRACT

*This is a report of the current status in the development of a Hall-effect plasma source. We will show a set of results that trace the stationary operation mode. Our intent is to use this source like an electrical thruster for some space artefact, so we will calculate quantities like thrust and specific impulse, which enable us to compare our source with others.*

### 1. INTRODUÇÃO

Uma fonte de plasma projetada para atuar como propulsor, deve apresentar as seguintes qualidades:

1. Confiabilidade;
2. Longa vida útil;
3. Facilidade de controle, isto é, necessitar de um menor número possível de fontes de alimentação;
4. E, principalmente, baixa consumo de potência elétrica.

Por confiabilidade entendemos que ela sempre entrará em operação fornecendo a mesma corrente de íons para um determinado conjunto de parâmetros de contorno, a saber: potência elétrica disponível, fluxo de gás e campo magnético.

A facilidade de controle pode ser contabilizada, por exemplo, pensando-se no número de fontes de potência necessárias à operação. Para o caso do propulsor aqui descrito, faz-se necessário o controle somente de uma fonte de tensão e uma fonte de corrente.

O objetivo principal, no entanto, é atingir um ótimo desempenho – leia-se energia e densidade do feixe – com baixo consumo de potência elétrica. Foi justamente neste aspecto que mais se trabalhou nos 50 anos de pesquisa nesta área. Se espera que, para um satélite geoestacionário de grande por-

te, não mais que 1,5 kW seja consumido com o sistema de propulsão.

Estudou-se um tipo específico de fonte, a qual se baseia, como será visto adiante, no efeito Hall para acelerar o plasma. Este tipo específico de fonte começou a ser pesquisada em meados da década de 1950, contudo somente atingiu aceitáveis níveis de eficiência no final dos anos 1970, graças aos trabalhos de pesquisadores soviéticos, principalmente de A. I. Morozov (veja revisão detalhada em [1]).

Nossa fonte, chamada de PHALL-01, trás como inovação a fonte de campo magnético, a qual é um conjunto de ímãs permanentes de ferrita. Com esta mudança, esperamos baixar o consumo de potência elétrica e eliminar uma fonte de corrente, que seria necessária para alimentar as bobinas do circuito magnético dos propulsores convencionais.

### 1.1 MECANISMO DE ACELERAÇÃO E GEOMETRIA DA FONTE

Outra denominação para o tipo de fonte aqui tratada é fonte por deriva eletrônica fechada. Isto porque usaremos o campo magnético para confinar elétrons em uma trajetória circular fechada. A fonte foi projetada com a forma de dois cilindros coaxiais, sendo que entre estes cilindros, região que chamaremos daqui por diante de canal, o plasma será produzido, e a corrente eletrônica cumprirá sua trajetória circular sem interrupções.

No canal, o campo magnético é predominantemente radial, de modo que um feixe de elétrons alinhados com a direção axial sofrerá, sob a ação do campo magnético, uma deflexão para uma nova trajetória, alinhada com a direção poloidal (ou azimutal). A figura 1 ilustra as correntes aqui referidas.

O módulo do campo magnético irá definir o quanto são alteradas as trajetórias dos íons e elétrons presentes no plasma produzido no canal, segundo a relação de Larmor. Nosso intento é acelerar os íons, e para tal é necessário deixá-los “livres”, isto é, insensíveis ao efeito do campo magnético. Por outro lado, os elétrons devem estar confinados. Esta duas condições vinculam a geometria da fonte (extensão e largura do canal), a intensidade do campo magnético e o tipo de gás utilizado (massa dos íons). O que temos, ao final, é uma relação entre o comprimento da fonte  $L$ , a tensão de descarga disponível  $V_d$ , velocidade de injeção dos íons  $v_i$  e mobilidade  $M_{e\perp}$  (que é uma função do campo magnético), dada por:

<sup>‡</sup> ivan@das.inpe.br

$$L \approx \left( \frac{M_{e\perp} V_d}{v_i} \right)^{1/2} \quad (1)$$

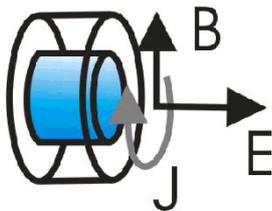
Para o PHALL-01, temos um  $L=3,8\text{cm}$  como comprimento ideal, para  $V_d=500\text{V}$ .

A potência elétrica é introduzida na fonte pelo catodo, posicionado próximo à saída do canal, o qual fornece os elétrons para geração do plasma e para a formação da corrente de deriva fechada – a própria corrente Hall, e também pelo anodo, posicionado no fundo do canal de aceleração.

A aceleração de um elemento de fluido será, em primeira ordem (desconsiderando efeitos de gradientes de temperatura e de densidade), dada por:

$$\frac{d}{dt} \vec{u} = \frac{1}{n} \vec{J}_H \times \vec{B} \quad (2)$$

Onde  $\vec{B}$  é o campo magnético,  $\vec{J}_H$  é o corrente eletrônica Hall,  $n$  e  $\vec{u}$  é a densidade de massa e a velocidade do elemento de fluido, respectivamente.



**Figura 1** – Esquema simplificado da geometria de um propulsor a plasma por efeito Hall. As setas indicam a direção predominante do campo elétrico ( $E$ ), do campo magnético ( $B$ ) e da corrente Hall ( $J$ ). O campo elétrico que condicionará, no início do processo de operação, a corrente eletrônica.

## 2. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

### 2.1 A FONTE DE PLASMA

O corpo da fonte foi construído em aço inox 430, nas dimensões de 8,0 cm de comprimento e 20 cm de diâmetro. O cilindro interno apresenta um diâmetro de 13 cm, o que especifica então um canal de plasma de 3,5 cm de largura. Estas medidas foram todas baseadas no modelo SPT-100, amplamente referenciado na literatura (e.g. [1]).

Tanto na parte interna do cilindro menor, quanto na parte externa do cilindro maior, foram afixadas abas de alumínio com o propósito de suportar os ímãs permanentes, que foram confeccionados em ferrita, com as dimensões 6,5x2,0x1,0 cm. Ao todo, foram utilizados 76 ímãs, lembrando que na parte externa estes são inclinados em  $10^\circ$  e postos aos pares, como mostra a figura 2. O campo superficial destes é, em média, 350 Gauss.

O canal tem suas paredes internas revestidas por cerâmica refratária FiberFrax®, composta de 47%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 48%  $\text{SiO}_2$ , a qual apresenta grande resistência à alta temperatura e ao desbaste iônico.

O anodo foi confeccionado em aço inox 304, e possui 2,0cm de largura. Ele é móvel, sendo que os melhores resultados foram obtidos quando este foi posicionado a 3,8cm do fim do canal, ou seja, definindo um comprimento efetivo da fonte como o calculado anteriormente na equação (1). Nele são aplicados potenciais entre 450 V e 700 V, com relação ao catodo. Este último, é composto por um filamento de Tungstênio com 2,0mm de diâmetro, recoberto por uma camada uniforme de óxido de bário e aquecido por uma corrente de 25A. Logo, o processo de emissão dos elétrons primários é o termiônico.

O propelente, com o qual se produzirá o plasma via impacto eletrônico, é o Argônio. Este é distribuído no interior do canal via uma tubulação de cobre, isolada por camadas de mica, disposta junto à parede externa da fonte. Novamente, a figura 2 irá complementar esta descrição.

Completamente montada, a massa da fonte é 6,5 kg, apenas 2,5 kg a mais do que a massa média das fontes de mesma dimensão.

### 2.2 SISTEMA DE VÁCUO

O propulsor PHALL-01 foi montado no interior de uma câmara MRC do tipo “Glass Bell Jar”. Esta possui 87 cm de comprimento útil, sendo que com a fonte posicionada no fundo da câmara, se tem uma região de 60 cm para propagação do feixe. O diâmetro da câmara é de 42,1 cm.

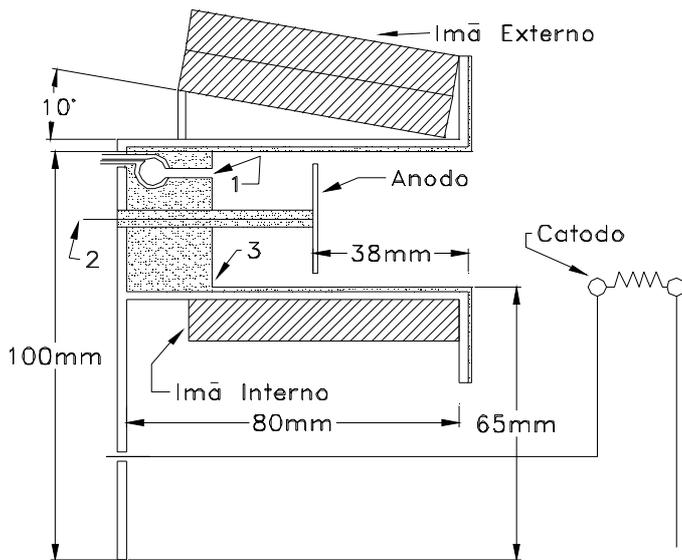
A câmara apresenta oito flanges, divididas entre o sistema de diagnóstico, os passadores de potência e corrente, a injeção de gás e os medidores de pressão. Para a medida da pressão são usados um medidor Pirani e um Magnetron, ambos da Edwards. Como eles estão muito próximos da região de descarga, os mesmos sempre são desligados após a injeção do gás, imediatamente antes da injeção de potência elétrica. Quando este procedimento não foi observado, a descarga se estendeu até estes medidores, danificando-os.

O vácuo é mantido por duas bombas: uma mecânica, da Pfeiffer, com capacidade nominal de bombeamento de 35  $\text{m}^3/\text{h}$ ; e uma difusora MRC, que bombeia estimados 500 l/s. Assim, a pressão na câmara para o início da operação da fonte é sempre menor que  $3 \times 10^{-5}$  Torr, já durante a operação a pressão sobe até  $7,5 \times 10^{-4}$  Torr. Para se atingir a pressão de fundo mencionada acima, é usado um circuito de resfriamento da bomba difusora, onde circula nitrogênio líquido.

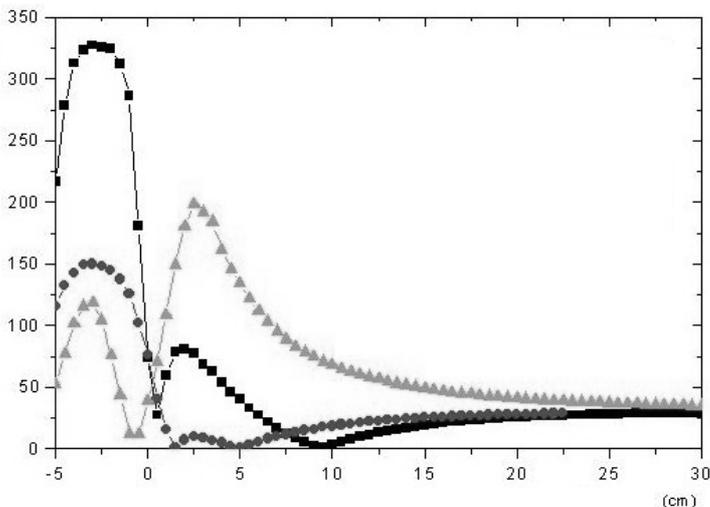
A injeção do gás é controlada por uma válvula do tipo agulha. Não utilizou-se um medidor de fluxo de gás. Este parâmetro, essencial nos cálculos dos parâmetros de performance, foi estimada com base nas variações de pressão, levando-se em conta a pressão do cilindro de gás e as propriedades dos tubos de injeção.

### 2.3 DIAGNÓSTICOS

Três quantidades caracterizam o plasma: temperatura eletrônica, densidade eletrônica e o potencial do plasma. Foi utilizado neste trabalho o método mais tradicional para se



**Figura 2** – Corte do Propulsor PHALL-01 paralelo ao eixo de simetria e apenas com um quadrante a mostra. Temos em 1 o orifício através do qual se injeta Argônio; em 2 o terminal para polarização do anodo; e em 3 uma indicação do revestimento cerâmico que recobre as paredes do canal. O catodo está posicionado a 30 mm do fim do canal.



**Figura 3** – Perfil espacial das componentes de campo magnético. Os pontos quadrados representam a componente radial, enquanto que os losangos são da componente poloidal e os triângulos da axial. Neste gráfico a origem foi posicionada no fim do canal. O campo está expresso em Gauss.

medir estas quantidades: a sonda de Langmuir. Trata-se de um eletrodo de tungstênio imerso no plasma e no qual se aplica um potencial pouco menor que o potencial que se espera no plasma, e este é variado até um potencial de 700 V. A curva que se obtém, num gráfico de corrente coletada em função da tensão aplicada, vai nos dar, quando derivada duas vezes, a função de distribuição dos elétrons (veja detalhes em [2]).

Já para caracterizar o feixe de plasma verifica-se as propriedades dos íons. A densidade, temperatura e distribuição espacial destes pode ser obtida usando-se uma variante da sonda de Langmuir, que é o coletor de íons, ou *Faraday-cup* [3].

Para realizar as medidas, as duas sondas foram montadas, uma por vez, num conjunto de hastes que apresentam dois graus de liberdade. Primeiro, podem se movimentar paralelamente ao eixo de simetria da fonte, permitindo assim traçar um perfil espacial das quantidades que caracterizam o plasma no interior do canal. E depois, estas hastes podem se movimentar de modo a variar o ângulo entre a direção normal da sonda coletora e o eixo de simetria da fonte. Assim, pode-se obter a distribuição espacial do feixe. Deve-se entender que no entanto se está limitado pelas dimensões da câmara de vácuo, de modo que todas as medidas de distribuição angular foram feitas somente a 30 cm da fonte.

### 3. RESULTADOS

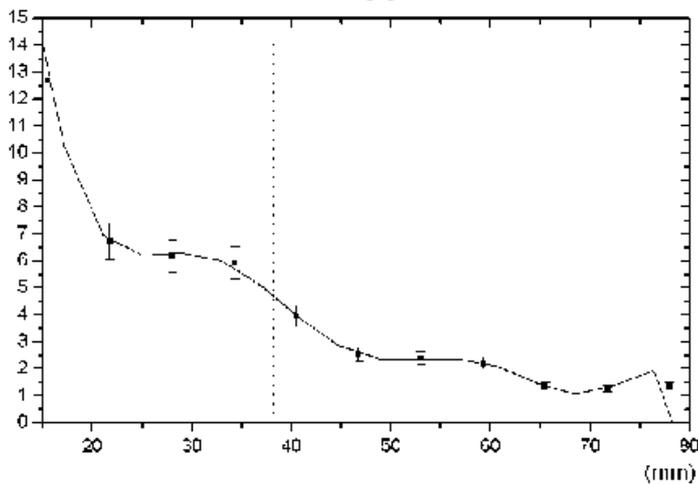
Na equação (2) foi mostrado a dependência entre a orientação e o módulo do campo magnético no interior do canal. Sendo assim, uma das principais medidas é a da intensidade do campo em cada direção. Os resultados destas medidas estão na figura 3. Nela, pode-se observar que a componente radial é de fato a mais intensa no interior do canal, porém as outras duas componentes não são desprezíveis. Um efeito imediato da presença de gradientes da componente axial, principalmente na saída do canal, é que esta forma uma espécie de espelho magnético, aprisionando ali parte dos elétrons, e assim colaborando para a aceleração.

As figuras 4, 5 e 6 trazem os perfis espaciais da densidade, do potencial de plasma e da temperatura, respectivamente. Um perfil unidimensional é satisfatório porque entendemos que a fonte é simétrica, e também porque não queremos, no momento, avaliar o que acontece nas proximidades das paredes do canal. Logo, todas as medidas foram executadas no centro do canal, para uma tensão de descarga de 600V.

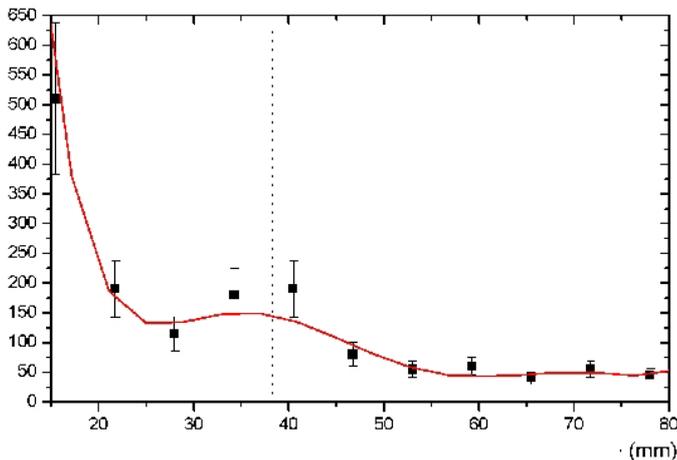
Examinando os perfis obtidos, nota-se que a aceleração – intimamente ligada à queda de potencial – se dá logo à frente do anodo. Nesta pequena região, na qual o plasma ainda não foi acelerado, a densidade é maior, principalmente porque ali que circula a corrente Hall e a sonda de Langmuir foi construída com uma geometria que, nesta situação, favorecia a detecção da densidade de corrente Hall. O potencial apresentará um aumento nas proximidades do fim do canal, o que também acontece no perfil de temperatura. Isto se dá porque ali temos uma zona de transição do regime do fluido, de subsônico supersônico. Uma das causas desta transição é justamente o fim do canal, ou seja, a mudança nas condições de contorno impostas ao plasma (e.g. [4]). Observa-se também que a temperatura é maior nas proximidades do anodo, e isto está ligado à formação de uma região de ionização, ou de formação do plasma[5].

É interessante comparar a dependência espacial da densidade, da temperatura e do potencial com o perfil espacial do campo magnético. Assim se nota a íntima relação entre os gradientes de campo e as zonas de aceleração e ionização.

A figura 7 exibe a distribuição angular do feixe de plasma. Nota-se duas assimetrias: a primeira porque de um lado o feixe sempre possui maiores correntes do que com relação ao outro; a segunda se refere aos picos de corrente, ou ao fato dela não seguir o perfil de uma gaussiana, por exemplo. A explicação para a primeira assimetria é a presença do cátodo na região de menor corrente, ou seja, ele interfere na propagação do plasma. Já a segunda assimetria está ligada ao fato de que o feixe ainda não se propagou o suficiente para ser colimado, de modo que as medidas enfatizam os picos de corrente quando se passa sobre os centros dos canais. A literatura apresenta a distância mínima para a colimação do feixe como sendo de 30 cm [6].



**Figura 4 – Perfil Espacial da densidade eletrônica do plasma. A origem deste gráfico e dos seguintes coincide com a posição do anodo. A densidade está expressa em  $\times 10^{14} \text{ m}^{-3}$ .**

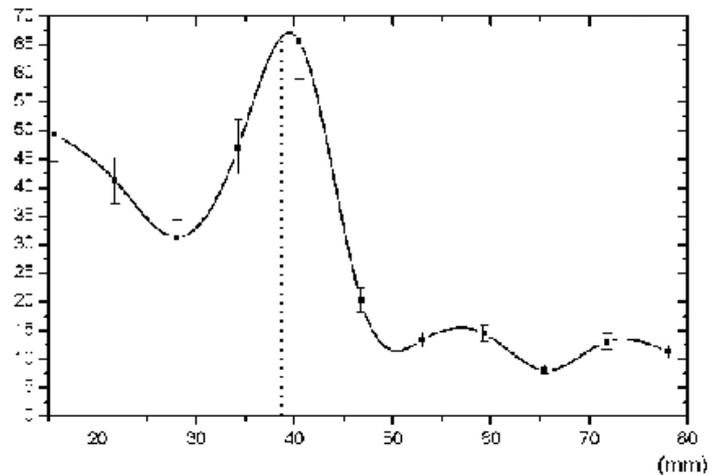


**Figura 5 – Perfil espacial do potencial de plasma medido em Volts.**

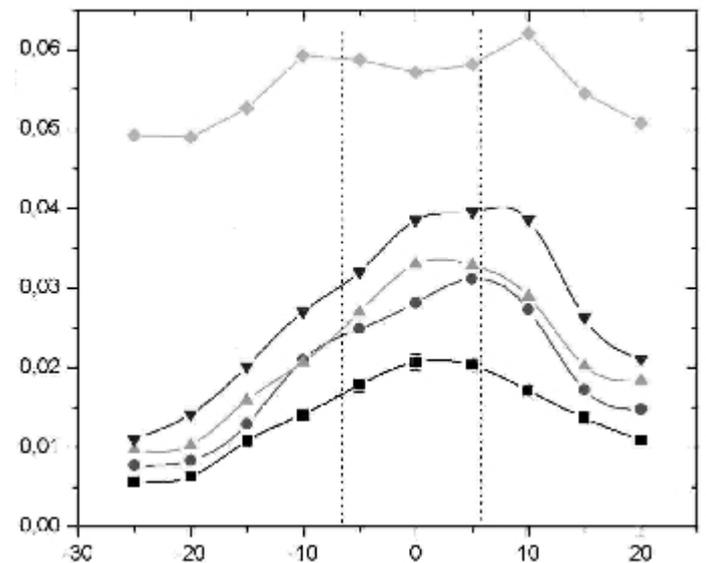
Obteve-se com descargas de 600V uma distribuição acentuada de íons com 540eV de energia, bem como com 360eV. Assim, o PHALL-01 também poderá ser usado para tratamento de materiais que requeiram íons nesta faixa de energia.

Conhecendo a energia e a densidade dos íons, bem como a corrente de descarga, a tensão de descarga e o fluxo de gás, pode-se calcular o empuxo da fonte: 84,5 mN, para 33 % de eficiência elétrica e um impulso específico de 1012 s. Estes

números são comparáveis aos das fontes referenciadas na literatura [1], em específico do SPT-100, fonte na qual este trabalho se baseou.



**Figura 6 – Perfil espacial da temperatura eletrônica do plasma expressa em elétron-Volts.**



**Figura 7 – Distribuição angular do feixe de plasma. As medidas foram feitas em Ampères para distintas tensões de descarga, a saber, 450 (■), 500 (●), 600 (▲) e 650 (▼) Volts. Ainda foram feitas medidas para uma descarga de 500 Volts para um fluxo de gás maior que o usual (0.5 mg/s), correspondendo aos losangos. A origem do sistema corresponde a situação em que a normal do coletor estava paralela ao eixo de simetria da fonte.**

#### 4. CONCLUSÃO

Dado o primeiro conjunto de resultados aqui exposto, pode-se agora trabalhar no incremento da performance da fonte de plasma, principalmente no quesito em que atualmente ela demonstra mais baixo rendimento, que é o grau de ionização. Outro ponto que merece atenção é o aumento da vida útil da fonte, pois testes de longa duração mostraram a eficiência do isolamento dos ímãs – em 1 hora de operação, a

temperatura destes não superou 90° C, tanto os internos quanto os externos – mas indicaram que a fonte de elétrons é severamente deteriorada.

Por outro lado, vemos que mesmo sendo esta apenas a primeira geração, a fonte já apresenta parâmetros competitivos com o de outros propulsores elétricos. E graças ao emprego de ímãs permanente como fonte do campo magnético, pode-se ter a fonte operando com um consumo de tão somente 100W, para um regime de baixa corrente, isto é, empuxo de 26mN.

## 5. REFERÊNCIAS

1. ZHURIN, V.; KAUFMAN, H.; ROBINSON, R., *Plasma Sources Sci. Technol.* **8**, R1-R20, 1999.
2. WONG, A., *Introduction to Experimental Plasma Physics*, Vol 1, UCLA, 1977.
3. WALKER, M.; HOFER, R.; GALLIMAN, A., *The effects of nude Farady-cup probe design and vacuum facility backpressure on the measured ion current density profile of Hall-Thruster plumes*, AIAA2002-4253.
4. DORF, L.; SEMENOV, V.; RAITSES, Y.; FISCH, N., *PPPL-3686*, 2002.
5. FRUCHTMAN, A.; FISCH, N.; RAITSES, Y., *Phys. Plasmas* **8**, 1048-1056, 2001.
6. KEIDAR, M.; BOYD, I., *J. Appl. Phys.* **86**, 4786-4791, 1999.