



| | | | |
|--|--|--|--|
| PALAVRAS CHAVES/KEY WORDS | | AUTORIZADA POR/AUTHORIZED BY | |
| AUTORES AUTORS Ondas de Langmuir Plasma Quiescente Confinamento Multidipolo Magnético | | Gerson Otto Ludwig Chefe do LAP | |
| AUTOR RESPONSÁVEL RESPONSIBLE AUTHOR <i>José Leonardo Ferreira</i> | | DISTRIBUIÇÃO/DISTRIBUTION <input checked="" type="checkbox"/> INTERNA / INTERNAL <input type="checkbox"/> EXTERNA / EXTERNAL <input type="checkbox"/> RESTRITA / RESTRICTED | |
| REVISADA POR / REVISED BY <i>Maria Virgínia Alves</i> Maria Virgínia Alves | | DATA / DATE setembro 1990 | |
| CDU/UDC 533.9 | | ORIGEM ORIGIN LAP | |
| PUBLICAÇÃO Nº PUBLICATION NO INPE-5137-PRE/1625 | | PROJETO PROJECT PQI | |
| TÍTULO/TITLE | Máquina de Plasma Quiescente com Confinamento Multidipolo Magnético para Geração e Detecção de Ondas de Langmuir | | |
| | Nº DE PAG. NO OF PAGES 9 | | |
| AUTORES/AUTHORSHIP | José Leonardo Ferreira Edevaldo Donizetti de Campos Júlio Guimarães Ferreira | | |
| | ULTIMA PAG. LAST PAGE 9 | | |
| VERSÃO VERSION | | | |
| Nº DE MAPAS NO OF MAPS | | | |
| RESUMO - NOTAS / ABSTRACT - NOTES | | | |
| OBSERVAÇÕES / REMARKS Trabalho apresentado no XI Congresso Brasileiro de Aplicações de Vácuo na Indústria e na Ciência - CBRAVIC 24 a 26 de julho de 1990, Universidade de São Paulo - São Paulo, SP. | | | |

MÁQUINA DE PLASMA QUIESCENTE COM CONFINAMENTO
MULTIDIPOLO MAGNÉTICO PARA GERAÇÃO E DETEÇÃO
DE ONDAS DE LANGMUIR

José Leonardo Ferreira, Edevaldo Donizetti de Campos* e
Julio Guimarães Ferreira

Laboratório Associado de Plasmas
Instituto de Pesquisas Espaciais-INPE
12201-São José dos Campos-SP

*Aluno de mestrado do ITA/CAPEs

RESUMO

Neste trabalho serão apresentados os resultados preliminares de produção de plasma e de geração e detecção de ondas de Langmuir na máquina de plasma quiescente (PQUI-II) do INPE. Os resultados obtidos com a máquina operando com e sem o confinamento magnético superficial são promissores. Foi possível avaliar o típico comprimento das ondas de Langmuir excitadas e verificar o aumento na eficiência de ionização com a introdução de um campo magnético superficial.

1. INTRODUÇÃO

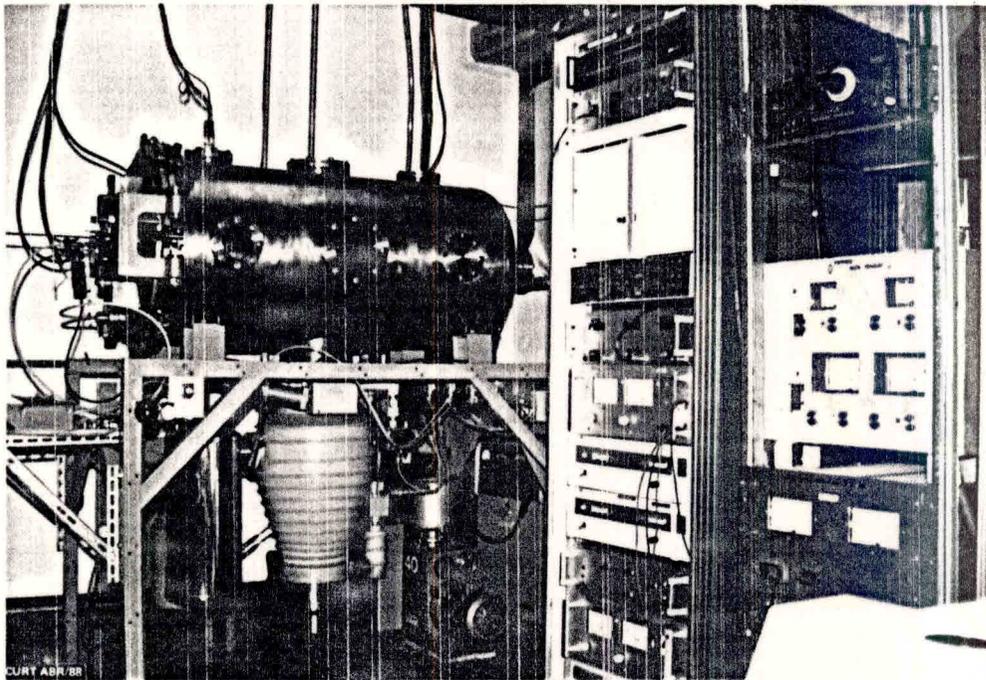


Fig.1 - Vista geral da máquina PQUI-II

A máquina PQUI-II mostrada na Fig. 1, entrou em operação no início de 1990. Ela foi construída para realização de estudo experimental de ondas eletrônicas de plasma ou de Langmuir em um plasma espacialmente uniforme, constante no tempo, e com um baixo nível de ruído eletrostático(1). Com estas características a PQUI-II torna-se ideal para o estudo da interação de ondas eletromagnéticas com o plasma. Serão realizados estudos de processos não-lineares de interação onda-partícula, que ocorrem durante a conversão de ondas eletromagnéticas em modos de plasma(ondas acústico-iônicas e de Langmuir)(2). O objetivo principal será o de determinar a relação entre o nível de saturação das ondas de Langmuir e as altas energias adquiridas pelas partículas durante estes processos. Estes estudos serão realizados em conjunto com o Laboratório de Física do Gás e dos Plasmas da Universidade de Paris-Sul em Orsay na França.

Os resultados destes estudos poderão ser de utilidade para os vários campos de aplicação da física dos plasmas. Para a área espacial o estudo da interação de ondas de Langmuir com o plasma simula em laboratório um dos principais mecanismos de aceleração de partículas em plasmas espaciais. A penetração de partículas carregadas na atmosfera através da anomalia magnética do Atlântico Sul é um exemplo de aplicação destes estudos(3). O desenvolvimento de novas concepções para aceleradores de partículas baseados na geração de campos elétricos intensos no interior do plasma, via ondas de Langmuir, é um exemplo de aplicação na tecnologia de aceleradores de partículas compactos(4). Os aceleradores de elétrons do tipo "Beat Wave" e "Surfatron" que utilizam este princípio já demonstraram a sua viabilidade científica(5). Na fusão termonuclear o estudo da conversão de ondas whistlers em ondas de Langmuir tem sua aplicação no aquecimento e na geração não-indutiva de corrente em tokamaks com ondas eletro-ciclotrônicas (6).

Atualmente um variado número de fontes de íons, cujo tipo de descarga é o mesmo utilizado na PQUI-II, tem sido utilizado na indústria para tratamento de superfícies, no desenvolvimento de propulsores mais eficientes para controle de atitude de satélites e no aquecimento de plasmas termonucleares(7). Neste trabalho estão relatadas as características principais desta máquina, isto é, os dados iniciais de produção de plasma com e sem confinamento superficial, e as primeiras medidas de excitação e detecção de ondas de Langmuir lineares.

2. APARATO EXPERIMENTAL

A máquina de plasma quiescente PQUI-II é formada por um recipiente de vácuo com diâmetro interno = 0,6m e comprimento = 1,2m feita de aço inox não magnetizável tipo 304L. Ela foi construída e desenvolvida em um projeto conjunto do INPE com a indústria Cryometal S.A. . O sistema de vácuo (Edwards) é formado basicamente por uma bomba difusora (2000 l/s) com armadilha criogênica, e por uma bomba mecânica (40 m³/h) de dois estágios, como é mostrado na Fig. 1 . A pressão de fundo de 8×10^{-8} mbar pode ser atingida, com a câmara de vácuo operando sem as estruturas internas, em um período de 48 horas de bombeamento.

Para aumentar a eficiência de ionização e produzir plasmas com maior densidade foi introduzido na câmara um sistema de confinamento magnético superficial. Ele é formado por três estruturas de campos multidipolo magnéticos, isoladas eletricamente uma da outra e da câmara de vácuo, para formar três plasmas independentes (Fig. 2). Com este arranjo é possível controlar o potencial espacial de cada um dos plasmas. Com a introdução de grades entre os plasmas será possível gerar feixes de elétrons e de íons de baixa energia. Cada uma das estruturas é formada por um conjunto de 32 barras de ímãs permanentes de ferrita encapsuladas para evitar degaseificação durante a geração de plasma. As laterais são acrescidas de 10 barras dispostas transversalmente e paralelas entre si. A estrutura de campo multi-dipolo magnético mantém uma distância entre barras de 5,0 cm, capaz de produzir um campo superficial de 200 Gauss que confina principalmente os elétrons primários da descarga. Sistemas de grades polarizadas entre os plasmas poderão também ser utilizados para gerar ondas de Langmuir com feixes de elétrons.

O plasma quiescente é produzido a partir de uma descarga termoiônica contínua com gás nobre (He, Ar ou Xe) que é introduzido na câmara até uma pressão máxima de $5,0 \times 10^{-4}$ mbar. A descarga mais eficiente é produzida por catodos de chapa de níquel coberto por uma camada de óxido de bário (BaO). O níquel é indiretamente aquecido por filamentos de tungstênio, isolados eletricamente do níquel por um tubo de alumina, até uma temperatura de 900^o C. Alternativamente poderá ser utilizado um sistema mais simples, que consiste de um conjunto de catodos de tungstênio cobertos por óxido de bário, ligados em paralelo e diretamente aquecidos por correntes de até 2,0 A por filamento. Esta corrente os aquece por efeito Joule e um número significativo de elétrons da camada de BaO poderá ter energia superior à da função trabalho da camada. O efeito final é o da emissão de uma grande quantidade de elétrons, que é favorecida pelo vácuo existente na câmara, isto é pelo grande livre caminho médio existente para as partículas. A este processo dá-se o nome de emissão termoiônica.

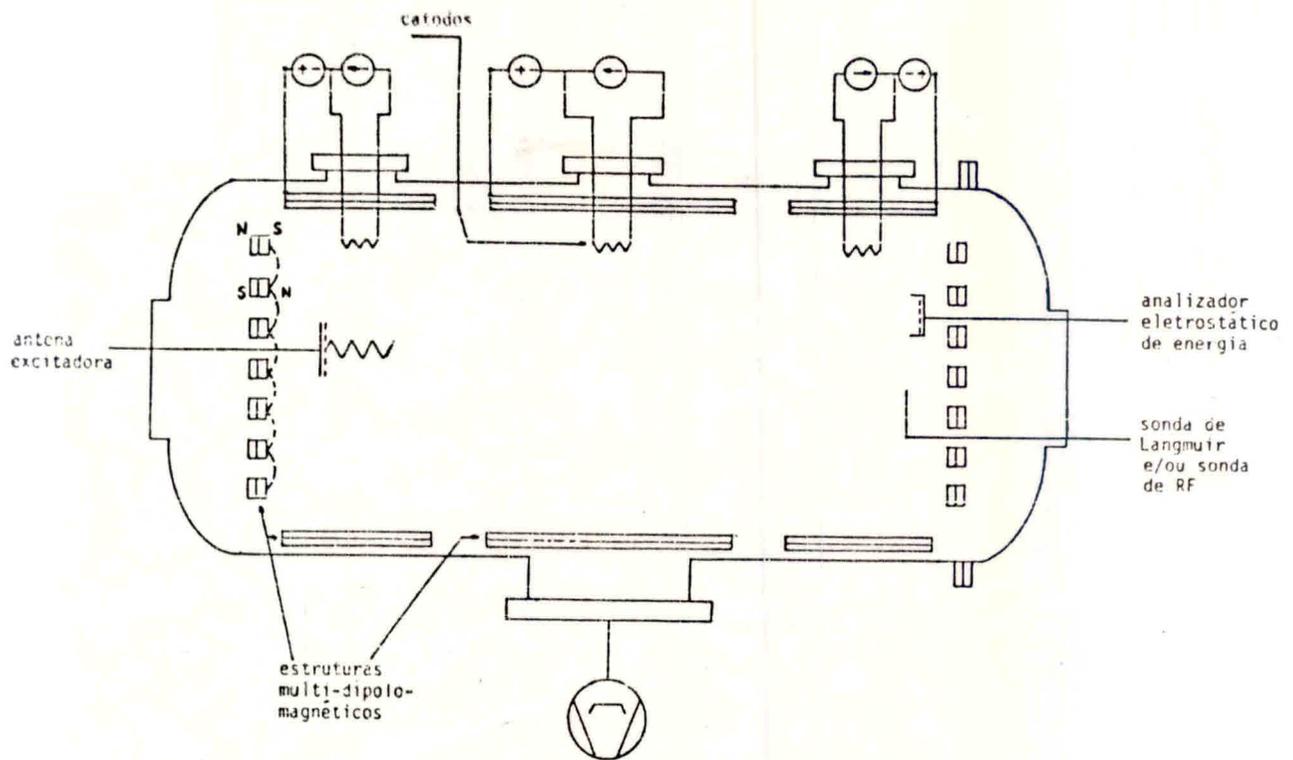


Fig.2 - Desenho esquemático da parte interna da PQUI-II, em corte longitudinal. Em destaque vêm-se as estruturas de campos multidipolo magnéticos, o sistema elétrico e os diagnósticos de plasma.

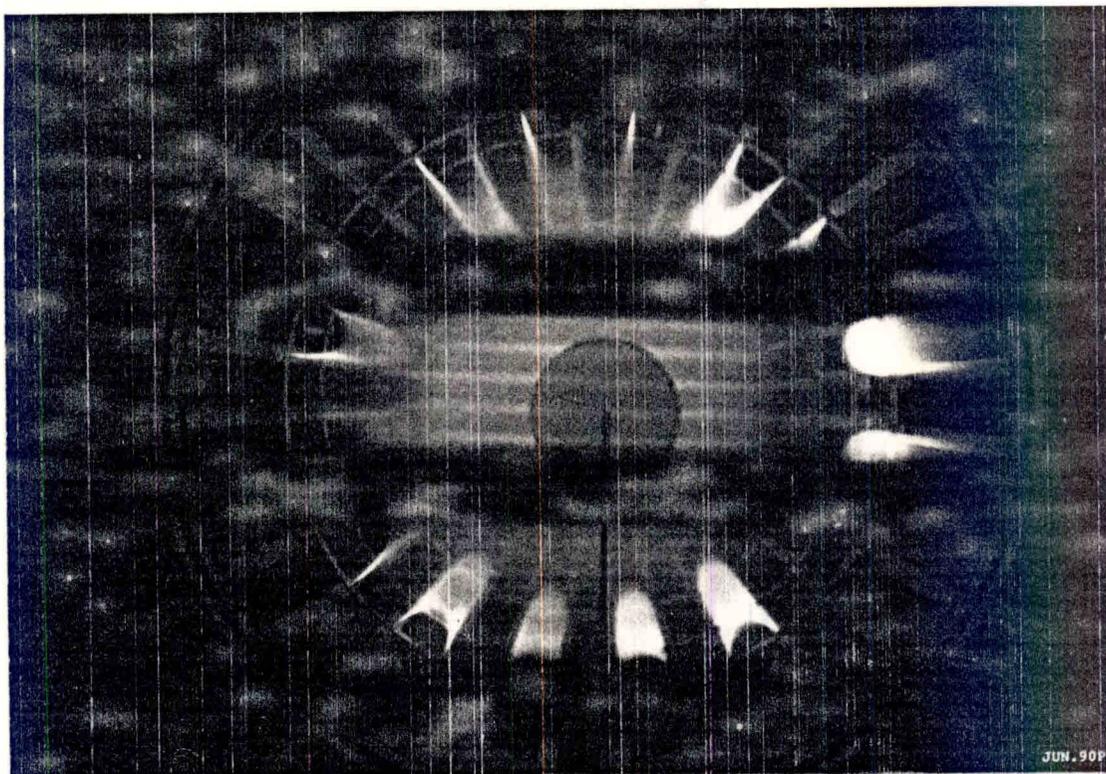


Fig.3 - Vista interna da máquina PQUI-II em operação, através da janela axial. O plasma produzido é de argônio a uma pressão de $4,0 \times 10^{-4}$ mbar.

Os catodos são polarizados negativamente ($V_d = -50$ volts) com relação ao anodo formado pela estrutura de imãs permanentes. Os elétrons acelerados colidem com os átomos neutros causando a ionização do gás nobre residual. A percentagem de ionização típica da PQUI-II é 0.01 %. Na Fig. 3 vê-se o aspecto interno da câmara durante a descarga. Nota-se que a borda do plasma é delimitada pelo campo multidipolo magnético.

Os plasmas quiescentes são ideais para utilização ou teste de vários tipos de diagnóstico de plasma. Neste experimento estaremos usando frequentemente sondas de Langmuir para medida de densidade e temperatura de elétrons do plasma. A sonda consiste em um eletrodo imerso no plasma que possui uma curva característica de corrente x voltagem aplicada de onde se extraem vários parâmetros do plasma, tais como correntes de saturação de elétrons e íons, potencial flutuante, densidade e temperatura de elétrons. Para medir temperatura de íons usamos um analisador eletrostático de energia composto por duas grades e um coletor de íons. A primeira grade que fica em contato com o plasma impede a entrada de elétrons, e a segunda seleciona os íons por energia. O potencial de plasma será medido com uma sonda emissiva, que consiste em um eletrodo aquecido que emite elétrons na mesma proporção em que os coleta. A frequência e o comprimento das ondas de Langmuir poderão ser medidos com uma sonda especial para resposta em alta frequência (100 MHz ou mais). Ela pode ser formada por um ou dois eletrodos, e é capaz de medir flutuações locais de densidade e de campo elétrico. Pode ser acoplada diretamente a analisadores de espectro ou a sistemas interferométricos para medida simultânea de comprimento de onda e frequência.

A Fig.4 mostra uma típica curva de corrente versus voltagem (curva característica de Langmuir) na máquina PQUI II operando com a estrutura multidipolo magnética para confinamento superficial do plasma. Foi utilizada uma sonda eletrostática com geometria cilíndrica constituída por um eletrodo com Diam.= 0.2 mm e Compr.=5 mm.). A densidade do plasma de 10^9 a 10^{10} part/cm³ medida nestas condições é bem maior que a densidade medida na ausência da estrutura multidipolo magnética 10^7 a 10^8 part/cm³.

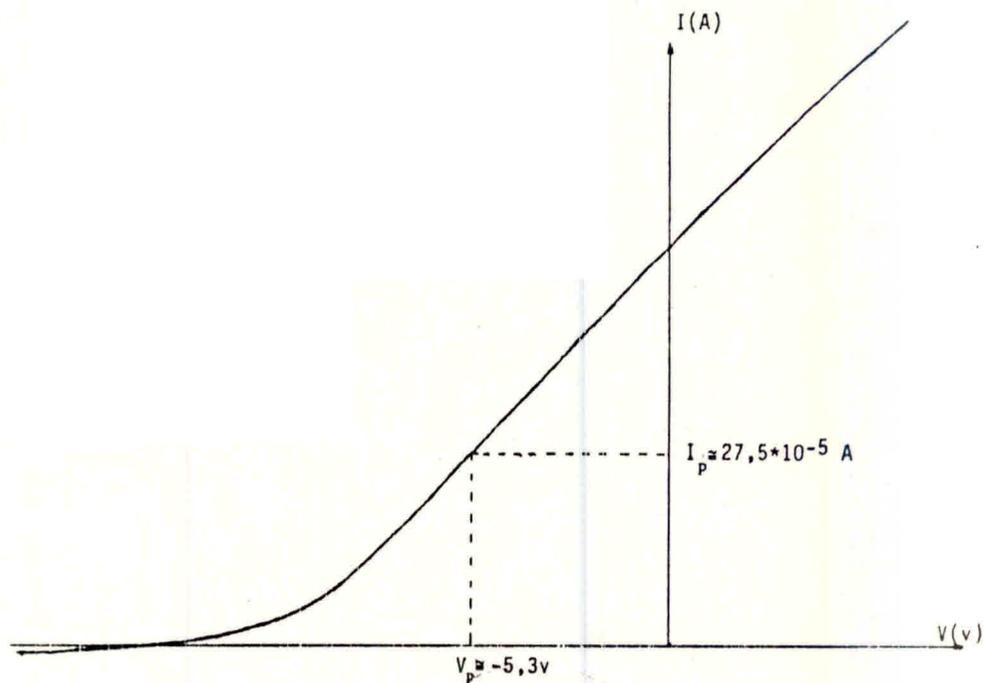


Fig.4 - Curva característica de uma sonda de Langmuir na PQUI II operando com confinamento magnético superficial. $P=3,6 \times 10^{-4}$ mbar, $V_d= 35$ Volts, $I_d= 1,0$ A, $n_e \approx 10^9$ part/cm, $T_e \approx 3,0$ eV.

3. GERAÇÃO E DETECÇÃO DE ONDAS DE LANGMUIR.

Em um plasma livre de campos externos dois modos de propagação de ondas de plasma são possíveis. As ondas acústico-iônicas, com frequência menor que a frequência de plasma para íons, são oscilações em fase de elétrons e íons onde os elétrons contribuem com sua energia cinética e os íons com a massa. As ondas eletrônicas de plasma ou de Langmuir, com frequência maior que a frequência natural de oscilação dos elétrons, são ondas longitudinais de carga espacial onde os elétrons oscilam devido ao efeito combinado de sua própria inércia, com a ação de campos elétricos restauradores.

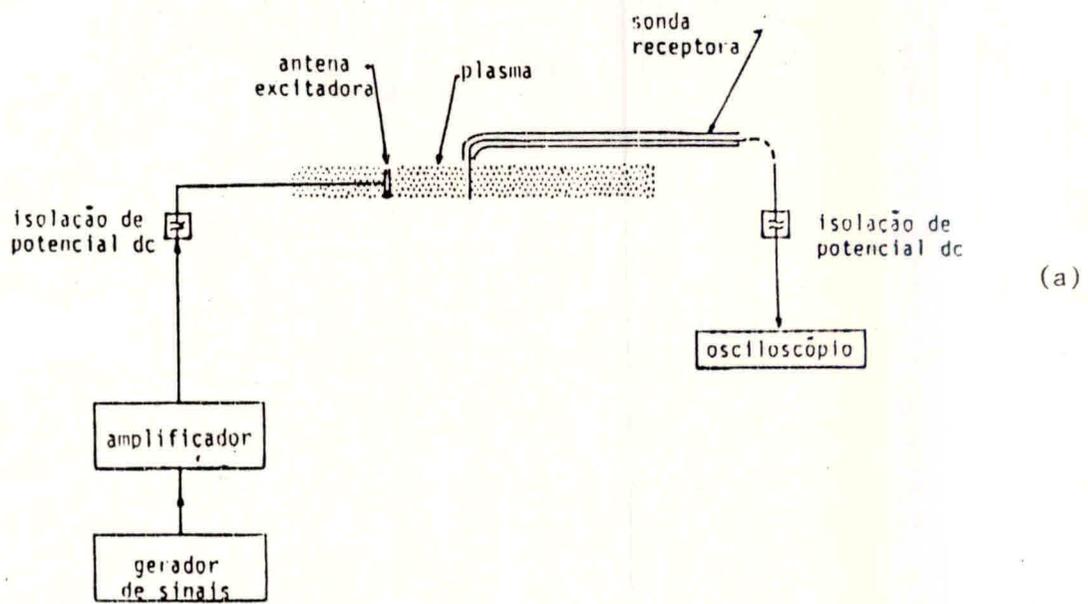
As oscilações eletrônicas de plasma são conhecidas desde o início do século, quando Irving Langmuir as observou em 1926 em uma válvula eletrônica de rádio. A relação de dispersão para estas ondas no entanto, só foi estabelecida a partir dos anos 50. A relação de dispersão de Bohm-Gross para ondas de Langmuir é dada por:

$$f^2 = f_{pe}^2 + \frac{3 v_{term}^2}{\lambda^2}$$

onde v_{term} é a velocidade térmica dos elétrons, λ o comprimento de onda e f_{pe} a frequência de plasma para elétrons que é dada por:

$$f_{pe} \text{ (Hz)} = 9000 (n_e)^{1/2}$$

Para medir a frequência, o comprimento de onda e a velocidade de fase das ondas de Langmuir na máquina PQUI II utilizamos o arranjo experimental que é mostrado na Fig.5a. Ele é formado por um gerador de sinais HP mod.8656 B com faixa de frequência de 1 MHz a 999 MHz, um amplificador que opera nesta mesma frequência da Amplifier Research mod. 5W1000 de 5W de potência, uma antena do tipo grade em forma de disco com diâm.= 10 cm, uma sonda de Langmuir para altas frequências e um osciloscópio Tektronics de 400 Mhz mod. 7844. Em conjunto com o osciloscópio foi usado também um analisador de espectro mod.7L13 também da Tektronics, para medida direta da frequência natural de oscilação do plasma. O esquema mostra também dois transformadores de pulso necessários para desacoplar o gerador de sinal e o osciloscópio do nível DC associado ao potencial flutuante do plasma.



SINAL GERADO: $f=295$ MHz ; $\text{Ampl.} = +1,5$ dBm

PARÂMETROS DO PLASMA: $I_d = 0,2$ A ; $V_d = 60$ v ; $p_{Ar} = 4,8 \times 10^{-4}$ mbar
 $n_e = 10^8$ part./cm³ ; $T_e = 5,0$ eV

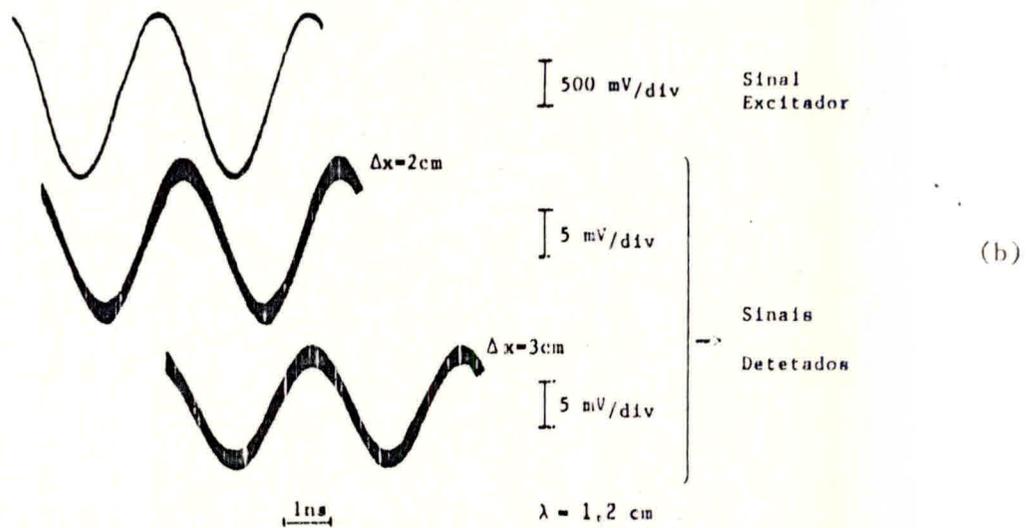


Fig.5 - (a) Esquema do aparato experimental utilizado para geração e detecção de ondas de Langmuir. (b) Comparação entre o sinal de excitação e os sinais detetados pela sonda para duas distâncias da antena.

Na Fig.5b os sinais de excitação e de recepção são mostrados. Os dois sinais detetados pela sonda em diferentes posições mostram uma diferença de fase e uma diferença na amplitude. De acordo com a relação de dispersão de Bohm-Gross a velocidade de fase da onda de Langmuir neste plasma é de 3×10^8 cm/s, bem próxima da velocidade que pode ser estimada diretamente dos sinais da sonda que é da ordem de 4×10^8 cm/s. Quanto ao amortecimento da onda, sabe-se que colisões de elétrons com átomos neutros contribuem para o decréscimo da amplitude das ondas de Langmuir. É necessário também considerar a possibilidade das ondas serem amortecidas por efeitos não colisionais como é o caso do amortecimento de Landau ocasionado pela interação ressonante entre as ondas e as partículas.

4. CONCLUSÃO

A máquina PQUI-II do INPE pode produzir descarga termoiônica com características adequadas ao estudo de fenômenos básicos, tais como a geração e a detecção de ondas de Langmuir em plasma espacialmente uniforme e com baixo nível de ruído. Os dados iniciais demonstram que a estrutura multidipolo magnética para confinamento superficial do plasma aumenta significativamente a densidade do plasma ao mesmo tempo em que diminui a potência necessária para gerá-lo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Ferreira, J. L. "Fenômenos Acústico-Iônicos Lineares e Não-Lineares em Descargas Multi-Dipolo Magnéticas". Tese de Doutorado em Física de Plasma. São José dos Campos, INPE, set. de 1986 publ. int. n. INPE-4100-TDL/257.
- (2) Wong, A. Y.; Cheung, P. Y.; Tanikawa, T. "Evolution from Coherence to Turbulence in Plasmas". Horton, C. W. and Reich, L. E. ed. in "Statistical Physics and Chaos in Fusion Plasmas". New York, John Wiley, 1984.
- (3) Pinto Jr., O. and Gonzalez, W. D. "Energetic Electron Precipitation at The South Atlantic Magnetic Anomaly: a review. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 51(5): 351-365, 1989.
- (4) Heush, B. ; Mathieussent, G. "Accélérateurs et Nouveaux Concepts d'accélération de Particules". Revue de Physique, 23: 1417-1421, 1988.
- (5) Domier, C. W. ; Nishida, Y. ; Luhmann Jr., N. C. "Control of Pump Depletion in $v_p \times B$ Acceleration of Electrons". Physical Review Letters, 63(17), 1803-1806, 1989.
- (6) Shibata, C. S. ; Montes, A. "Propagation and Damping of Whistler waves in Tokamaks" Proc. of the Latin American Workshop on Plasma Phys. and Controlled Thermonuclear Fusion Research, 3 , P. 71-22, Santiago, Chile, July 1988.
- (7) Forrester A. T. in "Large Ion Beams" John Wiley & Sons Publication, New York 1987.
- (8) Chen, F. F. in "Introduction to Plasma Physics" chap. 4 Plenum Press New York 1974.



PROPOSTA PARA
PUBLICAÇÃO

- DISSERTAÇÃO
 TESE
 RELATÓRIO
 OUTROS

TÍTULO

Máquina de Plasma Quiescente com Confinamento Multidipolo Magnético para Geração e Detecção de Ondas de Langmuir

IDENTIFICAÇÃO

AUTOR(ES)

José Leonardo Ferreira
Edevaldo Donizetti de Campos
Júlio Guimarães Ferreira

ORIENTADOR

CO-ORIENTADOR

DISS. OU TESE

LIMITE

DEFESA

CURSO

ORGÃO

— / — / —

— / — / —

DIVULGAÇÃO

EXTERNA INTERNA RESTRITA

EVENTO/MEIO

CONGRESSO REVISTA OUTROS

NOME DO REVISOR

Maria Virgínia Alves

NOME DO RESPONSÁVEL

Gerson Otto Ludwig

REV. TÉCNICA

RECEBIDO

DEVOLVIDO

ASSINATURA

13/08/90

14/08/90

Virgínia Alves

APROVADO

DATA

ASSINATURA

SIM

NÃO

— / — / —

APROVAÇÃO

REV. LINGUAGEM

Nº

PRIOR.

RECEBIDO

NOME DO REVISOR

— / — / —

PÁG.

DEVOLVIDO

ASSINATURA

— / — / —

OS AUTORES DEVEM MENCIONAR NO VERSO INSTRUÇÕES ESPECÍFICAS, ANEXANDO NORMAS, SE HOVER

RECEBIDO

DEVOLVIDO

NOME DA DATILÓGRAFA

— / — / —

DATILOGRAFIA

Nº DA PUBLICAÇÃO:

PÁG.:

CÓPIAS:

Nº DISCO:

LOCAL:

SIM

NÃO

AUTORIZO A PUBLICAÇÃO

— / — / —

DIRETOR

OBSERVAÇÕES E NOTAS