

INTERFERÔMETRO HETERÓDINO, TIPO MACH-ZEHNDER, PARA A DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE PLASMAS PRODUZIDOS POR LASER

Ivo C. Oliveira, Luiz C.S. Goes, José P. Sudano e J.E.B. Oliveira

Instituto de Estudos Avançados - CTA
Instituto Tecnológico de Aeronáutica - CTA

O projeto de um interferômetro, tipo Mach-Zehnder com heterodinagem acusto-óptica é descrito. O sistema consiste de um laser de He-Ne, um modulador acusto-óptico tipo Bragg e um sistema de detecção de fase em quadratura. A aplicação do interferômetro na medida da densidade de plasmas gerados por um laser TEA-CO₂ é apresentada.

gerado por irradiação laser está esquematizada na figura 1.

O plasma é produzido focalizando-se um laser TEA-CO₂ (com uma potência de picos de 6,0 MW e largura de pulso de 80 ns), no interior de uma câmara de vácuo. O laser é focalizado com um sistema de lentes de Ge de comprimento focal variável (2,5 e 5,08 cm). Alvos sólidos e gases puros a baixa pressão (100-800 mbar) são utilizados na geração do plasma-laser. A intensidade na região focal do laser é da ordem de 10^{10} W/cm². Num experimento típico com gás de Nitrogênio (pressão de base de 200 mbar), o plasma é formado 30 ns após o início do pulso de laser de CO₂. A fase de expansão do plasma dura vários microssegundos (4-6 us), conforme indicado pela emissão de luz detectada pelo conjunto filtro de interferência e foto-detector rápido. A velocidade de expansão do plasma estimada pelo tempo-de-vô de partículas é da ordem de 10^7 cm/s.

O esquema de montagem do interferômetro Mach-Zehnder e sua disposição com relação ao feixe-impulsor (laser de CO₂) é mostrado na figura 1. Os feixes ativo e de referência passam pelo interior da câmara de vácuo, onde o plasma é localmente gerado. A distância entre os feixes ativo e de referência (nas flanges de entrada e saída) é de aproximadamente 7,5 cm. Dada as características de expansão do plasma (velocidade de expansão entre 10^7 e 10^8 cm/s), a distância entre os feixes é um parâmetro crítico a fim de evitar a interação do plasma com o braço-de-referência durante o intervalo de tempo de medição. Quatro espelhos auxiliares no interior da câmara são utilizados para afastar o máximo possível os caminhos ópticos ativo e de referência.

O deslocamento de fase é devido à interação do plasma com o feixe-sonda. A defasagem do sinal, devido a componentes eletrônica do plasma, está relacionada com o índice de refração do plasma, N_r , dado por [1]:

$$N_r = (1 - n_e/n_{cr})^{1/2} \quad (2.1)$$

onde n_e é a densidade do plasma e n_{cr} é a densidade crítica para o corte do modo ordinário. A densidade crítica é função do comprimento de onda da radiação incidente, e é dada por [1]:

$$n_{cr} (\text{cm}^{-3}) = 1,1 \times 10^{21} / \lambda^2 (\mu\text{m}) \quad (2.2)$$

No caso de plasmas gerados por laser de CO₂, a densidade máxima é da ordem de 10^{19} cm⁻³, muito

1. INTRODUÇÃO

A interferometria óptica é uma técnica bastante utilizada em medidas da densidade de plasmas de fusão [1]. Neste trabalho, nós descrevemos o projeto de um interferômetro na região do visível (laser de He-Ne, $\lambda = 0,633 \mu\text{m}$), com modulação acusto-óptica para aplicação no estudo da evolução da densidade de plasmas gerados por laser CO₂-TEA [2]. O sistema proposto está em fase final de montagem e consiste de um interferômetro tipo Mach-Zehnder com detecção heteródina [3,4], onde a frequência de um dos caminhos ópticos é modulada por uma célula de Bragg. A defasagem do sinal introduzida pelo plasma no braço interferométrico ativo é processada por um sistema de detecção-de-fase em quadratura [5,6], interfaceado com um microcomputador via interface paralela IEEE-488.

A montagem experimental para geração e diagnóstico do plasma-laser é descrita na Seção 2. O projeto óptico do interferômetro e sistema de detecção de fase são descritos na Seção 3. O sumário e as conclusões são apresentadas na Seção 4.

2. MONTAGEM EXPERIMENTAL PARA ESTUDO DA INTERAÇÃO LASER-PLASMA

A montagem experimental do interferômetro a ser empregado nos estudos da evolução de plasmas

menor que a densidade de CO_2 , a densidade de corte para a radiação do laser de He-Ne, $n_{cr} = 2,74 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$.

A defasagem, $\Delta\phi = k \cdot \Delta x$, dos sinais no feixe de referência e feixe-sonda é calculada pela expressão [1]:

$$\Delta\phi = (2\pi/\lambda_0) \int_0^d dx |1 - (n_e/n_{cr})|^{1/2} \quad (2.3)$$

onde λ_0 é o comprimento de onda no vácuo ($\lambda_0 = 0.633 \mu\text{m}$), e d é a distância percorrida pelo feixe-sonda no plasma. No caso, $n_e \ll n_{cr}$, a expressão acima reduz-se a:

$$\int_0^d dx n_e(x) = 2,2 \times 10^{17} M/\lambda_0 (\mu\text{m}) \quad (2.4)$$

onde M é o desvio de fase produzido pelo plasma, expresso em unidades de $2\pi \text{ rad}$ (número de franjas).

Após o pulso do laser impulsor, a energia absorvida pelo plasma é transformada em energia de expansão. A velocidade de expansão da frente do plasma tende a um valor constante, V_m . Considerando que essa expansão é isotrópica, podemos aproximar o caminho óptico no plasma, d , pela relação a baixo [7]:

$$d(t) = 2 V_m t \sin |\cos^{-1}(\ell/V_{mt})| \quad (2.5)$$

onde ℓ é a distância entre o centro de expansão do plasma (por hipótese o centro da região focal) e a corda do caminho óptico no plasma. O intervalo de tempo, t , é aproximado pelo tempo decorrido a partir do tempo de ruptura do gás neutro.

As equações (2.4) e (2.5) fornecem todos os parâmetros necessários para se determinar a evolução temporal de densidade do plasma-laser.

3. O INTERFERÔMETRO MACH-ZEHNDER

O esquema de montagem óptica-eletrônica do interferômetro com um laser contínuo de He-Ne está mostrado na figura 2. O interferômetro é do tipo heteródino, com a frequência do feixe-de-referência deslocada em relação a frequência do feixe-sonda. Uma célula acusto-óptica (célula de Bragg) desenvolvida no ITA/CTA [8] é utilizada para difratar o feixe de He-Ne incidente e deslocar a frequência do feixe difratado (heterodinagem).

A célula de Bragg funciona como um divisor de feixe, com as frequências dos feixes ópticos emergentes separadas pela frequência do sinal de RF injetado (40 MHz). A modulação da célula de Bragg é pulsada a fim de reduzir a potência dissipada no transdutor piezo-elétrico e melhorar a relação sinal/ruído no sistema de detecção (lock-in duplo). Os feixes emergentes são coletados por um conjunto de espelhos (M_1 e M_2) que ajudam a separação espacial dos feixes, direcionando-os para a flange de entrada na câmara de vácuo.

O sistema de detecção consiste de um filtro de interferência (F) e um foto-detector PIN. A informação de fase introduzida pelo plasma é processada por um discriminador de fase em quadratura. O detector sensível a fase recebe o sinal modulado do fotodiodo, junto com um sinal de referência (40 MHz)

proveniente do sintetizador de frequência via um acoplador direcional (-20 dB). Os sinais em quadratura na saída do discriminador de fase são proporcionais ao seno e ao cosseno da diferença de fase, respectivamente. O sintetizador de frequência e o detector de fase são instrumentos providos com interfaceamento paralelo IEEE-488.

O número de franjas, M , é calculado (off-line) pela relação [3]:

$$M = (2\pi)^{-1} \tan^{-1}(Q/I) \pm n/4 \quad (2.6)$$

onde n é inteiro, I e Q são os sinais em fase e quadratura, respectivamente. As equações (2.4), (2.5) e (2.6) são processadas no microcomputador, a fim de determinar a densidade média do plasma como uma função do tempo.

4. SUMÁRIO E CONCLUSÕES

Para as condições experimentais dadas, o sistema de diagnóstico deve possuir uma faixa dinâmica de 120 dB (com uma densidade máxima da ordem de 10^{19} cm^{-3}), uma resolução espacial mínima de 1 mm e uma resolução temporal de 500 ns. Nessas condições a densidade máxima corresponde a um desvio de fase de $3 \times 2\pi \text{ rad}$, e a densidade mínima requer uma resolução fracional de aproximadamente 10^{-3} franjas. A largura de banda mínima do sistema de detecção de fase é da ordem de 10 MHz.

As variações de fase devido as entradas espúrias (vibrações e refração do feixe-sonda pelo plasma) não são críticas para essa aplicação. Primeiro, o espectro de frequência das vibrações aleatórias possui uma largura de faixa de aproximadamente 1 kHz. As variações de fase associadas com essas vibrações são lentas em comparação com as variações de fase devido ao plasma. Segundo, para o presente regime de densidade do plasma a variação do ângulo de divergência do feixe emergente é da ordem de 0,01%.

Dois tipos de testes estão em fase de elaboração. No primeiro tipo de teste os padrões de interferência são estudados com uma câmara conversora de imagem "IMACOM". No segundo tipo de teste o processo de heterodinagem (Bragg) é estudado com um foto-detector e um analisador de espectro.

5. REFERÊNCIAS

1. Véron, D., "Infrared and Millimeter Waves", vol. 2, Ed., K.J. Button, Academic Press, N. York, 1979.
2. Rodrigues, N.A.S., Goes, L.C.S. e Sudano, J.P., 8º Congresso Brasileiro de Aplicações de Vácuo na Indústria e Ciências, Rio de Janeiro, 1987.
3. Fairbanks, E.S., Rev.Sci. Instruments, **56** (1985), 905-907.
4. Hugenholtz, C.A.J. and Meddens, B.J.H., Rev.Sci. Instruments, **53** (1982) 171-174.
5. Jacobson, A.R., Rev.Sci. Instruments, **49** (1978) 673-674.
6. Buchenauer, C.J. and Jacobson, A.R., Rev.Sci. Instruments, **48** (1977) 769-744.
7. Mirage, A., Tese de Mestrado, Instituto de Física

ca "Gleb Wataghin", Univ. Estadual de Campinas,
1978.

8. Oliveira, J.E.B., Relatório Interno, IEE/ITA
1987.

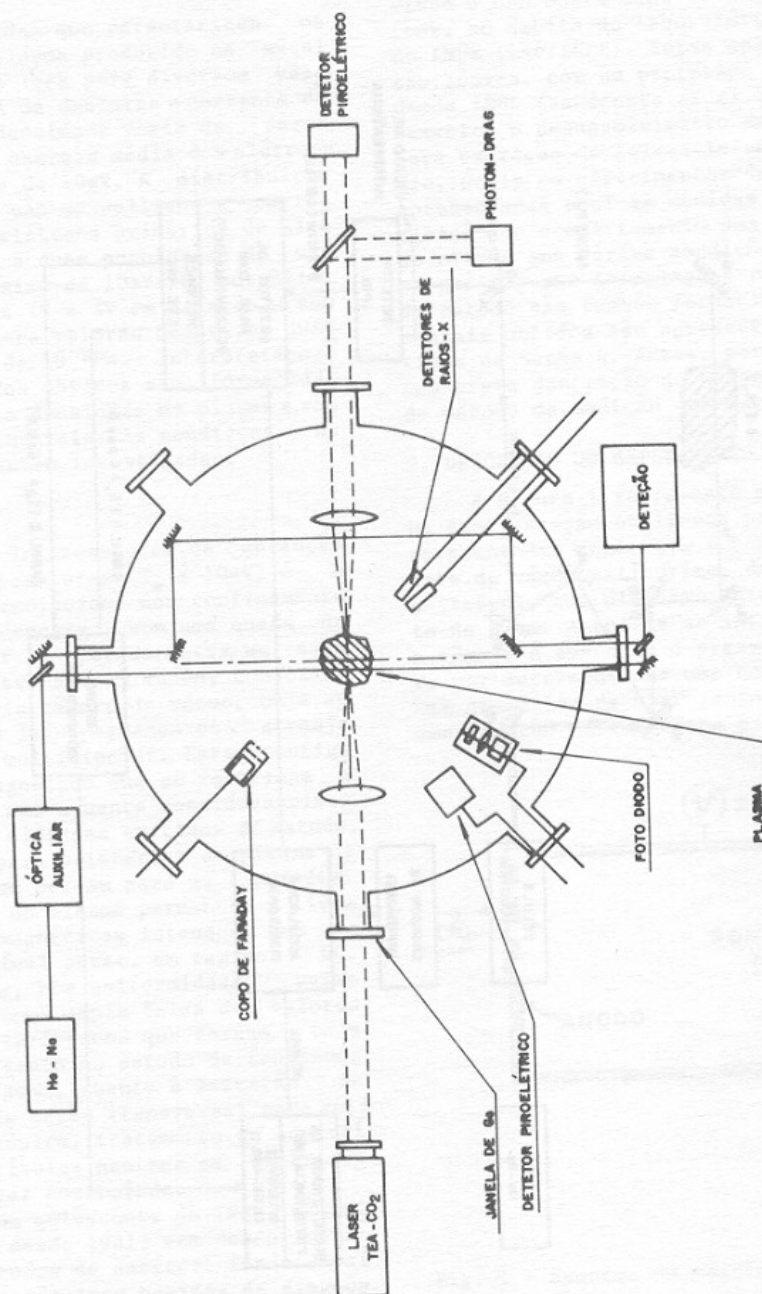


Figure 1 - MONTAGEM EXPERIMENTAL

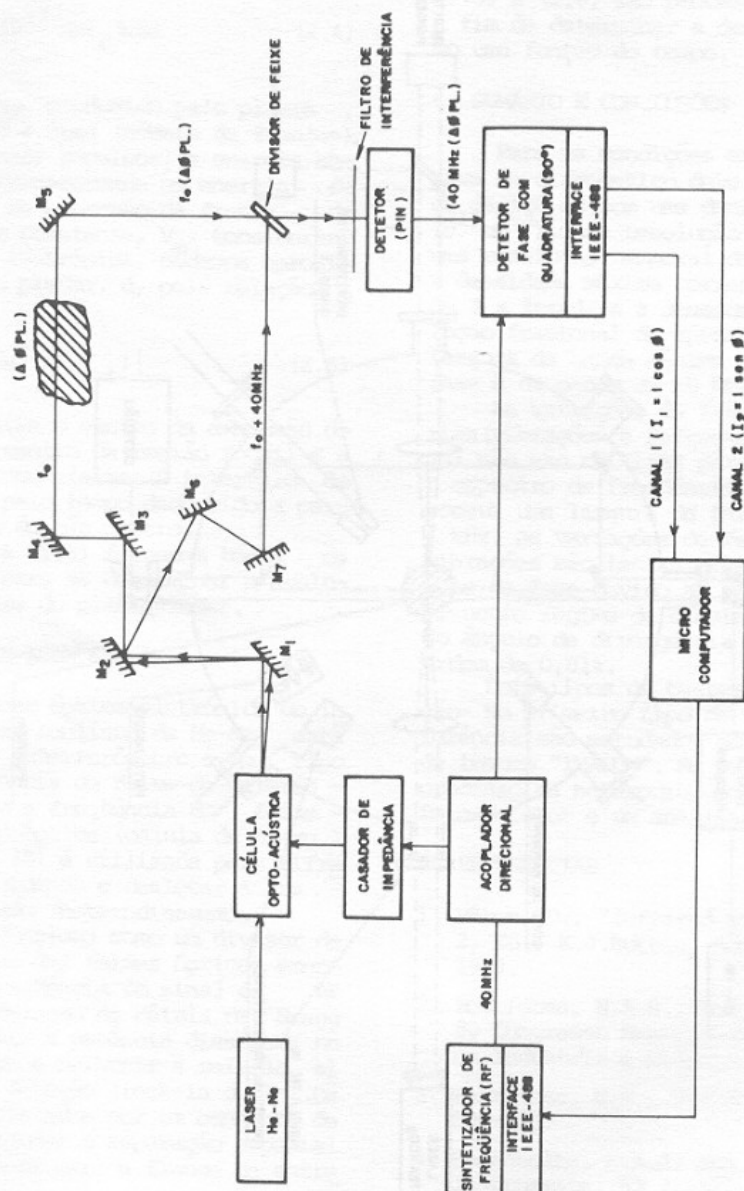


Figura 2 - ESQUEMA DE MONTAGEM ÓPTICO - ELETRÔNICO.