

HT-6M 托卡马克上七道远红外激光干涉仪的改进

卫明生 高翔 揭银先 李广
方自深 李建刚

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘 要 介绍了用激光干涉法测量等离子体电子密度的原理。研究了 HCN 激光器及其输出模式和传输特性, 并给出七道远红外 HCN 激光干涉仪的改进及其最新结果。在光路改进中解决了原光路的一些重要问题, 使信号提高了近一个量级。

关键词 激光干涉仪, EH_{11} 模, 转动光栅。

1 引 言

远红外激光干涉测量等离子体电子密度是七十年代发展起来的新的诊断技术^[1], 目前, 它已是各种聚变装置上测量等离子体电子密度的常规手段。用干涉的方法测量等离子体电子密度是通过测量等离子体折射率来实现的。早期是用迈克尔逊干涉仪, 直接测量干涉条纹的强度。数据不直观, 误差大, 目前已被马赫-陈德尔型外差干涉仪所代替。七道远红外激光干涉仪就是这种外差式干涉仪。根据干涉原理探测光束与参考光束的相位差为

$$\varphi = 2.82 \times 10^{-17} \int_L n_e dl \quad (1)$$

其中, λ 为波长(μm), L 为等离子体的长度(cm), 相移 φ (rad) 可由干涉仪直接获得。图 1 是 HCN 外差干涉原理图。采用转动光栅调制频率, 产生多普勒频移。通过比较拍频信号过零点的时间差, 可获得相位差 $\Delta\varphi = \Delta\omega\Delta t$ 。

目前, 远红外激光器从激励方式上可分为三类: 光泵远红外激光器, 射频激励远红外激光器和辉光放电激励远红外激光器。本文所用的是波长为 $337 \mu\text{m}$ 辉光放电激励的波导远红外 HCN 激光器。远红外激光外差调制方法常用双光泵激光法、转动光栅调制法等, 图 1 和图 2 是两种方法示意图。用转动光栅调制频率, 当光栅曲率半径不能忽略时, 必须考虑其与高斯光束的匹配问题^[2, 3], 这将在后面作具体说明。

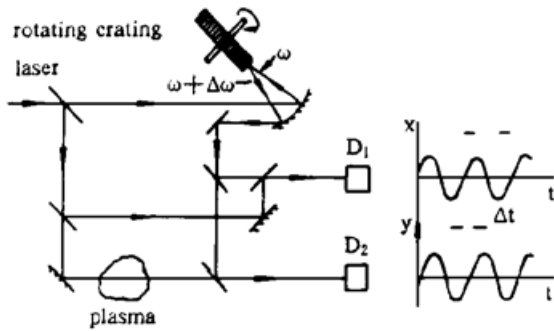


Fig. 1 The principle of a heterodyne FIR laser interferometer (modulated by a rotating grating)

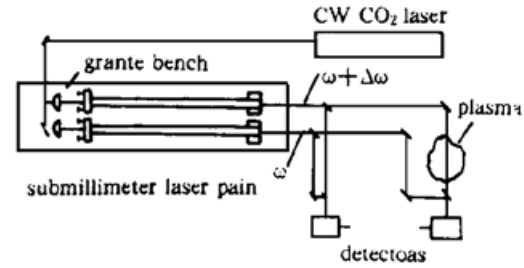


Fig. 2 Two-frequency, beat-modulated methanol laser interferometer

2 七道远红外激光干涉仪原光路存在的问题

七道远红外激光干涉仪的光路^[4]是按照早期文献设计的,存在三大问题:

- 1) 波导 HCN 激光器的输出束腰大小和位置不准确。原光路设计时没有考虑 EH₁₁ 模与自由空间高斯模的耦合问题,由实验测出距激光器输出口 1.3 m 处激光功率密度最大,即认为此处为激光输出束腰,测得束腰大小为 20 mm。这实际上只是 EH₁₁ 模近场分布的情况,而光路是按照高斯光束传播特性来设计的,这必然会带来差别。
- 2) 原光路中七道光束的光程因强求等程而增加了二十多面反射镜,光强损失较大。
- 3) 用于调制频率的转动光栅没有考虑曲率的影响,致使与高斯光束存在匹配差。

3 波导远红外 HCN 激光器及其模式和传输特性

目前广泛用于托卡马克等离子体诊断的远红外激光器,主要是辉光放电激励的波长为 337 μm 连续输出的空心圆柱介质 HCN 波导远红外激光器。早期辉光放电激励的 HCN 激光器是开腔式。为了提高效率,现大多都使用波导腔结构。波导 HCN 激光器的输出功率与放电管的参数密切相关,其经验定标公式^[5]为

$$P_0 = 327 \{ (0.46L)^2 - [a_0d + 0.423(L + L')/d^2]^2 \}^2 \quad (2)$$

其中 P_0 为理想状态下激光输出功率(mW), L 为放电长度(m), $L + L'$ 为激光器总长(m), d 为激光管内径(cm), a_0 通常称为外部损耗。从上式可以看到在理想放电条件下, P_0 直接与 L 及 d 有关。当放电长度一定时,由上式可求得放电管最佳直径

$$d_0 = [2 \times 0.423(L + L')/a_0]^3 \quad (3)$$

HCN 激光波导管的内径由此可确定。为 HT-6M 装置研制的 HCN 波导激光器,腔长为 3.4 m,放电管长度为 3 m,内径为 5.4 cm,在适当的放电条件下,输出功率约为 100~150 mW。

激光在波导中可以存在三种类型的本征电磁场:横电模、横磁模和混杂模。其中低阶 EH₁₁ 混杂模的损耗最小。它具有线偏振圆对称的场分布。远红外激光器内部模式是复杂的,改变谐振腔的腔长,可以观察到不同模式的激光输出。Belland 等观测输出模式与远场模式特征^[6]时发现 EH₁₁ 模输出最强并具有高斯分布特征。在作者使用的 HCN 激光器上也观察到了 EH₁₁ 模和 EH₁₂ 模,如图 3 所示。为了设计远红外激光干涉仪光路,必须研究 EH₁₁ 模在自由空间的传播特性。图 4 是在 HT-6M 上的波导远红外 HCN 激光器上的实验结果^[7]:在几米外的远场为很好的高斯分布,离输出窗 2 m 内的近场分布与高斯拟合曲线的误差较大。由高斯光束在自由空间传播方程:

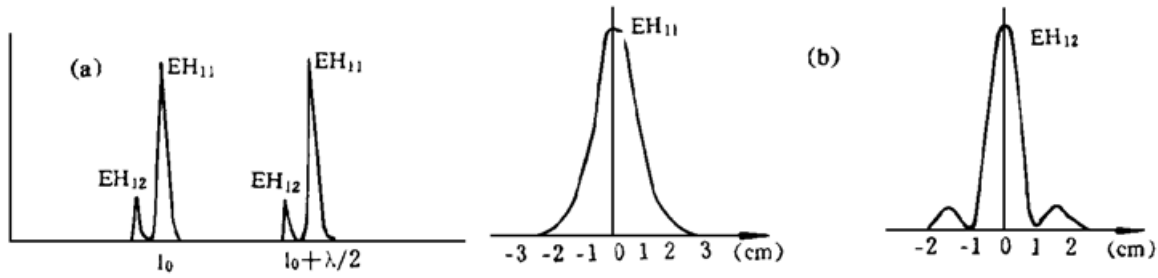


Fig. 3 (a) The observation of output modes in HT-6M HCN waveguide laser ($\lambda = 337 \mu\text{m}$); (b) Intensity distribution of two modes at far distances from the mesh coupler ($z = 2 \text{ m}$)

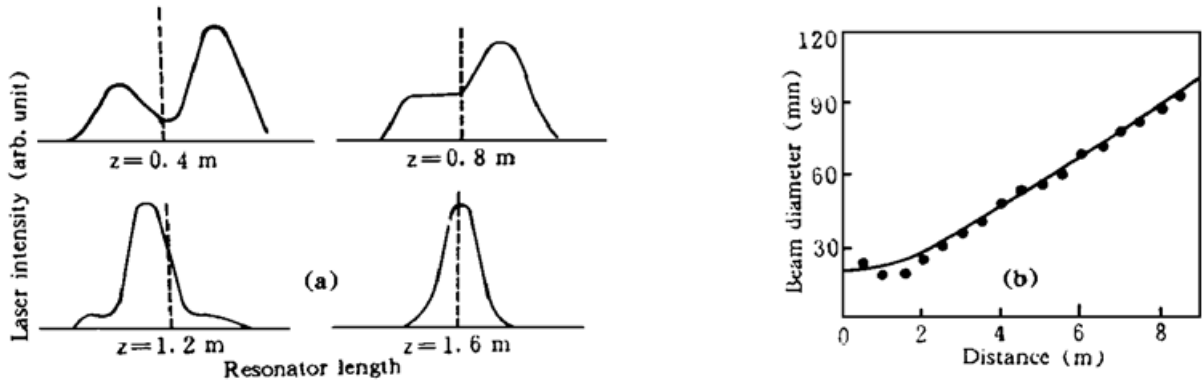


Fig. 4 (a) The intensity distribution of EH_{11} mode in 2 meters from the mesh coupler; (b) Measured width at $1/e$ of intensity of the EH_{11} modes as a function of distances from the mesh output power. The full curve is the best fit of gaussian propagation to the experimental points. “•” represents the experimental points

$$d^2 = d_0^2 + (2\lambda z / \pi d_0)^2 \quad (4)$$

对实验数据进行最小二乘拟合, 可得到光束束腰 $d_0 = 21.6 \text{ mm}$, 束腰距输出窗口距离为 $z_0 = 0.01 \text{ m}$, 束腰大小与波导直径之比为 $d_0/a = 0.4$, 这与按 Rebuffi 和 Green 的理论^[8] 计算的 $z_0 = 0$, $d_0/a = 0.421$, 符合得很好。

4 七道远红外激光干涉仪的改进

在这次光路改进中, 针对原光路存在的三个主要问题进行了修正。改进部分主要是激光输出束腰及其大小的确定; 装置上窗口上方光路的简化; 按照新参数并考虑转动光栅与高斯光束的匹配重新设计了两个望远镜系统。改进后的光路见图 5, 下面一一介绍。

1) 在新的光路计算中, 取激光器输出窗口处为远红外光束的束腰处, 束腰大小为 21.6 mm 。

2) 原装置上方光路因强求等光程, 使得光路迂回曲折。实际上由于该处离探测器距离较小, 对于等光程的要求并不严格, 所以在本次改进中减少了 20% 的光学元件, 使得光损失减少, 提高了信号强度。

3) 转动柱面光栅调配系统的改进。

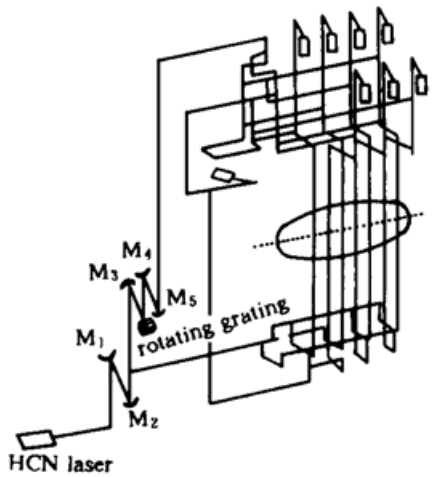


Fig. 5 Schematic of vertical 7-channel FIR laser interferometer

图 6 为转动柱面光栅图, 它的刻槽平行于转轴, 闪耀角为 $\alpha = 53.7^\circ$, 槽面间的垂直距离为 $\lambda/2$, 其光栅常数为 $d = \lambda/(2 \sin \alpha)$, 入射束经聚焦后以闪耀角入射在光栅表面上。圆柱光栅转动时, 衍射光束受到多普勒频移

$$f = Nn \quad (5)$$

其中 $N = 2\pi R/d$ 为光栅总刻槽数; n 为光栅转速。对于 HCN 激光波长 $\lambda = 337 \mu\text{m}$, 设计的光栅参数为: 半径 $R = 60 \text{ mm}$, 厚度为 15 mm , 总刻槽数 $N = 1800$, 当转速 $n = 5.56 \text{ s}^{-1}$ 时, 调制频率为 10 kHz 。

图 7 是转动柱面光栅调配系统。入射光束的束腰在光栅表面时, 如光栅曲率半径足够大, 则可以不考虑曲率的影响, 反射面可作平面镜处理。反射束的束腰大小和位置也取表面上的入射束的束腰值。在原光路中, 光栅表面的束腰定为 2 mm 。作者通过台面实验发现, 对于半径为 60 mm 的光栅曲面, 在圆柱切向上的曲率已经不能忽略, 反射束的光路比预想光束发散的要大很多。这可用较简单的模型来加以说明: 只考虑高斯光束正入射到光栅表面上, 要想让反射光束平行射出, 即反射光束腰在光栅表面处; 把光栅表面当凸面镜处理, 则有方程^[1]

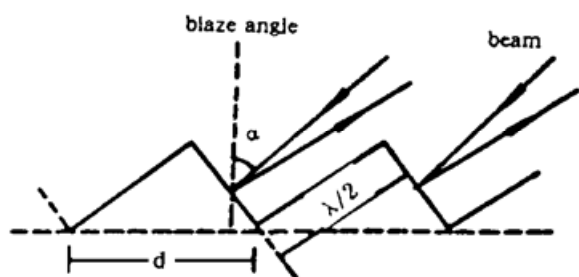


Fig. 6 Schematic diagram of rotating grating

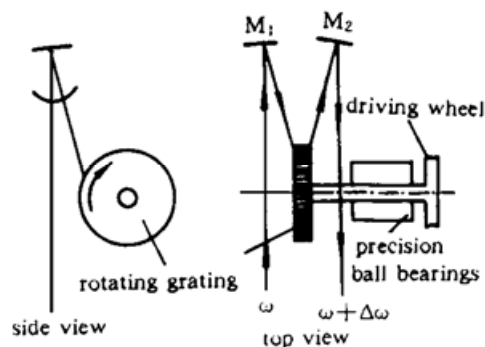


Fig. 7 Rotating grating assembly

$$z_1 - f = (z_0 - f) \left\{ f^2 / [(z_0 - f)^2 + (\pi d_0^2 / 2 \lambda)^2] \right\} \quad (6)$$

$$d_0 / d_1 = [(f - z_0) / (f - z_1)]^2 \quad (7)$$

把 $f = -R/2$, $z_1 = 0$ 代入(6)、(7)两式, 得到 d_1 , z_0 关于 R 和 d_0 的关系, 如图 8 所示。由图可知:

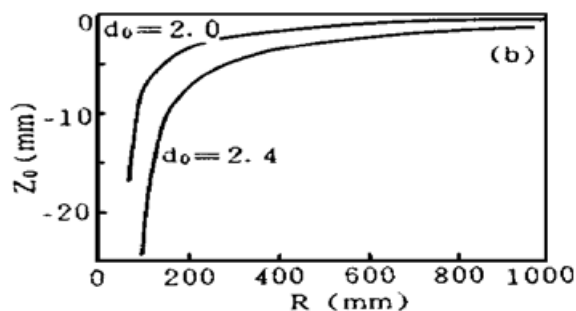
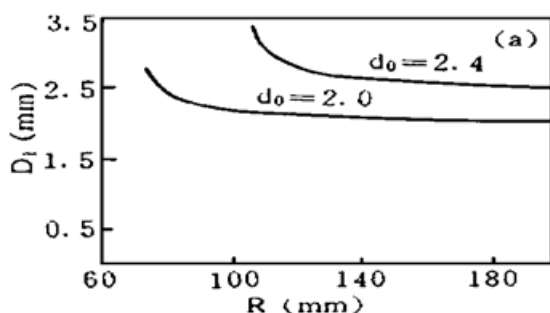


Fig. 8 (a) The variation of d_1 as a function of R , (b) The variation to z_0 as a function of R

1) d_0 越大, 对 R 的要求越苛刻。

2) R 较小时, 必须考虑光栅与高斯光束的匹配, 当 R 增大到某一个值时, 就可以不考虑光栅的曲率影响, 当 $R \rightarrow \infty$ 时, $z_0 \rightarrow 0$, $d_1 \rightarrow d_0$ 。

上述模型只适用于正入射的情况。实际应用中, 高斯光是沿光栅的闪耀角入射的, 所以和实际情况会有一定的差别。台面调配实验表明: 减少 42.69 mm 光程(图 7 中 M_1 反射镜到柱面光栅的距离), 即入射束腰进入光栅柱面内部时, 反射束的束腰正好在光栅表面。这时表

面入射光斑直径为 5 mm。研究表明^[2, 3]这个值正是反射束的束腰。改进后的干涉仪系统信号明显提高。在这次 HT-6M 远红外激光干涉仪光路改进中, 采用这一措施, 信噪比提高了近 10 倍。

在新光路设计中, 尽量选取尺寸较大的光学元件, 使其满足 $D \geq 2.2d$ (d 为光学元件上的高斯光束直径。它是光强峰值 $1/e$ 处的光斑直径, D 为元件尺寸), 这样, 其光能损失可小于 0.79%。对图 6 中 M_1 和 M_2 、 M_4 和 M_5 焦距的选择采用了最优化设计, 使其对光路变化依赖程度较小。

除了在光路上的三个重要改进外, 还考虑了在远红外激光探测中法布里-珀罗效应对探测器性能的影响, 设计了一种可调式 TGS 探测器^[9]。图 9 为用改进后的干涉仪在 HT-6M 托卡马克上测量的七道等离子体相移的积分信号。改进后的七道远红外激光干涉仪和原干涉仪比, 信噪比有了较大的提高, 探测信号提高近一个量级。由于受到机械振动和电磁干扰等因素的影响, 加之数据采集过程中使用 80 μ s 的采样周期, 使得改进后的干涉仪可测最小相移精度限制到 1/20 干涉条纹(原干涉仪的可测最小相移为 1/15 干涉条纹^[4])。改进后的干涉仪与国内现有同类专用干涉仪^[10]相比(文献[10]中的干涉仪测量精度为 1/17), 测量精度比较高。

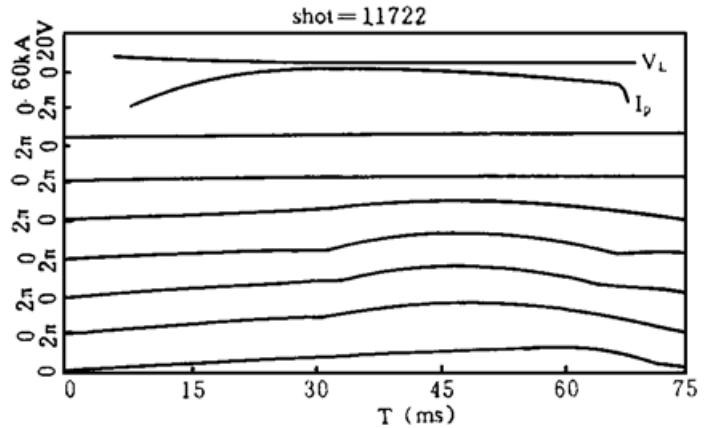


Fig. 9 Line integrals of phase shift of 7 probing chords. The serial numbers in the Fig. are the order of probing channel arranged from high field to low field. I_p - plasma current, V_L - plasma loop voltage

感谢童兴德高级工程师在实验上的大力支持和帮助, 感谢郭其良研究员给予的关心, 对于 HT-6M 实验组和诊断组各位同仁的配合和帮助, 亦深表谢意。

参 考 文 献

- [1] D. Veron, Submillimeter interferometry of high-density plasma. Infrared and millimeter waves, edited by K. J. Button. New York, Academia Press. 1979, 2(2): 69~ 135
- [2] J. Howard, Novel scanning interferometer for two-dimensional plasma density measurements. *Rev. Sci. Instrum.*, 1990, 61(3): 1086~ 1094
- [3] J. Howard, Multi-order rotating grating interferometer. *AN U-PRL-PP* 1991/2: 1~ 18
- [4] 童兴德, 郭其良, 高翔, 测量托卡马克装置等离子体电子密度分布的远红外 HCN 激光干涉仪. *光学学报*, 1988, 8(10): 933~ 939
- [5] P. Belland, D. Veron, L. B. Whitbourn, Scalling laws for CW 337 μ m HCN waveguide lasers. *Appl. Opt.*, 1976, 15(12): 3047~ 3053
- [6] P. Belland, D. Veron, L. B. Whitbourn, Mode study, beam characteristic and output power of CW 337 μ m HCN waveguide laser. *J. Phys. (D): Appl. Phys.*, 1975, 8(18): 2113~ 2122
- [7] 高翔, 远红外激光诊断的实验研究. 中科院等离子体物理研究所博士论文, 合肥, 1996, 5~ 20
- [8] L. Rebuffi, J. P. Green, Radiation patterns of the HE_{11} mode and gaussian approximations. *Int. J. of Infrared and Millimeter Waves*, 1989, 10(3): 291~ 311

- [9] Gao Xiang, The improved pyroelectric detectors for far-infrared laser interferometer measuring. *Int. J. of Infrared and Millimeter Waves*, 1990, **11**(5): 641~ 649
- [10] 邓中朝, 刁光跃, 张清春等, 多道 HCN 激光干涉仪在 HL-1 装置上的电子密度分布测量. 核聚变与等离子体物理, 1994, **14**(2): 21~ 27

Improvement of 7-Channel FIR HCN Laser Interferometer in HT-6M Tokamak

Wei Mingsheng Gao Xiang Jie Yinxian

Li Guang Fang Zishen Li Jiangang

(*Institute of Plasma Physics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031*)

(Received 7 February 1996; revised 9 May 1996)

Abstract The principle of interferometer for measuring the electron density of plasma is described. HCN laser, its output modes and the propagation of EH_{11} mode in free space are studied. Improvement of 7-channel FIR HCN laser interferometer and its new measured results are presented. We solved some important problems in previous optical system and make the signal increase about one order.

Key words laser interferometer, EH_{11} mode, rotating grating.