

波导 DCN 激光器输出特性的理论和实验分析

刘梦昆¹ 高翔²

(1 复旦大学物理系, 上海 200433; 2 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

(2004 年 9 月 3 日收稿; 2004 年 10 月 11 日收修改稿)

Liu MK, Gao X. Theoretical analysis and experimental study of the beam property of wave-guide DCN laser. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2005, 22(4):406 ~ 410

摘要 介绍了波导 DCN 激光器的原理和结构, 重点研究了波导 DCN 激光本征模(EH_{11} 模)在远场和近场的多阶高斯耦合效应, 分析了 DCN 激光器的输出特性. 理论计算的结果与实验数据基本吻合, 并为 EAST 托卡马克远红外激光干涉仪系统的光学设计提供了必要条件.

关键词 波导 DCN 激光器, EAST 超导托卡马克, 远场与近场, 高斯耦合

中图分类号 TN2

1 引言

托卡马克是研究热核聚变、高温等离子体的实验装置. 中国科学院等离子体物理研究所在超导托卡马克 HT-7 (Hefei Tokamak-7) 的基础上, 设计和研制了全超导托卡马克装置 EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak). 为了有效地测量 EAST 托卡马克等离子体的电子密度时空分布, 必须研制新型的远红外激光干涉仪; 波导 DCN 激光器是远红外波段 ($195\mu\text{m}$) 的大功率激光器 (220mW), 它是最佳光源.

DCN 激光器是一种振动—转动激光器, 是同电子态的 2 个能级的转动能级之间的跃迁而发射激光的, 用于测量等离子体密度的远红外激光干涉仪的光源器件. 它是以 N_2 、 CD_4 、 He (或 D_2) 3 种气体为工作物质的气体激光器, 主要元件有放电管、电极、谐振腔、真空系统、激光电源、工作物质等几个部分. 图 1 是 DCN 激光器结构原理图. 放电管的材料是玻璃, 采取了硅油冷却系统来稳定放电管的温度; 另外加上 4 根低膨胀合金来稳定腔长, 这样在实验时就可以得到比较稳定的激光输出. 放电管的几何参数如下: 内径 50mm, 外径 54mm, 腔长 3400mm, 放电长度 3000mm. 采用了六硼化镧作为阴极材料, 阳极由黄铜做成, 内衬钽筒. DCN 激光器的谐振腔为波导平面腔, 其一端是平面镜, 另一端是金属栅网. 真空系统采用了一台 2XZ-4 型旋片式真空泵通过一个玻璃缓冲瓶与放电管相接, 其极限真空度可达 5Pa. 激光电源是一台 10kVA 高压恒流源, 稳流系数为 0.35%, 输出电流在 0.4 ~ 1.5A 范围内连续可调, 输出电压在 2 ~ 5.5kV 内变化, 电源有过流保护和自泄放置系统, 整机配有水冷却系统, 可以 24h 连续运行.

在 HT-7 托卡马克多道远红外激光干

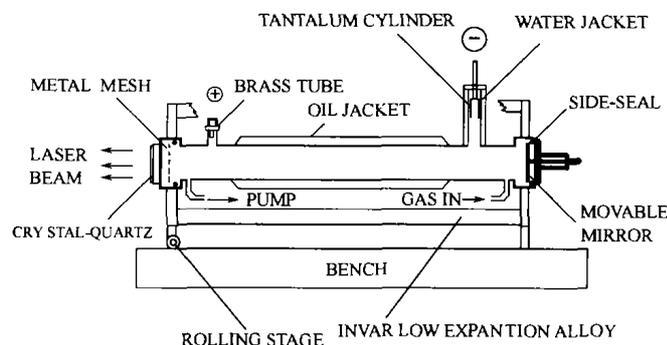


图 1 DCN 激光器结构原理图

涉仪上,目前使用的光源是 $\lambda = 337\mu\text{m}$ 、连续输出、空心圆柱介质 HCN 波导远红外激光器^[1]。随着 HT-7 托卡马克实验的进行,以及将要运行的 EAST 超导托卡马克建设,等离子体的运行参数将越来越高,等离子体密度参数的提高使现在的 HCN 远红外干涉仪的使用有较大限制。为了满足实验要求,必须研制直流辉光放电激励的大功率连续波 DCN 激光器,作为远红外激光干涉仪的光源。与 HCN 激光器比较,DCN 激光器主要优点是:(1)输出激光的波长短,可测量更高的电子密度时空分布;输出光束发散小,可以进行更多道的光学测量,获得更加准确有效的数据。(2)经过等离子体折射的偏向角小,误差小。深入研究波导 DCN 激光光束的输出特性是开展光学设计、进一步研制 DCN 远红外干涉仪的工作基础。

2 理论分析

在 DCN 波导激光器中最重要的本征模式是 EH_{11} 模,其模场分布为:

$$\begin{cases} E(r) = J_0\left(\frac{u_{11}}{r_0}r\right), & r \leq r_0; \\ E(r) \approx 0, & r > r_0, \end{cases} \quad (1)$$

其中, $J_0(r)$ 为零阶柱贝塞尔函数。

为了研究 EH_{11} 模在自由空间中的传播规律,我们将 EH_{11} 模在波导管口面上按自由空间的拉盖尔—高斯光束展开^[2],沿 z 方向传播的拉盖尔—高斯光束其场强大小可写成

$$\psi_{mn}(r, \varphi, z) = \frac{C_{mn}}{\omega(z)} \left[\frac{\sqrt{2}r}{\omega(z)} \right]^m L_n^m \left(\frac{2r^2}{\omega^2(z)} \right) e^{-\frac{r^2}{\omega^2(z)}} \begin{cases} \cos m\varphi \\ \sin m\varphi \end{cases}, \quad (2)$$

式中, n 表示沿半径方向有 n 个节线圆; m 表示沿辐角方向有 m 根节线。为了与线偏振的 EH_{11} 模很好地耦合,我们取 $m = 0$, 这样得到一组正交完备归一的 Laguerre-Gauss 函数:

$$\psi_n(r) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{\omega(z)} L_n \left(\frac{2r^2}{\omega^2(z)} \right) e^{-\frac{r^2}{\omega^2(z)}}, \quad (3)$$

$$L_n(x) = \frac{e^x}{n!} \frac{d^n}{dx^n} (x^n e^{-x}), \quad (4)$$

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z\lambda}{\pi\omega_0^2} \right)^2}, \quad (5)$$

式中, $L_n(x) = \frac{e^x}{n!} \frac{d^n}{dx^n} (x^n e^{-x})$ 为 n 阶拉盖尔多项式; ω_0 是基模高斯光束的腰斑半径; $\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{\omega(z)}$ 为归一化系数。在波导口面上, EH_{11} 模按拉盖尔—高斯光束的展开式表示为

$$E(r) = \sum_{p=0}^{\infty} A_p(\omega_0) \Psi_p(r), \quad (6)$$

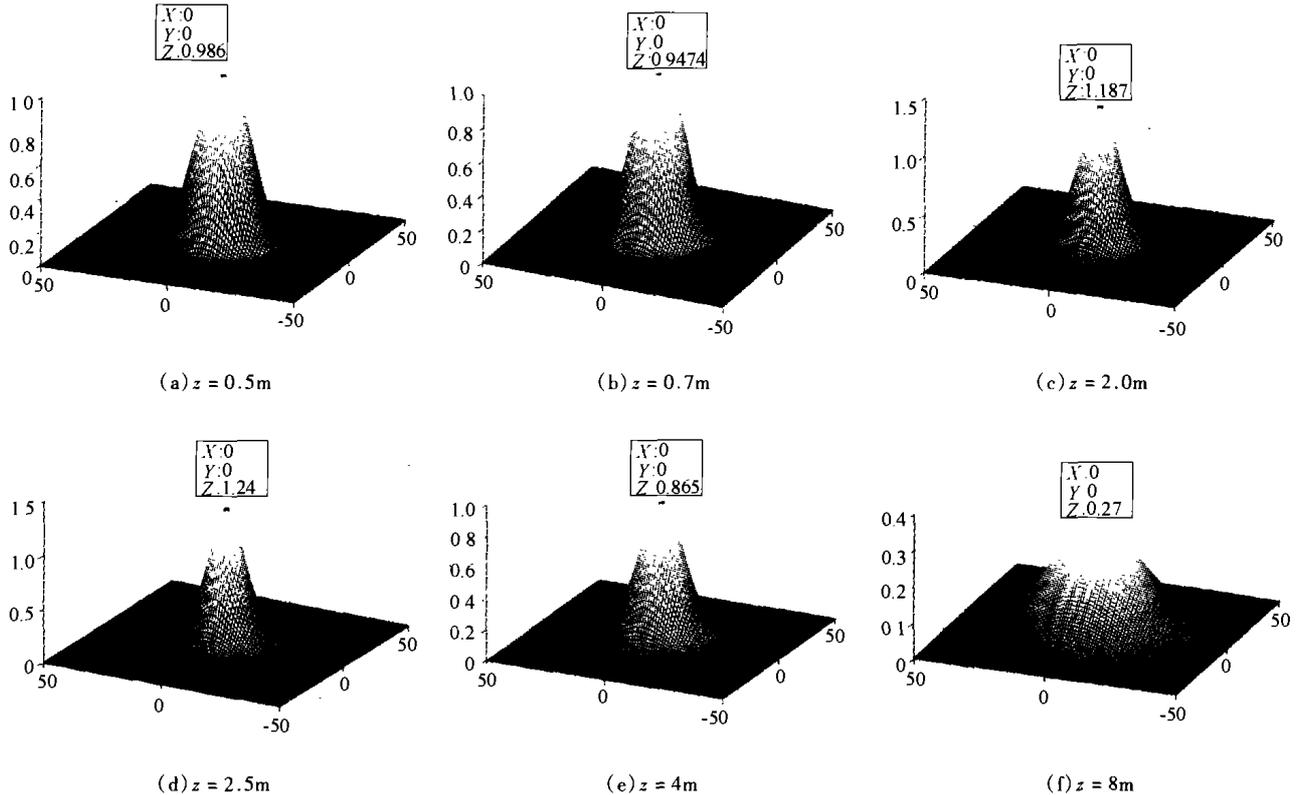
其中,由傅里叶变换可知:

$$\begin{aligned} A_p(\omega_0) &= \int_0^{\infty} E(r) \Psi_p(r) 2\pi r dr = \int_0^{r_0} E(r) \Psi_p(r) 2\pi r dr \\ &= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{\omega_0} \int_0^{r_0} J_0\left(\frac{u_{11}}{r_0}r\right) L_p\left(\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right) e^{-\frac{r^2}{\omega_0^2}} \cdot 2\pi r dr. \end{aligned} \quad (7)$$

选取 $\omega_0 = 0.588 \times r_0$ (见文献[3]), DCN 波导激光器的内半径 $r_0 = 25\text{mm}$, 峰值波长 $\lambda = 0.195\text{mm}$, 可以得到 $A_0 = 0.908$, $A_1 = 0.087$, $A_2 = -0.109$, $A_3 = -0.0052$, $A_4 = 0.0364$, $A_5 = 0.0252$, $A_6 = 7.708 \times 10^{-4}$, $A_7 = 0.0140$, $A_8 = 0.0149$ 。这样 EH_{11} 模 98% 以上的能量将辐射到腰束 $\omega_0 = 0.588 \times r_0$ 的基模高斯光束中,且前 6 阶高斯光束的总能量已经达到 EH_{11} 模总能量的 99.91%, 所以我们仅选取前 6 阶的拉盖尔—高斯光束来叠加 EH_{11} 模的电场分布。

我们得到 $E(z) = \sum_0^6 A_p \Psi_p e^{i\varphi}$, 其中 $\Psi_p = (2p+1) \arctg \frac{\lambda z}{\pi\omega_0^2}$ 为沿 z 方向上各阶高斯模的相位差

(已省略其相位中相同的部分). 这样由 $I = E \cdot \bar{E}$, 通过上述数值计算, 可以从理论上得到耦合后的多阶高斯光束沿 z 方向传播时的近场和远场的光强分布 (见图 2), 以及光斑半径 (光强 $= \frac{I}{e}$ 处光场离 z 轴中心的距离) 随 z 轴的变化曲线.



水平二维轴单位为 mm; 纵轴以 EH_{11} 模中心光强单位为 1

图 2 沿 z 方向传播的拉盖尔—高斯光束光强分布

用高斯光束来描述波导管中 EH_{11} 模在自由空间中的传播规律, 得知在光轴附近 (光斑半径以内), 零阶高斯光波所占能量份额达到 99.0% 以上 (见表 1), 而传播 10m 左右后的光强分布已十分接近于高斯分布. 通过理论上的数值计算, 很好地得到了波导 DCN 激光光束从波导传播到自由空间后的多阶高斯光束在不同距离的光强分布. 数值计算将与实验结果进行对比.

表 1 在光轴附近零阶高斯光波所占光能份额

z/m	0	0.5	0.7	1.1	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	15.0	20.0
0 阶高斯模占前 6 阶高斯模的能量份额 / %	0.9914	0.9913	0.9914	0.9916	0.9914	0.9901	0.9913	0.9917	0.9916	0.9919	0.9918

3 实验分析

为了测量波导 DCN 激光器输出光束的光强分布, 我们把探测器固定在一个沿轴向和光斑径向可以自由移动的装置上. 实验装置光路如图 3 所示.

图 3 中使用的是对远红外波段具有高灵敏度的 TGS 热释电探测器. 当探测器位于激光器外的近场 ($Z < 4m$) 时, 探测到的信号包含基本的高斯模和一系列更高阶的谐振模, 所以, 在 $Z = 0.5m, 0.7m,$

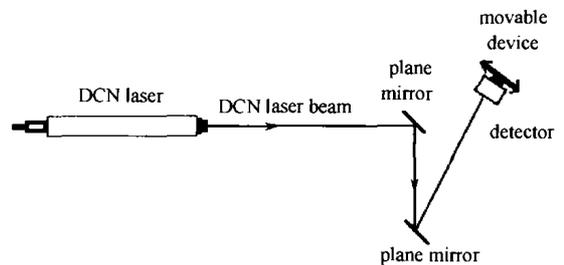


图 3 DCN 激光器输出特性实验示意图

0.9m、1.1m 和 2m 处得到的光强分布并不是高斯分布曲线(见图 4).随着光束传播距离的增加,高阶拉盖尔-高斯模的能量逐渐衰减(例如,在 $Z = 4\text{m}$ 处).由实验数据分析得知,远场分布是很好的高斯分布,束腰半径约为 10.5mm,束腰位置 $Z = 0.01\text{m}$,基本与理论(束腰半径 10.34mm,束腰位置 $Z = 0.0\text{m}$)曲线符合(见图 5).理论分析很好地解释了波导 DCN 激光器输出光束的近场和远场特性.EAST 托卡马克装置的远红外激光干涉仪光程达数十米,这个远场实验数据(束腰半径 10.5mm,束腰位置 $Z = 0.01\text{m}$)表征了波导 DCN 激光器的输出特性,它将用于光学设计和进一步研制多道 DCN 远红外激光干涉仪.

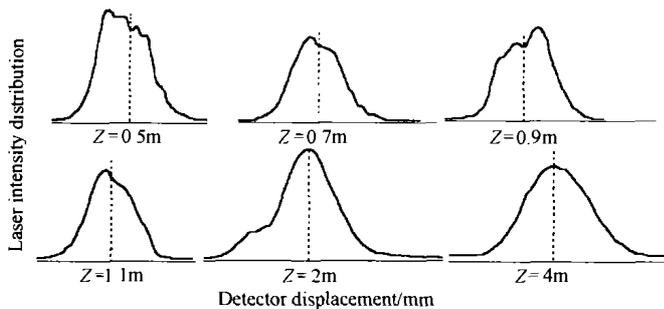


图 4 DCN 激光器输出光强近场分布实验值

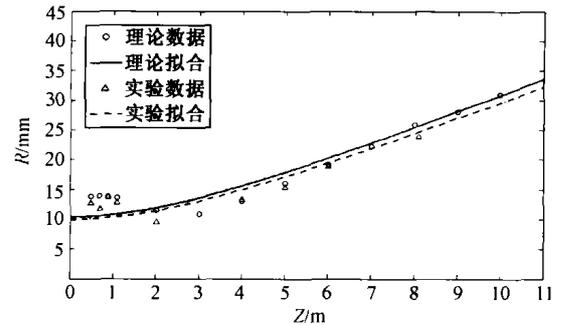


图 5 光斑半径随 z 轴变化的理论值与实验值的比较

4 结论与讨论

为了用远红外技术准确测量出等离子体的密度,必须掌握波导 DCN 激光器输出激光的传播特性,从理论上计算出激光的光场分布.采用高斯耦合方法,用数值计算得到了 DCN 激光器发出的激光在远场和近场束腰的位置、半径和光强大小.在 DCN 激光器上做了一系列的实验,所得到的实验结果($r_0 = 10.5\text{mm}$, $Z_0 = 10\text{mm}$)与理想模型估算所得的结果基本符合.

但从图 4 所示测得的数据看,光强在近场出现了一些不对称的分布,这与计算结果是不完全吻合的.出现这种现象,可能是以下 3 种原因导致的:(1)光学波导腔并非十分规则的圆波导,若是有一定的椭圆度^[4]或有不规则的结构,输出的光就可能会有一定的离轴特性,造成光强分布沿着 Z 轴作螺旋式旋转^[5];(2)由于实验时只采用了一维测量的方法,没有对整个激光作二维的测量,不能非常准确地反映出光强随 r 的变化情况;(3)由于激光器在出光时功率不够稳定,给实验带来一定影响,造成数据的偏差.

本文研究得到了中国科学院等离子体物理研究所揭银先、高丽、凌必利、徐强等同志的帮助,在此表示感谢.

References

- [1] Gao X, Lu HJ, Guo QL, *et al.* Far-infrared laser diagnostics on the HT-6M tokamak. *Rev. Sci. Instrum.*, 1995, 66(1):139 ~ 142
- [2] Ma YW, Chen YQ. *Laser Instruments*. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2002 (in Chinese)
- [3] Rebuff L, Crenn JP. Radiation patterns of the EH_{11} mode and Gaussian approximations. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1989, 10(3):291 ~ 311
- [4] Wang BS, Li S, Wang Y, *et al.* Eigen modes on elliptical waveguide. *Journal of electronics*, 2003, 31(3):1 ~ 5 (in Chinese with English abstract)
- [5] Shen XM, Wang SM. Study of off-axis elliptical Gaussian beams. *Optoelectronics and Laser*, 2004, 15(2):233 ~ 237 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- [2] 马养武, 陈钰清. 激光器件. 杭州: 浙江大学出版社, 2002
- [4] 王百锁, 李 森, 王 演, 等. 椭圆波导中的本征模. 电子学报, 2003, 31(3):1 ~ 5
- [5] 沈晓梅, 王绍民. 离轴高阶椭圆高斯光束. 光电子与激光, 2004, 15(2):233 ~ 237

Theoretical Analysis and Experimental Study of the Beam Property of Wave-Guide DCN Laser

LIU Meng-Kun¹ GAO Xiang²

(1 Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China;

2 Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract The principle and structure of DCN laser were introduced in this paper. The EH_{11} mode approximation in the near field and the far field by Gaussian distributions and the beam property of DCN laser were studied in detail. The theoretical work well fitted the experimental data. This work is important and necessary for further optical design for EAST tokamak FIR laser interferometer.

Key words wave-guide DCN laser, EAST superconducting tokamak, far field and near field, Gaussian approximation