

文章编号: 1001-3806(2006)01-0064-03

太赫兹连续波 DCN 激光器的实验研究

高翔, 刘海庆, 揭银先, ASFM, 高丽, 刘瑾, 童兴德, 程永飞

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘要: 介绍了运行在 1.54THz(195 μ m)和 1.58THz(190 μ m)的波导型辉光放电激励的大功率连续波 DCN 激光器的开发和研制工作。该激光器的谐振腔长 3.4m, 放电长度 3m, 谐振腔由耐热玻璃制成, 直径 54mm。谐振腔一端为平面反射镜, 一端为金属栅网。工作气体为 N₂, CD₄ 和 He(或 D₂) 的混合气体, 在 1.54THz 的连续激光输出功率大于 0.2W。实验中对放电电流、激光管温度、气压等参数进行了优化, 研究了 EH₁₁ 模 DCN 激光在自由空间的传输特性。研究表明, 利用新的 N₂, CD₄ 和 D₂ 混合气体的太赫兹 DCN 激光器可以得到稳定连续的高功率放电。光束传输远场满足高斯分布 ($z > 4m$), 对各种参数进行优化后, 190 μ m 和 195 μ m 窗口处输出 EH₁₁ 模功率分别为 0.15W 和 0.16W, 可以满足超导托卡马克连续运行的干涉测量的需要。

关键词: 激光技术; 太赫兹激光; DCN 激光器; 输出功率优化; 传输特性

中图分类号: TN248.2 **文献标识码:** A

Experimental study of THz CW high-power DCN laser

GAO Xiang, LIU Hai-qing, JIE Yin-xian, ASIF M, GAO Li, LIU Jin, TONG Xing-de, CHENG Yong-fei

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

Abstract A CW THz waveguide discharge-pumped high-power DCN laser operating at 1.54THz(195 μ m) and 1.58THz(190 μ m) is developed with 3m discharge length and 3.4m resonator length. The resonator cavity consists of a pyrex tube of 54mm diameter and two plane reflectors against its ends. One end is a plane mirror, the other is a metal mesh. The mixture gas of N₂, CD₄ and He(or D₂) is used in DCN laser. The laser output power is 0.2W at the 1.54THz. Optimization of various parameters such as the pressure, the discharge current and the wall temperature are studied in experiments. The free space propagation of the EH₁₁ mode of DCN laser is observed. Our experimental study has shown the feasibility of THz high-power CW discharge-pumped DCN waveguide laser with new mixture gas N₂, CD₄ and D₂. The beam profile is found to be qualitatively Gaussian in the far field ($z > 4m$). After optimization of various parameters, this laser delivers 0.15W and 0.16W on the 190 μ m and 195 μ m lines respectively for EH₁₁ mode. It fits the requirements of interferometric measurements on superconducting tokamaks for long time operation.

Key words laser technique; THz laser; DCN laser; optimization; output power; propagation property

引 言

太赫兹激光具有优良的穿透性, 在国防、医疗、科研等领域有着重要的应用, 例如高温等离子体诊断、医疗诊断、农业、流体动力学、水资源、环境保护、宇航考察、大气监测、光通信及工业材料的质量检测与控制、集成电路、包装检查等^[1]。尤其是 0.89THz(337 μ m) HCN 激光器, 在高温等离子体诊断领域已得到多年成功应用^[2]。高密度等离子体研究是热核聚变研究的

核心问题。聚变等离子体密度可以通过利用太赫兹激光器及其干涉仪测量。为了适应高温等离子体诊断发展的需要, 新的高功率连续波激光器已经被成功研制^[3]。在已知各种太赫兹辉光放电激励激光器中, DCN 激光器具有高的单一模式输出功率。它的输出特征适合大型托卡马克等离子体的干涉测量。基于此, 作者对运行在 190 μ m 和 195 μ m 这两个波段的辉光放电激励的连续波 DCN 激光进行了研究。在连续波运行中, 这种激光器产生的两种波长输出的功率优于 HCN 激光器。

1 激光器系统

直流电激励连续辉光放电的大功率波导型远红外 DCN 激光器的结构示意图见图 1。其结构与 HCN 激光器相似^[2]。放电管由耐热玻璃制成, 直径 54mm, 长 3.4m, 放电长度为 3m。放电管外面装有油套冷却系

基金项目: 中国科学院综合计划局 2004 年 ~ 2005 年度仪器研制和改造基金资助项目 (Y2003001)

作者简介: 高翔 (1965-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事等离子体物理、托卡马克实验、高温等离子体诊断、远红外激光和光学系统研究。

E-mail: xga@ipp.ac.cn

收稿日期: 2004-11-30 收到修改稿日期: 2005-09-20

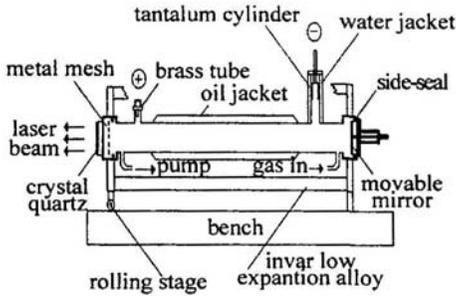


Fig 1 Schematic diagram of the DCN laser

统,油套内灌 20# 甲基硅油,油温由超级恒温器控制。整体安装在光学平台上。

图 2 是正在放电的 DCN 激光器的照片。DCN 激光器的谐振腔为波导型谐振腔,采用平面腔形式。腔

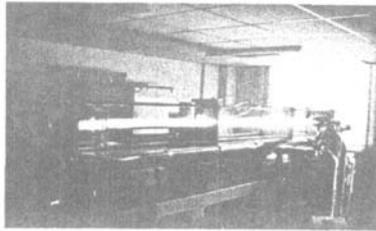


Fig 2 A photo of the DCN laser

的一端是镀金的平面反射镜,玻璃基底,用千分尺调节反射镜的水平位移,用螺钉调节其角度,以得到所需的激光模式和稳定、理想的激光输出功率。用 4 根直径 25mm 的因瓦合金将激光管紧紧地连成一体,这样,激光器具有一定的热稳定性和机械稳定性。在金属网前 5mm 处平行地安装 5 根直径 50 μ m 的钨丝,这样就可以得到线偏振的激光输出,偏振方向垂直于钨丝。腔的另一端用金属镍网作耦合输出。输出窗口用 X 切石英片密封。它的透过系数大于 0.95^[4]。辉光放电的两个电极用黄铜或其它材料做成,内衬有低溅射率的稀有金属或其化合物,其中在阴极外考虑装水循环冷却系统。为了延长放电管的寿命,将阴极通过一个过渡的玻璃管与放电管相接。电源为一台 20kW 高压恒流源,输出电流在 0.5A ~ 2.0A 范围内连续可调,输出电压在 2.5kV ~ 7kV 内变化。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。工作气体或清洗气体由多路流量计控制进入放电管。DCN 激光器工作物质为氘化甲烷、氮气和氦气(或氖气)的混合气体。

2 输出功率优化

激光器放电过程中,DCN 分子由 N₂ 和 CD₄ 通过化学反应产生,同时可以用氦气作为稳定气体。这样可以得到稳定的放电,输出功率明显改善^[5]。工作气体为 N₂, CD₄ 和 He 的混合气体,在 1.54THz 的连续激光输出功率大于 0.2W。但是氦气条件下,管壁会产生棕色沉积物,连续运行几十小时后必须开腔清洗,不

能满足连续运行的需要。通过实验,发现用 D₂ 代替氦气可以很好地清除棕色沉积物。因此在 DCN 激光器中使用了全新的氮气、氘化甲烷和氖气的混合气体(N₂, CD₄, D₂)作为工作气体。经过长时间的放电,没有沉积物产生。证明这种方法是有效的。为了得到最大输出功率,对激光器参数进行了大量的优化。

2.1 输出窗口和气体配比

激光输出窗口用 X 切石英片,选择厚度为 5.1934mm,使 190 μ m 和 195 μ m 有最大的透过率。更重要的是对金属栅网的反射系数和透射系数的选择,以获得最大的激光增益。最终使用了 750 line/inch 的镍网,对 190 μ m 和 195 μ m 有 7% 的透过率。在恒定的放电电流和管壁温度条件下, V(N₂):V(CD₄):V(D₂) = 4:5:20 时得到最大功率。

2.2 壁温、压力、电流

在优化的气体配比条件下,对输出功率与壁温、压力、电流关系进行了测量。发现最佳的壁温是 145 $^{\circ}$ C,如图 3 所示。在恒定的气压和管壁温度条件下,放电电压 4.5kV,放电电流 0.8A 时得到最大输出功率,如图 4 所示。激励电场强度 15V/cm。其它参数固定,气压 60Pa 时输出功率最大,如图 5 所示。

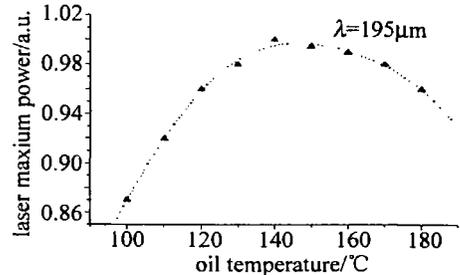


Fig 3 Output power versus oil temperature ($I = 0.7A, p = 55Pa$)

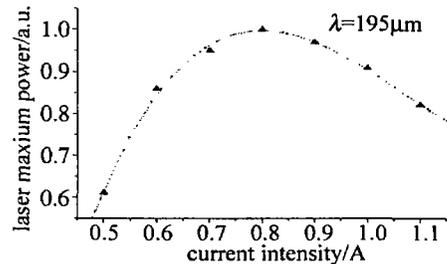


Fig 4 Output power versus discharge current ($T = 145^{\circ}C, p = 55Pa$)

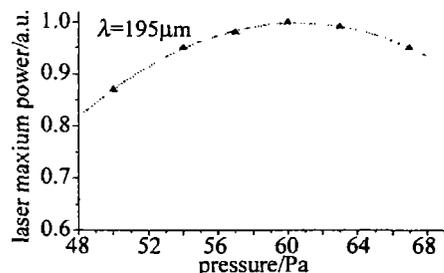


Fig 5 Output power versus pressure ($T = 145^{\circ}C, I = 0.8A$)

实验中同时测量 190 μ m 和 195 μ m,每个波长达到

功率最大值条件相同,只是 190 μm 的功率比 195 μm 稍小。在以上的优化工作条件下,对应 190 μm 和 195 μm 利用绝对热量计测得窗口处输出低阶 EH₁₁模功率分别为 150mW 和 160mW,与用氦气相比^[3,5],输出功率稍小,但连续运行没有沉积物产生。

3 传输特性

3.1 输出模式

根据能级图(见图 6),直流电激励连续辉光放电

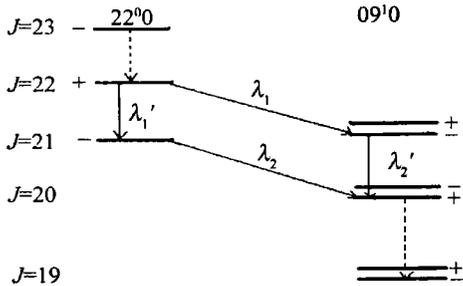


Fig 6 Energy levels of the DCN molecule

的大功率波导型远红外 DCN 激光器可以产生 4种波长的激光^[6]: $\lambda_1 = 194.70\mu\text{m}$, $\lambda_1' = 194.76\mu\text{m}$, $\lambda_2 = 189.95\mu\text{m}$, $\lambda_2' = 190.01\mu\text{m}$ 。理论上,空心圆波导激光器的波导模有 3类,其中低阶 EH₁₁波导模最强,DCN 激光器内部模式复杂,改变谐振腔的腔长,可以观察到不同模式的激光输出。当用千分尺调节反射镜的水平位移从而调节腔长时,可以看到输出功率随腔长变化。如图 7所示。每个峰值对应谐振腔中的某一个(或多个)模式激光,平面镜每移动半个波长峰值重复出现。

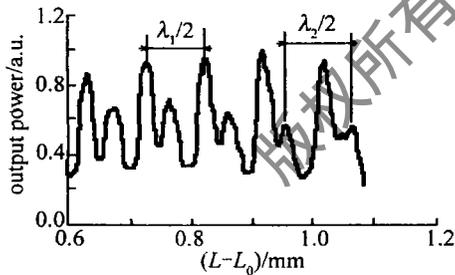


Fig 7 Output modes in the DCN laser

通过调节镜子位置测量 10个周期的输出功率,可以观察到 190 μm 和 195 μm (见图 7)。根据每两个峰值间的距离,可以确定 λ_1 是 195 μm , λ_2 是 190 μm 。

3.2 束腰和强度分布

为了进一步设计 DCN 激光干涉仪,必须研究 EH₁₁模在自由空间的传播特性和光束的强度分布,所以,固定探测器在一个可以在垂直光束方向均匀移动的机械装置上进行测量。实验安排如图 8所示。

用 z 表示观测点到输出金属栅网的距离,在近场区 ($z < 4\text{m}$),探测到的信号包括基本的高斯模和一些高次模。从图 9中可以看到,在 $z = 0.5\text{m}, 0.7\text{m}, 0.9\text{m}, 1.1\text{m}, 2\text{m}$ 处,辐射强度剖面不仅仅有基本的高

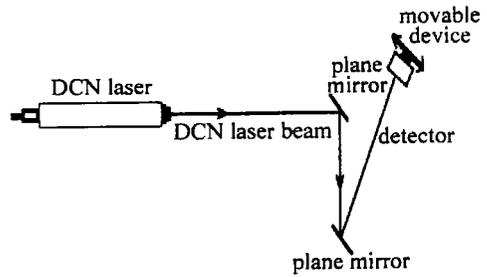


Fig 8 The experiment arrangement for the output beam measurement

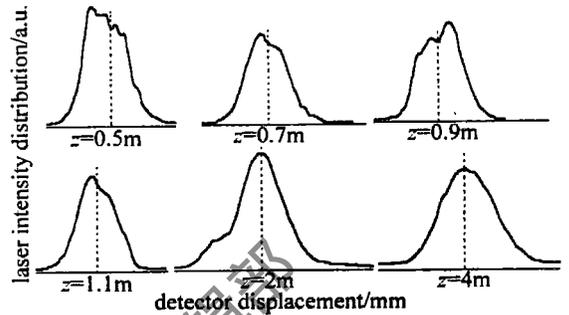


Fig 9 The intensity distribution of laser in near field

斯模,随着光束传播距离的增加,高次模的强度逐渐减少,在 $z = 4\text{m}$ 时高次模强度已经很小。所以,远场光束成为严格的高斯光束^[7]。图 10中给出了 DCN 激光器上的实验结果,图中实线是高斯拟合曲线,点为实验

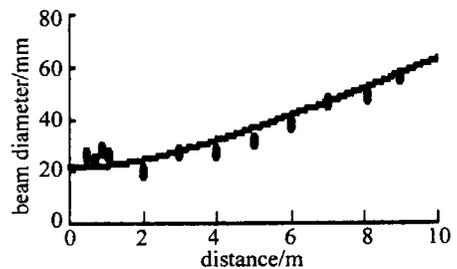


Fig 10 Beam width at 1/e intensity as a function of distance from the mesh output coupler

数据。在几米外的远场侧得到的分布为很好的高斯分布,而离输出窗 2m 距离之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的传播方程^[8]: $d = [d_0^2 + (4\lambda^2/\pi^2)(z - z_0)^2 d_0^2]^{1/2}$ (1) 对实验数据最小二乘拟合,得到光束束腰 $d_0 = 2\text{mm}$,束腰距输出窗的距离为 $z_0 = 0\text{mm}$,束腰与波导直径之比 $d_0/a = 0.41$,这与 REBUFFI^[9]理论计算所得的 $z_0 = 0, d_0/a = 0.421$,符合得很好。

4 结 论

开发和研制了运行在 1.54THz (195 μm)和 1.58THz (190 μm)的大功率连续波 DCN 激光器^[3,10-12]。当该激光器工作气体为 N₂, CD₄ 和 He 的混合气体时,在 1.54THz 的激光输出功率大于 0.2W。研究表明,利用新的 N₂, CD₄ 和 D₂ 混合气体的太赫兹 DCN 激光器可

2.3 耐磨性

TiAl 合金预涂 NiCr-50% Cr₃C₂ 合金在不同扫描速度下激光熔覆涂层的室温干滑动磨损相对耐磨性分别为 1.15、1.90、1.52 (对应的激光束扫描速度分别为 1.50mm/s、2.00mm/s、2.67mm/s)。可见, 预涂 NiCr-50% Cr₃C₂ 合金粉末激光熔覆涂层的耐磨性, 在扫描速度为 2.00mm/s 时为最好。一般地, 材料的硬度在很大程度上体现了该材料的耐磨性能, 随着扫描速度的增加, 熔覆涂层内的组织逐渐变得细小, 同时熔覆层内固溶体的过饱和度明显增加, 起到了固溶强化的作用, 这些都不同程度地提高了熔覆涂层的硬度; 这也使得在相对较低的扫描速度范围, 随着扫描速度的提高, 涂层的耐磨性也随之提高。继续增大扫描速度, 在本文中的扫描速度范围内, 整个熔覆涂层内的增强相 Cr₇C₃, TiC 呈更加均匀细小的分布状态, 这无疑会进一步增加该熔覆涂层的硬度值; 但有资料表明^[9], 在以轻微显微切削为主导机制的磨损条件下, 初生碳化物的过分细化, 尽管涂层的硬度提高, 但过细的碳化物导致其在磨损过程中抵抗显微切削的能力降低, 使得其优异的抗磨作用不能得到应有的发挥, 因而表现为在 $v = 2.67\text{mm/s}$ 的扫描速度下得到的熔覆涂层的耐磨性反而比 $v = 2.00\text{mm/s}$ 的扫描速度下得到的熔覆涂层有所下降。

3 结论

激光束扫描速度对 γ -TiAl 合金预涂 NiCr-50% Cr₃C₂ 混合粉末激光熔覆复合材料涂层组织与耐磨性能有明显影响。随着激光束扫描速度的提高, 涂层显

微组织有逐渐细化的趋势, 显微硬度有所提高, 而涂层厚度则有所降低。在中等扫描速度下 (2.00mm/s) 获得的涂层具有最好的滑动磨损耐磨性。

参 考 文 献

- [1] YE H Q. Recent developments in Ti₃Al and TiAl intermetallics research in China [J]. Material Science Engineering 1999, A263: 289 ~ 295
- [2] YANG R, CUI Y Y, DONG L M *et al* Alloy development and shell mould casting of gamma TiAl [J]. Journal of Material Processing Technology, 2003, 135: 179 ~ 188
- [3] YOSHIMURA M, SUZUKI T, TANAKA R. Improvement of oxidation resistance for TiAl by surface treatment under a low partial pressure oxygen atmosphere and Al diffusion coatings [J]. The Iron and Steel Institute of Japan International 1991, 31: 1201 ~ 1206
- [4] XU D, ZHANG Z, LIU X *et al* Improvement of oxidation resistance of TiAl by ion-beam-enhanced deposition coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 1994, 66: 486 ~ 494
- [5] LIU X B, YU L G, WANG H M. Microstructure and properties of laser surface alloyed γ -NiCrAl/TiC/Cr₃C₂ composite coatings on γ -TiAl intermetallic alloy [J]. Rare Metal Materials & Engineering 2001, 30 (3): 224 ~ 227 (in Chinese).
- [6] LIU X B. Laser cladding for high-temperature wear resistant composite coatings on γ -TiAl alloy [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics 2001, 17 (in Chinese).
- [7] ZHANG W P, MA Y T, LIU S H. Microstructural characterization of in situ formed composite coating produced by laser cladding [J]. Laser Technology, 2005, 29(1): 38 ~ 39, 55 (in Chinese).
- [8] TIAN Y S H, CHEN C H, ZHANG D Y *et al* Analysis of the growth mechanism of TiC crystal and the mechanical properties of the laser alloyed layer on the surface of pure titanium [J]. Laser Technology 2005, 29(2): 113 ~ 115, 137 (in Chinese).
- [9] WU X W, ZENG X Y, ZHU P D. Research on laser clad metal ceramics technology [J]. Metal Heat Treatment 1992, 4: 40 ~ 43 (in Chinese).
- [10] MAK I A. Assignment of some DCN and HCN laser lines [J]. A P L, 1968, 12(4): 122 ~ 124.
- [11] BRUNEAU J L, BELLAND P, VERON D. A CW DCN waveguide laser of high volumetric efficiency [J]. Opt Commun 1978, 24: 259 ~ 264.
- [12] KOEGLIN K H, LIT. Laser beams and resonators [J]. Proc IEEE, 1966, 54(10): 1312 ~ 1329.
- [13] REBUFFI L, GRENN J P. Radiation patterns the H E₁₁ mode and Gaussian approximations [J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves 1989, 10(4): 291 ~ 311.
- [14] LU H Q, GAO X, JIE Y X *et al* Optimization and maximum output power of CW DCN laser [J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves 2004, 25(4): 649 ~ 655.
- [15] ASIF M, GAO X, JIE Y X *et al* Experimental study with LaB₆ cathode on DCN laser [J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves 2004, 25(5): 809 ~ 813.
- [16] GAO L, GAO X, HU X W *et al* The beam property of DCN laser [J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves 2004, 25 (6): 891 ~ 895.

(上接第 66 页)

以得到稳定连续的高功率放电。光束传输远场满足高斯分布, 对各种参数进行优化后, 190 μm 和 195 μm 窗口处输出 EH₁₁ 模功率分别为 0.15W 和 0.16W。可以满足超导托卡马克连续运行的干涉测量的需要。

参 考 文 献

- [1] RAN Y, LIT Q, QIN J Y. Reahn and foreground of application of millimeter waves laser [J]. Laser Technology 2000, 24(6): 392 ~ 395 (in Chinese).
- [2] GAO X, LIU H J, GUO Q L *et al* Infrared laser diagnostics on the HT-6M tokamak [J]. Rev Scient Instrum, 1995, 66(1): 139 ~ 142.
- [3] JIE Y X, GAO X, LIU H Q *et al* Design of CW high-power discharge-pumped DCN laser [J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves 2003, 24(12): 2079 ~ 2083.
- [4] VERON D. Infrared and millimeter waves [M]. New York: J L Bruneau, 1979: 67 ~ 135.
- [5] VERON D, BELLAND P, BELLAND M J. Continuous 250mW gas discharge DCN laser at 195 μm [J]. Infrared Physics 1978, 18(5): 465