

封离式 He-N₂-CO₂ 激光器横模特性的测量与分析^{*}

王文鹏 许周速 徐 军 陈 钢[†]

(浙江工业大学应用物理系 杭州 310023)

(2008 年 10 月 24 日收到 2008 年 12 月 12 日收到修改稿)

利用激光光束分析仪,实时在线测量了一根 He-N₂-CO₂ 封离式激光管的横模分布特性,得到了激光模式随放电电流的变化关系.实验表明该激光器在最佳工作电流时,容易形成低阶模运转,但很难获得基模运转,通过改善对称性以及加快冷却水流速可以获得基模运转.通过激光动力学过程分析了模式变化的形成原因,为大功率激光器模式控制与改善提供了一定的理论和实验借鉴.

关键词:CO₂ 激光,横模,激光模式分析,光束质量

PACC:4255D,4230S

1. 引 言

百瓦级的封离式 CO₂ 激光器具有光束质量好、体积小、不需补气的优点,极大地方便了应用.在激光加工领域主要用于非金属材料的熔覆、雕刻、打标、激光模具制造等,另外在激光医疗领域也有非常广泛的应用.商品化的封离式 CO₂ 激光管在制作时都追求基模运转,以提供较高质量的光束.但由于制造中的人为因素、前后腔镜光轴失调以及放电管长期使用变形等诸多因素,加上工作条件的改变,使得输出的激光束很难保持基模运转,从而影响激光功率和光束质量.因此有必要明确工作参量对模式变化的影响,以保证激光器稳定地工作于基模状态.

为了直观地了解某个激光器的横模特性,从早期的热成像、激光烧蚀、线性扫描^[1-4]到现在的专用激光模式分析仪,人们在实验上进行了许多尝试.计算机技术发展起来以后,利用 CCD 或者其他成像元件,将激光束横截面上的强度分布以二维或三维形式显示到计算机上,从而可以实时在线观测激光器运行时的光斑模式变化.本文利用美国 Spiricon 公司研制的焦热电镜头的大功率 CO₂ 激光光束分析仪测量了一根封离式 CO₂ 激光管的输出模式,并测量了不同工作电流情况下模式的变化,希望找出影响激光模式改变的因素,为大功率激光加工机的模

式控制与改善提供一定的借鉴.

2. 实验装置

实验中用到的封离式 CO₂ 激光管是经过遗传算法优化设计的平凹腔结构^[5,6],腔长 120 cm,电极间距 105 cm,放电管直径 1.1 cm,凹面镜曲率半径 $R_1 = 1000$ cm,气体总压强为 2.8 kPa,混合气体比例为 CO₂:N₂:He = 1:1:5.激光器工作电压 18 kV,工作电流 0—28 mA 可调.实验测量装置的布置类似文献 [7—9],激光光束分析仪放置在离输出镜 2 m 处,激光束从分析仪入射口进入,在分光镜上进行分光,99.7%的反射光从输出口反射出去,输出口用耐火砖挡住,0.3%的透射光再经过 1/100000 衰减到达焦热电探头进行数据采集,由光束分析软件处理得到实时的横模分布.焦热电探头为 LiTaO₃(钽酸锂)材料,探测器面积为 12.4 mm × 12.4 mm,每个单元大小为 85 μm,间距为 100 μm,共 124 × 124 个单元,每单元最小响应功率为 3.2 mW/cm².

3. 实验结果和分析

3.1. 基模光斑的测量与分析

该激光器实测最大输出功率为 74 W^[6],因此在

^{*} 全国优秀博士论文专项基金(批准号:200433)和浙江省自然科学基金(批准号:Y607472)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: gangchen@zjut.edu.cn

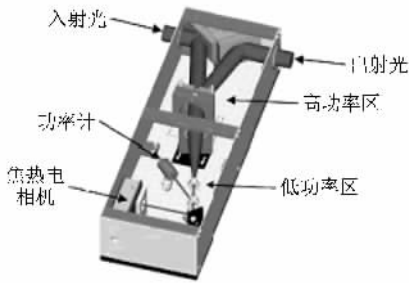


图1 激光光束分析仪采样系统

使用光束分析仪时不需要水冷. 实验先在标准运转布置下, 即冷却水下进上出, 阳极在上, 阴极在下这种情况下进行. 首先测量了基模运转的情况, 在改变电流大小的过程中, 发现激光器在刚出光电流为 5 mA 时, 能够获得基模运转, 如图 2(a) 所示. 此时激光器刚刚开始运转, 输出功率只有几瓦. 由于分析仪要对激光束进行较大的衰减, 因此观测到的光斑图样不是非常均匀, 主要是输入光功率太低造成的. 之后随着电流不断增大, 模式开始向复杂的高阶模式变化. 在最大电流附近, 模式又转变为低阶横模, 如图 2(b), 并能长期稳定运转. 观察电流增大过程中形成的高阶模, 发现其光斑形状并不是非常对称, 明显有些地方的光束被放电管遮挡了, 因此尝试着将激光管整体做了一些旋转, 在旋转到某个位置时, 光斑的轮廓呈现较好的圆对称.

这个改善说明在正常布置情况下, 腔镜、激光管以及激光束三者的光轴并不完全重合. 仔细观察放

电束发现, 由于电极引线是上下放置, 放电束在阴阳极附近出现上下方向弯曲, 因此整个放电束将稍微偏离放电管的轴向, 与之相关的激活区的粒子也将偏离放电管轴向, 所以在高阶模时出现光束不对称. 而当激光管连同腔镜整体旋转到某个位置时, 此时阴阳极附近放电束的弯曲不再是上下弯曲, 这可能会弥补腔镜的同轴性偏差, 进而使得光斑对称性增强. 在此基础上重新改变电流, 当电流增加到 25 mA 时, 光斑呈现出两个旁瓣的低阶模, 通过旋转整个激光管, 两个旁瓣不断重叠, 最后完全重合在一起, 可以看成是准高斯基模, 分析仪给出的光斑直径是 2.60 mm, 功率是 30 W. 但是这种方法实现的基模稳定时间不是很长, 一般几分钟后就变成两个旁瓣的低阶模.

在上面实验的启示下, 让激光器工作于小电流时, 通过旋转激光管也能容易地获得基模运转, 当电流在 5—15 mA 变化时, 激光管整体旋转到某一位置均可获得基模运转, 并且能够稳定运转. 实验测量了电流为 12 mA 时通过旋转激光管获得基模运转的稳定性, 在一个小时的实验测量过程中, 光斑模式、光斑尺寸都无明显变化, 激光强度有少许变化, 变化起伏最大值约 20%, 其光斑模式如图 2(c) 所示. 实验没有进行更长时间的稳定性测试, 但一个小时的稳定程度也可以说明激光管整体旋转可以改善光斑模式和光束质量, 从而弥补制造过程中造成的对称性欠缺.

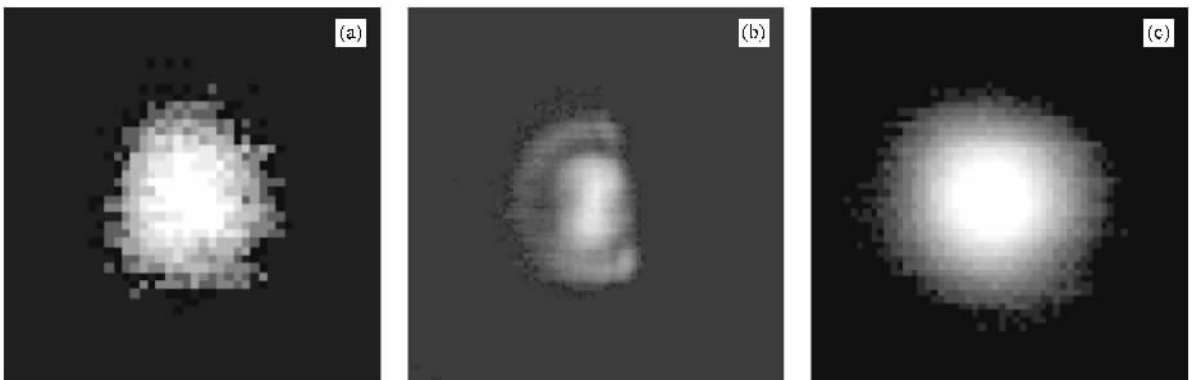


图2 基模强度图样 (a) 放电电流为 5 mA (b) 放电电流为 23 mA (c) 放电电流为 12 mA

从模式变化反映出的情况来看, 尽管激光器工作在较低电流时能够获得基模运转, 但是激光功率非常小, 放电也不是非常稳定, 因此不能够应用到实际. 而当激光器运转于较大电流时, 由于放电束的增大和激光管内平均气体温度的上升, 很难获得基模

运转, 得到的大多为中心有分裂的模式. 另外在标准运转布置下, 光斑轮廓有较大变形, 模式呈现不对称分布. 这主要是因为激光管、腔镜、激光束三者的轴线有少许偏离, 进而使得输出光斑出现明显的不对称. 这种现象在多数气体激光器中都存在^[10]. 基于

以上分析,在通过旋转激光管来改善对称性,以及增大冷却水流速来降低平均气体温度条件下,可以在中等电流下获得相对稳定的基模运转,而在大电流时,尽管可以获得基模,但稳定性不是很好.通过实验可以看到在封离式激光管的制造过程中,如果能够利用动态模式观测系统来调整腔镜的同轴性以及旋转对称性,将有助于制造出稳定的基模输出的激光管.同时还可以考虑用水泵的方式用较冷的水进行冷却,这都将有利于基模运转.

3.2. 工作电流与模式变化的关系

由于激光加工过程中对光束质量的要求越来越

高,输出光斑的模式及光束质量已成为许多激光器首要的参数.利用激光光束分析仪,测量了工作电流变化对激光输出模式的影响.电流变化范围从刚出光时的 5 mA 一直增加到最大值 28 mA.上面提到通过旋转激光管的方法可以改善光斑模式,但每一个电流对应的位置都不一样,因此下面的测量是在保证光斑模式比较对称时固定激光管位置的情况下进行的.当电流变化后,待激光器稳定运转,模式相对稳定后,再实时测量不同电流情况下的激光模式分布,结果如图 3 所示.

从图 3 可以看出,在 5 mA 的工作电流下,激光器运转于基模.随着电流增大,模式开始变得复杂,

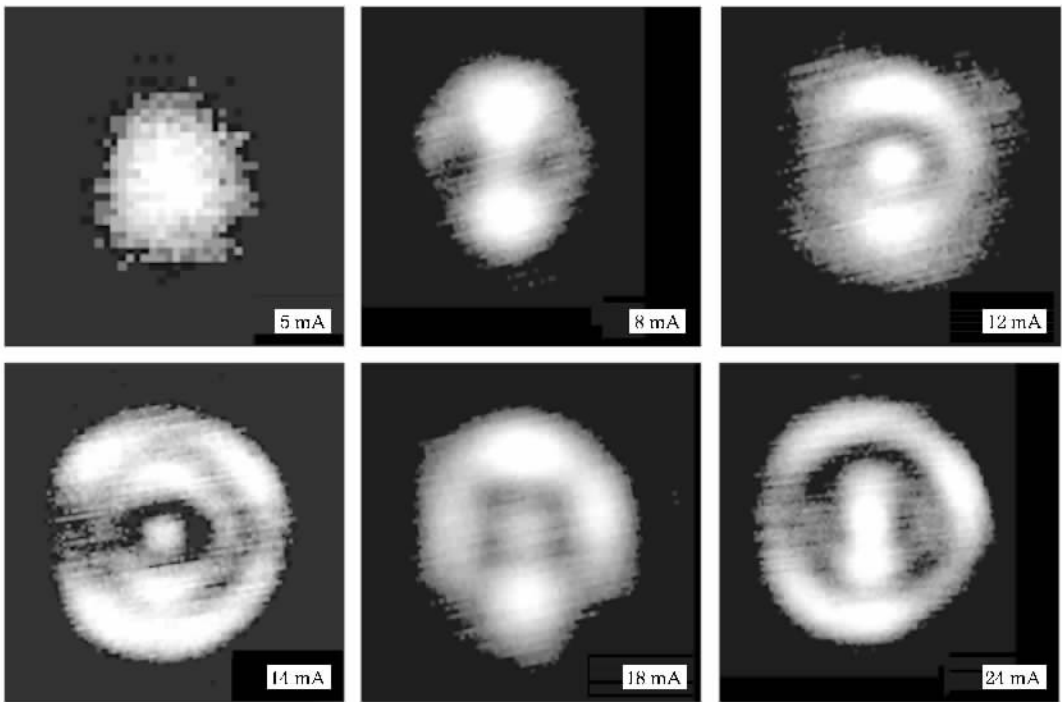


图 3 激光模式随工作电流变化关系

多数情况出现几种模式叠加而成的混合模^[1].激光横模的表示形式用文献中通常采用的形式,即用 $TEM_{p,l}$ 来表示圆形镜的横模分布,其中角标 p 代表放电管径向节线圆的个数, l 代表幅角方向的节线数.从图 3 中可以看到,电流为 8 mA 时,模式为 TEM_{01} 模;电流为 12 mA 时,模式为 TEM_{01} 模和 TEM_{00} 模的叠加.电流为 14 mA 时,光斑在径向有一个节线圆,幅角方向有两条节线,同时中心是亮的,找不出与单一的拉盖尔-高斯分布对应的模式,因此猜想是几个模式的叠加.经分析应该是 TEM_{00} 、 TEM_{01} 和 TEM_{12} 的叠加.当电流增加到 18 mA 时,模式又开始变得简

单,为 TEM_{02} 和 TEM_{00} 模的叠加.正如前面的分析,由于激光管和腔镜不是很严格地同轴,其模式并不是非常对称,如 TEM_{12} 模的中间旁瓣不是很清晰,但从其光斑尺寸的大小及径向、幅角方向分裂的数目可以认定为 TEM_{12} 模.

光束分析仪除了能够给出光斑的模式外,还可以得到各个模式的光强以及光斑直径等参量的大小.光斑直径为离出光孔约 2 m 处的光斑尺寸,光斑直径的定义采用了标准的二阶矩方法.光强为所有模式光强的叠加,对模式分析仪进行了功率定标,所以光强大小和功率有一一对应的关系.下面给出的

功率都是分析仪给出的相对功率大小,这个值比实际值要偏小一些,但不影响结果的讨论.图3给出的激光模式随放电电流的变化关系,虽然能够直观地体现模式的变化,但缺少具体的数值说明,下面利用光束分析仪得到的各个模式的具体参数,讨论工作电流与光斑直径以及功率的变化关系.

图4给出了光斑直径和输出功率随工作电流的变化关系.从图4可以看到,电流在5—14 mA的增大过程中,光斑直径不断增大.电流大于14 mA时有一个下降过程,到达18 mA以后光斑直径又开始增加,在电流为24 mA时达到最大值.对比图3,在光斑模式径向无分裂时直径较小,径向有分裂时光斑直径较大,而幅角方向的分裂对光斑直径的影响较小.实验结果表明随着电流的增加,光斑直径不断增大,从最小的2.60 mm增加到最大的6.91 mm.尽管在大电流时光斑直径变大,但其功率也是增大的,这主要是因为电流增大,放电束变粗,激活体积增大,高阶模得以振荡,相应功率增大.

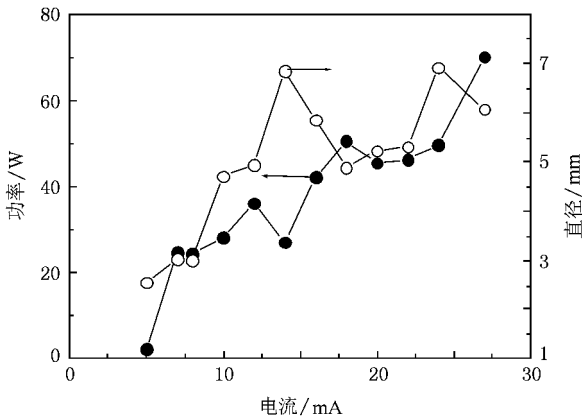


图4 放电电流对光束直径和输出功率的影响

从测量得到的光斑直径还可以看出,实验值和无源腔给出的理论值还是相差很大.按照谐振腔理论,该激光器等效的共焦腔长 $L_e = 650$ cm,其基模腰斑大小 $\omega_0 = 3.31$ mm,远场发散角 0.002 rad,基模传输到距离输出镜 2 m 测量位置时的光斑半径 $\omega_z = 3.8$ mm,而实测的基模直径只有 2.6 mm.由于在气体放电过程中放电束并不能充满整个放电管,因此基模的模体积要小很多,但各高阶横模大小和基模的比例关系却和理论值^[12]符合的比较好,如表1所列.从表1可以看到 ω_{02} , ω_{12} 与 ω_0 的比值接近理论值的 $(2p + l + 1)^{1/2}$,但 ω_{01} 与 ω_0 的比值与理论值偏离较大,一方面是因为 ω_{01} 的理论值本身就偏离理

论公式较大,此处的理论值也是经验数据,另一方面由于放电束的影响,不同工作条件下 TEM_{01} 模的光斑直径可能并不一样.

表1 高阶横模大小与基模的比例关系

横模阶次	理论值	实验值	ω_{pl}/ω_0
TEM_{00}	$\omega_0 = 3.31$ mm	2.60 mm	1.00
TEM_{01}	$1.50\omega_0$	3.00 mm	1.15
TEM_{02}	$1.77\omega_0$	4.70 mm	1.80
TEM_{12}	$2.64\omega_0$	6.91 mm	2.65

3.3. 模式变化机理

这些实验结果清晰地反映了工作电流对激光输出特性的影响,为了明确模式变化的动力学过程,有必要对其模式变化的机理进行了一些分析.有关 CO_2 激光动力学过程及时空耦合速率方程的研究已经比较完善^[13-15],借助这些理论我们可以从工作气体的温度分布对激光输出特性的变化进行一些讨论.封离式 CO_2 激光器多采用边界水冷的工作方式,管壁温度可近似地看作室温,即 $T_w = 300$ K.圆柱形激光管的横截面可看作径向分布,气体温度从边界到中心有一个分布,按照热传导方程,径向气体温度分布满足的热传导方程为^[16]

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(rk \frac{dT}{dr} \right) + q_v = 0, \quad (1)$$

式中 r 为径向离轴心的距离, k 为气体热导率,一般可表示为 $k = BT^a$,系数 a, B 为表述气体热导率的参数, q_v 代表输入激光管内的单位体积电功率,可表示为

$$q_v = I_d V_d (\pi R^2 l), \quad (2)$$

其中 I_d 为放电电流, V_d 为放电电压, R 为激光管半径, l 为电极长度.该方程经解析求解,可以得到不同径向位置的温度分布 $T(r)$ 和激光管内平均气体温度 T_{avg} 如下:

$$T(r) = \left(T_w^{1+\alpha} + \frac{1+\alpha}{4B} q_v (R^2 - r^2) \right)^{\frac{1}{1+\alpha}}, \quad (3)$$

$$T_{avg} = \frac{4B}{2+\alpha} (T(0))^{2+\alpha} - T_w^{2+\alpha} \left(q_v R^2 \right). \quad (4)$$

图5给出了管内平均气体温度随放电电流的变化关系,从图5可以看出,平均气体温度随着电流的增加而不断增加.由于 CO_2 激光 $10.6 \mu m$ 谱线的截止工作温度约为 480 K^[17],所以当电流一直增加到 18 mA 时,此时的平均气体温度达到 471 K,图5中

用一条直线标明了 480 K 的温度.从图 4 中可以看到,电流为 18 mA 时,激光功率有一个极大值,随后,当电流在 18—24 mA 时,功率维持一个相对稳定的值,当电流超过 24 mA 时,功率再次增加.当电流超过 19 mA 后,此时的平均气体温度已经超过了 480 K,但是功率不但没有下降,还继续保持甚至有一个上升的过程,这个现象需结合气体温度的径向分布和模式变化来进行说明.

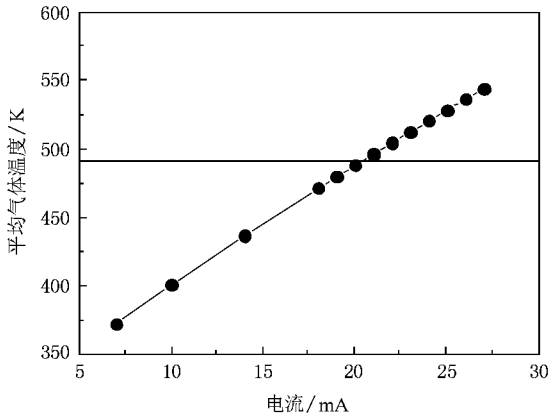


图 5 平均气体温度随工作电流变化关系

图 6 给出的是电流增加时激光管内径向气体温度的分布变化.从图 6 可以看出,随着电流的增加,激光管径向各位置的气体温度都不断增加.按照理想气体状态方程,激光管在径向不同位置处的基态粒子数密度可用公式表示为 $N_0(r) = P / (k_B T(r))$, 其中 P 为 CO₂ 气体压强, k_B 为玻尔兹曼常数.可见随着气体温度的上升,径向各位置处的基态粒子数密度都要下降,而中心处的 N_0 下降最快.由于不同模式利用不同空间的粒子数密度,基模的模体积最小,主要利用靠近轴线的粒子数密度.所以,当中心温度上升后,该处的粒子数密度就不断下降,基模的强度就开始下降.而高阶横模的模体积较大,能够利用远离轴向的粒子数密度.从图 6 可以看到,在离开中心的位置,其温度相对较低,此处基态粒子数密度较中心要高,因此有利于高阶横模的振荡.从具体数值来看,电流为 5 mA 时,中心温度约为 352 K,中心粒子数密度较高,激光器能够以基模形式运转.随着电流的增加,中心温度快速上升, N_0 下降,而其他位

置的基态粒子数密度下降缓慢,从而出现了 TEM₀₁ 模、TEM₀₂ 模等低阶横模与 TEM₀₀ 模的叠加.电流继续增加,中心附近温度将超过 480 K,基模强度下降,高阶模式开始形成,同时光斑尺寸不断增大,激光功率继续增加.当然这只是一个定性的分析,实际中各高阶横模的振荡还要考虑到衍射损耗、放电束的稳定性等因素.

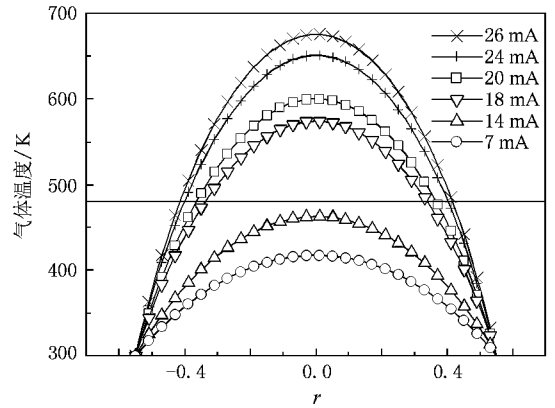


图 6 不同工作电流时径向气体温度分布

4. 结 论

利用激光光束分析仪,实时测量了一根 He-N₂-CO₂ 封离式激光管的输出光斑模式随放电电流的变化关系.结果表明,随着电流的增加,开始出现高阶横模,光斑尺寸不断变大.另外,由于制造过程造成腔镜、放电管和激光束三者的光轴不完全重合,在正常布置下输出光斑有较大畸变.通过激光管整体旋转可以弥补这一缺陷,从而改善输出光斑的光斑模式和光束质量.该方法在中等电流以下均能较容易地获得相对稳定的基模输出,功率约为最大值的一半以下,但在大电流时虽然也能获得基模输出,但稳定时间不长.结合激光动力学过程对光斑模式的变化进行了合理的理论分析,定性地指出了激光模式的变化主要是受到气体温度径向分布的影响.实验和理论分析结果可为封离式 CO₂ 激光管的加工提供一定的参考,同时为研究大功率 CO₂ 激光器的模式控制与改善提供借鉴.

- [1] Wang Y Z , Fu E S , Wang B , Li Y F , Shen G R , Chen L 1991 *Laser J.* **12** 237 (in Chinese) [王玉芝、付恩生、王 兵、李颖峰、沈桂荣、陈 磊 1991 激光杂志 **12** 237]
- [2] Xu Q H , Chen Y B , Meng Q Y , Li Q 1992 *Opt. Precis. Eng.* **128** 27 (in Chinese) [徐庆鸿、陈彦斌、孟庆友、里 强 1992 光学精密工程 **128** 27]
- [3] Gilse J V , Koczera S , Greby D 1991 *Proc. SPIE* **1414** 45
- [4] Hiraok D M , Weckman D C , Kerr H W 1994 *Meas. Sci. Technol.* **5** 1513
- [5] Cheng C 2002 *Acta Photo. Sin.* **31** 748 (in Chinese) [程 成 2002 光子学报 **31** 748]
- [6] Cheng C , Ma Y W 2002 *Laser Technol.* **26** 346 (in Chinese) [程 成、马养武 2002 激光技术 **26** 346]
- [7] Qi H , Mazumder J , Green L , Herritt G 2005 *J. Laser Appl.* **17** 136
- [8] Cheng C , Ma X C , Xu Z S , Wang W P , Yao J H 2008 *Chin. J. Lasers.* **35** 549 (in Chinese) [程 成、马行超、许周速、王文鹏、姚建华 2008 中国激光 **35** 549]
- [9] Yao J H , Fu J B , Chen J 2008 *Appl. Laser* **28** 25 (in Chinese) [姚建华、傅纪斌、陈 君 2008 应用激光 **28** 25]
- [10] Jiang J B , Cheng Z G , Li X Q , Xu G L , Shi H B , Zhao Q Z , Liu X 2001 *Chin. J. Laser* **28** 220 (in Chinese) [蒋金波、程兆谷、李现勤、许国良、石鸿斌、赵全忠、刘 欣 2001 中国激光 **28** 220]
- [11] Wang Z Y , Chen T , He P , Zuo T C 2000 *Chin. J. Laser* **27** 1075 (in Chinese) [王智勇、陈 涛、贺 平、左铁钊 2000 中国激光 **27** 1075]
- [12] Zhou B K , Gao Y Z , Chen T R , Chen J H 2004 *Principles of Laser* (5th ed) (Beijing : National Defence Industry Press) p62 (in Chinese) [周炳琨、高以智、陈侗嵘、陈家骅 2004 激光原理第五版 (北京 : 国防工业出版社) p62]
- [13] Cheng C 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 3069 (in Chinese) [程 成 2003 物理学报 **52** 3069]
- [14] Ding C L , Wan C Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1165 (in Chinese) [丁长林、万重怡 2006 物理学报 **55** 1165]
- [15] Chen G , Zhuang D W , Zhang H , Xu J , Cheng C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4953 (in Chinese) [陈 钢、庄德文、张 航、徐 军、程 成 2008 物理学报 **57** 4953]
- [16] Mao B N , Pan B L , Chen L , Wang Y B , Wang L M 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5813 (in Chinese) [毛邦宁、潘佰良、陈 立、王煜博、王丽敏 2007 物理学报 **56** 5813]
- [17] Ma Y W , Chen Y Q 2002 *Laser Devices* (Zhejiang : Zhejiang University Press) p59 (in Chinese) [马养武、陈钰清 2002 激光器件 (杭州 : 浙江大学出版社) p59]

Measurement and analysis of the characteristics of transverse modes of a sealed-off He-N₂-CO₂ laser^{*}

Wang Wen-Peng Xu Zhou-Su Xu Jun Chen Gang[†]

(Department of Applied Physics , Zhejiang University of Technology , Hangzhou 310023 , China)

(Received 24 October 2008 ; revised manuscript received 12 December 2008)

Abstract

The characteristics of the transverse modes of a sealed-off He-N₂-CO₂ laser are measured on-line by using a laser beam analyzer. The influence of the transverse modes on discharge current is observed. It is shown that this laser tube can easily operate on lower order modes under optimum discharge current but hardly operate on the TEM₀₀ mode. Under the condition of improved symmetry of laser tube and increasing the speed of cooling water , the laser can operate on the TEM₀₀ mode. The variety of laser modes is analyzed through the kinetic process theoretically , which is helpful to the control and improvement of laser mode for high power lasers.

Keywords : CO₂ laser , transverse modes , laser beam analyzer , beam quality

PACC : 4255D , 4230S

^{*} Supported by the Foundation for the Author of National Excellent Doctoral Dissertation of China (Grant No. 200433) , and the Natural Science Foundation of Zhejiang Province , China (Grant No. Y607472) .

[†] Corresponding author. E-mail : gangchen@zjut.edu.cn