

文章编号 1004-924X(2011)02-0407-07

TEA CO₂ 非稳腔激光器远场光束质量的评价

郭汝海, 张合勇, 王挺峰

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要: 研究了对虚共焦非稳腔结构的脉冲 TEA CO₂ 激光器远场光束质量进行评价的方法。首先将稳腔 TEA CO₂ 激光器加工改造成非稳腔结构; 然后从实际设计加工的数据出发, 用 3 种常用形式对其远场光束质量进行理论评价与分析, 并与设计的 2 kW 非稳腔激光器的实测远场光强分布实验结果进行了对比。理论和实验结果表明, 非稳腔能够获得接近衍射极限的高质量单模光束, β 因子是稳腔的 4 倍多; 在同等功率水平下, 采用非稳腔的激光器的远场功率密度是稳腔的 19 倍; 非稳腔较小的遮拦比能获得远场较高桶中功率。实验表明, 要全面地预测和评价所设计非稳腔激光器的光束质量, 需要根据实际, 综合地运用 3 种形式的理论评价体系。

关键词: 脉冲 TEA CO₂ 激光; 非稳腔; 远场光束质量

中图分类号: TN248.22 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111902.0407

Evaluation of far field optical quality of TEA CO₂ laser with unstable resonator

GUO Ru-hai, ZHANG He-yong, WANG Ting-feng

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun 130033, China)

Abstract: The evaluation methods for far field optical quality of a TEA CO₂ laser with a unstable resonator were researched. Based on the real data of the unstable resonator modified by the stable resonator of a high power TEA CO₂ laser, three common theoretical evaluation methods were conducted to evaluate the optical quality. Obtained results were compared with that from the far field optical intensity distribution of a designed 2 kW unstable resonator laser. The analysis and comparison show that the unstable resonator can obtain a near diffraction limit and a high optical quality beam and the β factor is 4 times that of the stable resonator. Under the same power level, the far field power density of the unstable resonator is 19 times that of the stable one. Furthermore, the smaller block factor can obtain a higher power in bucket for the unstable resonator. It is concluded that the comprehensive prediction and evaluation of designed unstable resonator need to synthetically use the three theoretical methods to complete.

Key words: pulsed TEA CO₂ laser; unstable resonator; far field optical quality

收稿日期: 2010-10-08; 修订日期: 2010-10-30.

基金项目: 中国科学院知识创新工程领域前沿资助项目

1 引言

非稳腔激光器由于能够产生高光束质量的激光而受到广泛重视,但是如何评价非稳腔输出光束的质量一直是激光研究者面临的重要问题^[1-3]。

通常认为光束质量是从光学本质上对激光光束特性进行的综合评价。从激光问世到发展至人们已提出过许多种评价参数,如聚焦光斑尺寸、远场发散角、 β 因子、斯特列尔比、光束参数积和 M^2 因子等。与稳定腔的输出特性的理论和实验研究相比,非稳腔输出的激光束特性的理论、实验研究尚不够完善,这给实验和工程应用带来一些困难,因此,用不同方法对不同类型非稳腔输出光束的质量进行实验测量并深入分析测量结果对非稳腔的设计和使用具有重要的意义^[4-6]。

目前,高功率脉冲 TEA CO₂ 激光器技术日益成熟,已在军事和工业领域得到了广泛应用^[7-8]。为了进一步改善其光束质量并保证较高的平均功率,现在非稳腔结构的应用受到了更多的关注。采用望远镜式虚共焦非稳腔结构不但可以得到足够大的模体积也能够保证输出光束的准直输出。目前流行的非稳腔理论计算的评价方式有以下 3 种^[9-11]:(1)远场发散角半径评价法;(2)桶中功率(PIB)曲线评价法;(3)光束衍射极限倍数因子评价法。

本文用以上三种理论评价方法对 TEA CO₂ 非稳腔参数进行了光束质量的评价并和实验结果进行了比较,为设计 TEA CO₂ 非稳腔激光器给出了一定可遵循的规律。

2 非稳腔的结构与参数

实验所用非稳腔为正分支的虚共焦型,原理结构如图 1 所示^[4]。

输出反射镜通过连接杆结合在透过率 99% 的 ZnSe 平面镜上,连接杆可微调腔长和平行度,为镜组装调带来了便利。

非稳腔光学元件的参数如表 1 所示。

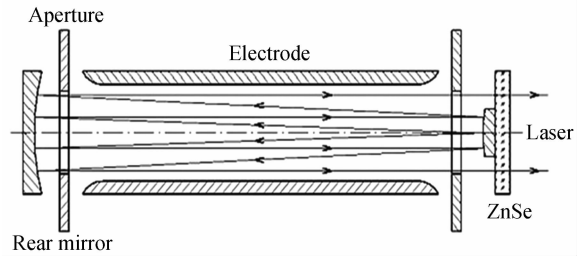


图 1 正分支虚共焦腔非稳腔

Fig. 1 Scheme of positive-band virtual confocal unstable resonator

表 1 非稳腔光学参数

Tab. 1 Optical parameters of unstable resonator

	$\lambda=10.6 \mu\text{m}$ 99.8% Reflectivity,
Rear mirror	$\Phi=42 \text{ mm}$, $R_1=1 \ 134$, 8 166, 7 500 mm
	$D=26.73, 20.81, 16.97 \text{ mm}$
Output mirror	100% reflectivity, $R_2=-7 \ 214.1, -4 \ 046, -2 \ 792.8 \text{ mm}$
Length of cavity	$L=2 \ 060 \text{ mm}$

一共是三组非稳腔镜,横向放大率: $M=\Phi/D=1.57, 2.02, 2.48$,

耦合输出率: $\delta=1-1/M^2$,

遮拦比: $\epsilon=1/M=0.6365, 0.4955, 0.4040$ 。

3 非稳腔光束质量的分析评价

3.1 理论分析

3.1.1 远场发散角半径评价法

大多数非稳腔的输出光束为环形,且具有被输出镜挡住的那部分光束所产生的零强度中心区,其中虚共焦非稳腔输出为一环形平行光束。波恩在光学原理一书中^[12],讨论了环孔光学系统的分辨率,得出环孔光束远场衍射光强分布:

$$I(\theta) = \frac{1}{(1-\epsilon^2)^2} \left[\frac{2J_1(k\theta a)}{k\theta a} - \epsilon^2 \frac{2J_1(k\epsilon\theta a)}{k\epsilon\theta a} \right]^2 I_0, \quad (1)$$

式中: a 为圆环外径; θ 为远场发散角; ϵ 为遮拦比; k 为波数; J_1 为一阶贝塞尔函数; $I_0 = |C|^2 \pi^2 a^4 (1-\epsilon^2)^2$ 为衍射光斑峰值强度

$$C = \frac{1}{\lambda R} \sqrt{\frac{E}{\pi a^2 (1-\epsilon^2)}},$$

式中 E 为光束总能量, R 为衍射孔到屏的距离。

下面用这个式子来讨论虚共焦非稳腔环孔激光光束远场衍射特性。在分析中改变 ϵ , 看远场分布特性的变化, 结果如图 2 所示。

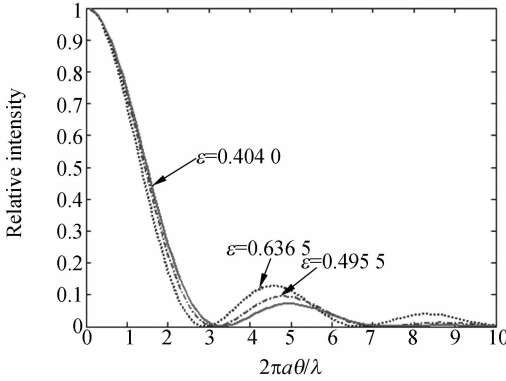


图 2 不同遮拦比下的非稳腔光强分布

Fig. 2 Optical intensity distribution under different block ratios

从图 2 中可以看出, 遮拦比越大对应的中心亮斑的内角半径越小, 这里定义在图 1 的光强分布图上光强的第一个极小值(即相对强度为零)的值为内角半径, 也就是对应 $\epsilon = 0.636 5$ 。图中最小的内角半径 $x = 2.9$, θ 为远场发散角半径(半角), 它的理论值可以计算得到

$$\theta = \frac{x}{ka} = \frac{2.9 \times 10.6 \times 10^{-3}}{2 \times 3.14 \times 42} = 1.16 \times 10^{-4}, \quad (2)$$

根据该理论值, 可以得到远场衍射光强分布中心亮斑占总能量的百分比:

$$P = \frac{\int_0^{2.9} 2\pi x I(x) dx}{\int_0^{\infty} 2\pi x I(x) dx} = 51\%, \quad (3)$$

由式(1)还可以得到遮拦比 $\epsilon \rightarrow 0$ 时, 理想平面波远场光强分布和环围能量百分比, 如图 3 所示。图中可以看到远场分布对应几个特征环围区域, 如 50%, 83.6%, 91% 和 93% 就是几个规范的能量百分比, 对应图中的 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 和 θ_4 。当测量远场光斑尺寸小于目标尺寸时, 这些数值对于远场衍射光强分布公式(1)是一种有益的补充, 这样就可以用一个“桶系列”中的能量多少来衡量能量集中度, 常用上述几个规范的能量百分比所对应

的光斑尺寸来评价实际的远场光束质量。

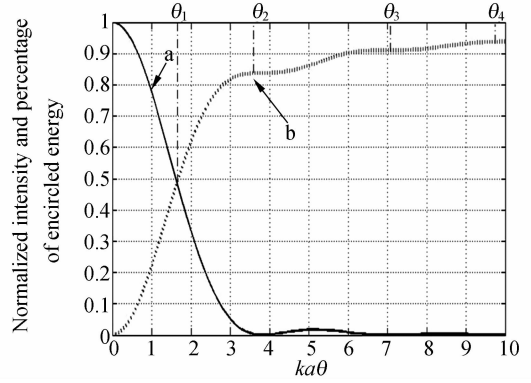


图 3 平面波的远场光强分布 a 和环围能量百分比 b

Fig. 3 Far field distribution a for plane wave and percentage of encircled energy b

3.1.2 桶中功率(PIB)曲线评价法

如果只关心非稳腔远场光束分布的能量集中度, 可用 PIB 曲线来评价非稳腔的光束质量。有两种方法: (1) 用某一确定发散角内的功率含量占总功率的百分比来评价非稳腔的远场光束质量。表达式为^[9]

$$P = \int_0^{\theta} I(\theta') \theta' d\theta' / \int_0^{\infty} I(\theta') \theta' d\theta' = \frac{2\pi^2 a^2}{\lambda^2 (1 - \epsilon^2)} \int_0^{\theta} \left[\frac{2J_1(k\theta' a)}{k\theta' a} - \epsilon^2 \frac{2J_1(k\theta' \epsilon a)}{k\theta' \epsilon a} \right]^2 \theta' d\theta', \quad (4)$$

从而可求出在不同遮拦比 ϵ 的非稳腔远场光强分布中不同远场发散角内的功率含量占总功率的百分比, 计算结果见图 4。由图知: 相同的发散角内, 大的 ϵ 对应的非稳腔远场光强分布的功率含量就小些。因此, 随着 ϵ 的逐渐增加, 非稳腔的光束质量越来越差。(2) 用某一确定的功率含量百分比对应的远场发散角来评价非稳腔的光束质量。用该方法来评价非稳腔的光束质量时, 越大的远场发散角对应的非稳腔的光束质量就越差。例如, 可根据实际工作需要取 50%, 84% 或 90% 的功率含量百分比来比较不同遮拦比 ϵ 的非稳腔的光束质量。由图 2 知, 对一确定的功率含量百分比, 大的光束遮拦比 ϵ 对应的非稳腔远场光强分布的发散也大。所以, 本文也得到了相同的结论, 即随着 ϵ 的逐渐增加, 非稳腔的光束质量也越来越差。

3.1.3 光束衍射极限倍数因子评价法

文献中还提出了另一种评价非稳腔的光束质

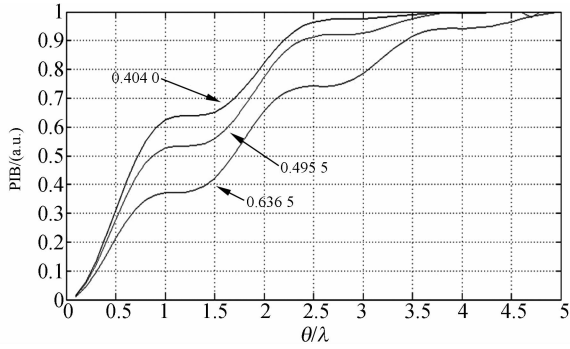


图 4 不同遮拦比的桶中功率

Fig. 4 Power in bucket with different block ratios

量的方法,即按照统一的标准定义理想光束的远场光斑半径和实际光束的远场光斑半径^[1],就能定义光束衍射极限倍数因子,一般称之为 β 因子,定义为:

$$\beta = \frac{\theta_{\text{real}}}{\theta_{\text{th}}}, \quad (5)$$

式中 θ_{th} 表示相同孔径下,强度分布均匀的平行光束的理想衍射极限受散角,即爱里斑第一暗环的角半径, $\theta_{\text{th}} = 2.44\lambda/D = 0.61 \text{ mrad}$ 。实际通过透镜法测量稳腔的发散角为 $\theta_x = 8.4 \text{ mrad}$, $\theta_y = 6.8 \text{ mrad}$,非稳腔的远场发散角为 $\theta_x = 1.8 \text{ mrad}$, $\theta_y = 1.7 \text{ mrad}$,对应的 $\beta_{\text{stable}} = 12.52$, $\beta_{\text{unstable}} = 2.87$,通过比较可以看到非稳腔对激光的远场光束质量有明显改善。

这个参数可以应用到计算远场目标上功率密度,当然激光在向远场传输的过程中又会增加一些影响此参数的因素,大致可以归为三类:一类是光学系统(含激光器)内发生的与相位像差(波前误差)有关的因素;另一类是光学系统内发生的非相位的因素(如遮拦造成的远场衍射图像边差,或系统光学部件的不稳定造成的光轴漂移或抖动以及偏振等)。在忽略上述三类影响因素以后,一束激光传输一定的距离后作用在远场靶上的功率密度 E 理论上为

$$E = \frac{P}{\pi(\theta L)^2} = \frac{P}{\pi(\beta\theta_0)^2 L^2}. \quad (6)$$

式中, E 为作用在远场靶上的功率密度; P 为激光的输出功率; θ 为激光的实际发散角; θ_0 为激光的理想发散角; β 为激光的衍射极限的倍数; L 为激光传输的距离。

通过上面公式,对比上述稳腔和非稳腔在远场 20 km 处所对应的倒靶功率密度, β 因子如上

所述,假设激光发射的功率都是 5 kW,则对应的功率密度分别为: $E_{\text{stable}} = 0.0682 \text{ W/m}^2$, $E_{\text{unstable}} = 1.2982 \text{ W/m}^2$ 。可以看出远场非稳腔功率密度是稳腔的 19 倍。

3.2 实验测量与结果分析

为了验证前述各个理论评价方法的实用性,通过改造稳腔激光器,采用遮拦比为 $\epsilon = 0.404$ 的非稳腔激光器在 300 m 处进行远场光斑分布的实验,因为在这个距离的激光传输受大气环境影响较小,用 CCD 采集的激光光强分布更接近于真实的激光远场图像。图 5 给出了用于改造用的稳腔高功率脉冲 TEA CO₂ 激光器,该激光器具有高平均功率、高峰值功率和高重复频率的特点,可以为激光加工制造和军事应用提供光源^[4]。改造后非稳腔功率为 2 kW,重复频率 200 Hz。

实验靶板和 CCD 相机如图 6 所示,CCD 采用高德公司非致冷的红外相机,靶板为针对红外设计的漫反射板。

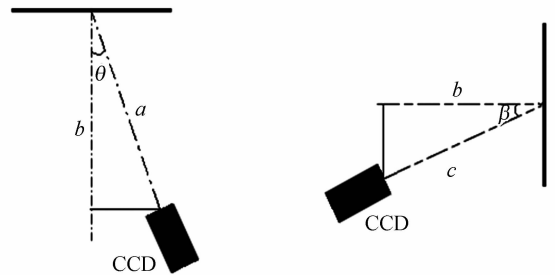
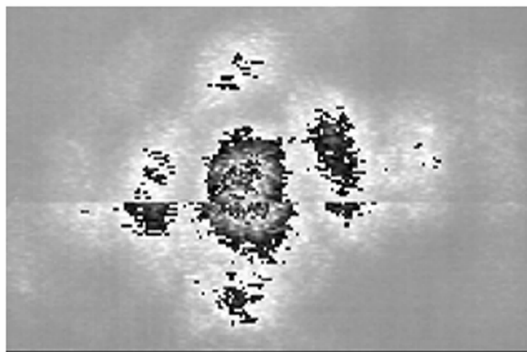
图 5 TEA CO₂ 激光器主机图Fig. 5 Primary machine of TEA CO₂ laser

图 6 CCD 和靶板的相对位置

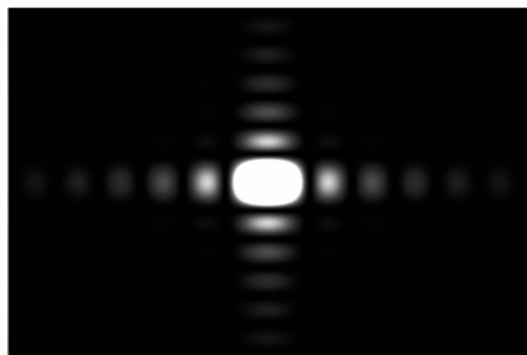
Fig. 6 Relative position between CCD and target

图 6 中所示水平夹角为 20° ,仰角为 5° , $a = c = 2.9 \text{ m}$, $b = 2.5 \text{ m}$,CCD 记录的光斑形状和通过

菲涅尔衍射积分公式模拟图像如图7所示。



(a)记录图像
(a)Recording image



(b)模拟图像
(b)Theoretical simulating image

图7 非稳腔激光器 CCD

Fig. 7 Images of CCD for unstable resonator laser

对 CCD 采集的光斑图样采取图像处理的边缘检测算法,并以环围能量 86.5% 环围能量半径上定义光斑大小,可以确定光斑尺寸为 $55\text{ cm} \times 50\text{ cm}$,对应的发散角为 $1.83\text{ mrad} \times 1.67\text{ mrad}$,从结果上可以看到和近场透镜法测得的发散角基本吻合,小于稳腔发散角,但却远大于由环孔光束将远场衍射光强分布公式(1)所计算的结果。这是 3 个因素造成的:

(1)计算时共焦型非稳腔在理论上的输出和发散角的计算都看成是平行光,但是,实际的非稳腔输出光束应该是一个近平行光,有一定的几何发散角,这是腔镜间距和曲率误差等因素造成的;

(2)由于设计采用略大于电极间距的非稳腔设计,所以造成边缘存在电极衍射所形成的较强的高阶高斯光强分布,同时用 CCD 采集高能激光

束的远场光强分布时,虽然通过漫反射靶板观察也需要衰减,否则探测器会产生饱和现象。由于衰减片的加入使得光斑像散增加,同样增大了整个远场的发射角。

(3)更为严重的是激光器重复频率为 200 Hz,工作时间一般在 10 s 左右,造成热累积严重。虽然中心凸镜经过水冷处理仍然会产生极大的温升,但此激光器在工作一段时间后,往往会因为温升过大产生应力炸裂输出镜窗口而进行更换。从而造成凸镜镜面产生不可忽略的热变形而脱离设计的理想位置并产生热畸变,使输出光束质量严重劣化。现已经考虑采用相变制冷等新技术来解决这一问题。

4 结 论

本文通过设计的非稳腔参数对现有的稳腔高功率 TEA CO₂ 脉冲激光器进行改造,据此在理论和实验上对此激光器的远场光束质量进行了评价方法的探讨。

对高功率非稳腔激光远场光束质量从理论上综合了 3 种的评价体系,它们有各自的优点和局限。发散角或环围能量百分比可以整体反应光束质量,但无法得到光强的空间分布。桶中功率(PIB)适用于实际的高功率激光远场能量传输和耦合型的应用,但桶的选取需根据作用距离上目标大小确定。 β 因子以理想光束作为参照标准,但对于同一实际光束,选取不同的参考光束会得到不同的 β 因子。由于采用非稳腔结构,输出的光束不是高斯光束,这也给 β 因子评价非稳腔的光束质量带来了不确定性。在实验上,在 300 m 处测量实际的非稳腔激光器的光强分布,在一定程度上弥补了理论评价体系的不足,因为它能够得到非稳腔激光器远场分布的实际光斑图像,据此计算的发散角要大于理论计算结果。

综上所述,非稳腔激光器远场光束质量无论在理论上还是在实验上都要优于稳腔激光器的远场光束质量。理论上 β 因子相比于稳腔提高了 4 倍多;在同等功率水平下,采用非稳腔的激光器的远场功率密度是稳腔的 19 倍;但其无法长时间稳定工作和热畸变仍然是其亟待解决的问题。由于其区别于传统激光器,单一的光束质量理论评价体系往往不能全面地说明高功率非稳腔 TEA

CO₂ 的远场光束质量。要全面地预测和评价所设计非稳腔激光器的光束质量,需要根据实际,综

合地运用 3 种形式的理论评价体系,才能对实际设计结果给出更加充分与客观的评价。

参考文献:

- [1] 杜祥琬. 实际强激光远场靶面上光束质量的评价因素[J]. 中国激光, 1997, 24(4): 327-332.
DU X W. Factors for evaluating beam quality of a real high power laser on the target surface in far field [J]. *Chinese Journal of Laser*, 1997, 24(4): 327-332. (in Chinese)
- [2] 左铁钊. 制造用激光——光束质量、传输质量与聚焦质量[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 7-23.
ZUO T ZH. *Manufacturing Laser-optical Beam quality, Transmission Quality and Focus Quality* [M]. Beijing: Science Press, 2008: 7-23. (in Chinese)
- [3] 郭汝海, 李殿军, 杨贵龙, 等. 大功率 TEA CO₂ 激光器非稳腔的设计与实验[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(3): 253-257.
GUO R H, LI D J, YANG G L, *et al.*. Design and experiment of unstable resonator for high-power TEA CO₂ laser [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(3): 253-257. (in Chinese)
- [4] 郭汝海, 张来明, 杨贵龙, 等. 高功率脉冲非稳腔 TEA CO₂ 激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(s1): 82-85.
GUO R H, ZHANG L M, YAN Y G L, *et al.*. High power pulsed TEA CO₂ laser with unstable resonator [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(s1): 82-85. (in Chinese)
- [5] 吴晗平. 激光光束质量的评价与应用分析[J]. 光学精密工程, 2000, 8(2): 128-132.
WU H P. Evaluation and applied analysis of laser beam quality [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(2): 128-132. (in Chinese)
- [6] 王思雯, 郭立红, 李岩, 等. 高功率 TEA CO₂ 激光器非稳腔的远场光束质量[J]. 中国激光, 2009, 36(s2): 14-17.
WANG S W, GUO L H, LI Y, *et al.*. Far-field beam quality of high-power unstable resonators TEA CO₂ laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(s2): 14-17. (in Chinese)
- [7] 王思雯, 郭立红, 赵帅, 等. 高功率 CO₂ 激光对远场 HgCdTe 探测器的干扰实验[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 798-804.
WANG S W, GUO L H, ZHAO SH, *et al.*. Experiments of high-power CO₂ laser disturbance to far-field HgCdTe detectors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 798-804. (in Chinese)
- [8] 李殿军, 杨贵龙, 谢冀江, 等. 9.3 μm 脉冲 CO₂ 激光倍频实验[J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 2684-2691.
LI D J, YANG G L, XIE J J, *et al.*. Experiments of second harmonic generation of 9.3 μm pulsed CO₂ lasers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2684-2691. (in Chinese)
- [9] 罗时荣, 吕百达, 黄鹭. 非稳腔的远场光强分布和光束质量[J]. 激光技术, 1999, 23(5): 281-284.
LUO SH R, LÜ B D, HUANG L. The far-field intensity distribution and beam quality of unstable resonators [J]. *Laser Technology*, 1999, 23(5): 281-284. (in Chinese)
- [10] 杨峰, 余文峰, 陈佳元, 等. TEA CO₂ 激光器同轴非稳腔光束质量[J]. 激光技术, 2008, 32(3): 314-316.
YANG F, YU W F, CHEN J Y, *et al.*. Beam quality of TEA CO₂ lasers with coaxial output unstable resonators [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(3): 314-316. (in Chinese)
- [11] 刘泽金, 陆启生, 赵伊君. 高能非稳腔激光器光束质量评价的探讨[J]. 中国激光, 1998, 25(3): 193-196.
LIU Z J, LU Q SH, ZHAO Y J. Study of evaluating beam quality of high energy lasers with unstable resonators [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1998, 25(3): 193-196. (in Chinese)
- [12] BORN M, WOLF E. *Principles of Optics* [M]. 5th ed. Oxford: Pergmon Press, 1975: 362-368.

作者简介:

郭汝海(1976—),男,辽宁大连人,博士,副研究员,1999年、2001年、2007年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事激光器设计及光束控制方面的研究。E-mail: hitgrh@163.com

张合勇(1982—),男,贵州福泉人,2009年于哈尔滨工业大学获硕士学位,主要研究方向为激光大气传输、激光外差探测。E-mail: yonghezhang1116@126.com

王挺峰(1977—),男,山东文登人,副研究员,硕士生导师,1999年、2002年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,2005年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光电对抗技术方面的研究。E-mail: wtfeng@sina.com

● 下期预告

微加热器热传导试验与计算

刘泽文¹,田昊²,刘冲²

(1. 清华大学微电子学研究所,北京 100084;

2. 大连理工大学辽宁省微纳米技术及系统重点实验室,辽宁 大连 116024)

为了研究微加热膜下方的结构与微加热器性能的关系,通过利用数值计算与有限元仿真手段,对微加热膜下方空气隙厚度的变化对加热器性能的影响进行研究。首先通过微加热器试验确定了对流换热系数等关键热学计算参数,然后建立了一维 Fourier 导热微分方程组,计算了 Biot 数并以此为依据对模型进行了薄壁简化,使用有限差分法对微分方程进行数值计算。使用 ANSYS 有限元分析软件对模型进行了电热耦合仿真,并对比在对流换热边界下硅衬底(无空气隙)、100 μm 、200 μm 、300 μm 、400 μm 以及加热膜(完全贯通)6种模型的瞬态温度响应及稳态热分布的结果。计算结果表明,目前的微加热膜结构相比硅衬底,同样边界条件下可以提高最高温度约 17%。200 μm 空气隙时,在 +5 V 驱动电压和空气对流边界条件下,微加热器可以达到 390 K,稳态功耗 134 mW,起到改善最高温度性能、降低功耗作用的结论。