

文章编号: 1001-3806(2004)05-0510-04

高功率 CO₂ 激光器输出窗热效应的研究

李 隆^{1,2,3}, 史 彭¹, 李东亮¹, 甘安生¹, 白晋涛²

(1. 西安建筑科技大学 理学院, 西安 710055; 2. 西北大学 光子学与光子技术研究所, 西安 710069; 3. 西安交通大学 电子与信息工程学院, 西安 710049)

摘要: 高功率 CO₂ 激光器输出窗不可避免地要吸收谐振腔的激光能量, 在其内部产生非均匀温度场的分布, 并引起输出窗发生热形变。输出窗的热效应改变了 CO₂ 激光器谐振腔的品质因数, 影响激光器的稳定性和输出光束的质量。对于输出窗准确的温度场和热形变量场研究是解决热透镜效应的关键。利用半解析方法对 CO₂ 激光器在 TEM₀₀ 工作模式下, 输出窗的温度场及热形变量场进行研究。研究方法和所得结论具有普适性, 可以应用到其它具有轴对称性热模型产生的温度场、热形变分析工作中。

关键词: 高功率 CO₂ 激光器; 输出窗; 热效应; 半解析方法

中图分类号: TN248.2⁺2 文献标识码: A

Thermal effect research of the output coupler window in high power CO₂ laser

LI Long^{1,2,3}, SHI Peng¹, LI Dong-liang¹, GAN An-sheng¹, BAI Jin-tao²

(1. Faculty of Science, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China; 2. Institute of Photonics & Photo Technology, Northwest University, Xi'an 710069, China; 3. School of Electronic & Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In high power CO₂ laser the infrared material output coupler window inevitable absorbing resonant laser energy will produce non uniform temperature field distribution, and also cause output coupler window to generate thermal distortion, which is called the output coupler window thermal effect. Thermal effect would change resonant *Q*-factor, and influence laser stability and output beam quality. So accurate temperature field and thermal distortion field analysis is the key to resolve these problems. In this article semi analytical solution is introduced to study output coupler window non uniform temperature field distribution and thermal distortion field distribution under the CO₂ laser operated at stable TEM₀₀ mode. Fortunately the research method and obtained results have universality, which can be applied to analyze temperature field and thermal distortion field with axial symmetry thermal models.

Key words: high power CO₂ laser; output coupler window; thermal effect; semi analytical solution

引 言

CO₂ 激光器具有输出功率大、光电能量转换效率高特点, 而且发射的激光波长正好适应于在大气中传输, 因此, CO₂ 激光器被广泛地用于材料加工^[1,2]、医疗、制导、大气通信及军事武器中。已发展的激光器种类也越来越多, 如流动型、横向激励型、高气压力型、气动型、波导型、射频激励型等^[3]。

CO₂ 激光器一般采用平凹腔, 其输出窗使用红外材料磨制成平反射镜。红外材料要有良好的透红

外光特性, 但是对于谐振腔内高功率密度振荡的激光仍存在着吸收, 因此在输出窗内部会产生出非均匀温升。为了使输出窗产生的热量尽快的扩散, 减小热形变量, 对于输出窗施加周边水冷的方法。红外材料的热形变使得输出窗对于 CO₂ 激光器而言出现热透镜效应^[4], 当激光器输出功率较高时, 输出光束在离窗口附近会产生光束的自聚焦现象, 并且自聚焦现象随着输出功率的增加, 聚焦点的位置, 束腰半径都发生变化, 这样使得 CO₂ 激光器在材料加工时出现加工头聚焦点的位置产生上、下移动, 影响了加工工件的质量^[5]。另外, 输出窗的热形变也改变了平凹腔的腔参数, 如: 光腔损耗参数, 导致激光器输出功率的降低^[6]。

分析、减少输出窗热透镜效应影响的关键就是

作者简介: 李 隆(1972-), 男, 博士研究生, 主要从事激光器件和超快光谱动力学研究。

E-mail: pshi56@sohu.com

收稿日期: 2003-09-12; 收到修改稿日期: 2003-12-09

对输出窗进行准确的热分析,计算出输出窗端面各点的温度值和热形变量。对于输出窗的热变形研究已有很多,如有限元方法,通过有限差分的离散化处理,层层迭代计算出热模型各点温度场的数值,由于单元划分灵活、计算方法的选取多样,并且数量巨大的迭代次数,都给计算结果带来一定的误差^[7]。

半解析热分析方法是近几年国际上出现的一种新方法^[8,9],它具有解析法的准确度,又有较宽的适用范围。文中利用半解析热分析方法对 CO₂ 激光器在 TEM₀₀ 工作模式下,输出窗的温度场及热形变量场进行研究。研究方法和所得结论具有普适性,可以应用到其它具有轴对称性热模型产生的温度场、热形变分析工作中。

1 高功率 TEM₀₀ 模 CO₂ 激光器输出窗口半解析热分析

1.1 输出窗温度场的计算公式

由于谐振腔内具有功率级高的光强,因此,红外材料输出窗的侧面边缘装有良导体制成的水冷系统,使热量尽快的扩散,以减小输出窗的热形变保持谐振腔稳定性。红外材料输出窗的半径为 R , 高为 L , 其侧面由于水冷保持恒定温度 T_w , 如图 1 所示。

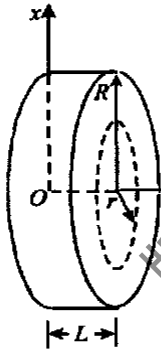


Fig. 1 Schematics of output coupler window

通过对于 CO₂ 激光器工作状态分析,建立输出窗的热物理模型。

1.1.1 光强分布形式 实现 CO₂ 激光器稳定的 TEM₀₀ 模式输出是提高激光器光束质量的关键。人们从谐振腔的结构^[10]、输出镜的膜系设计^[11] 等多方面努力,以实现激光器的基模输出。此时腔内的激光光强 I 在输出窗端面 ($x-y$ 面) 上的分布具有轴对称性,在柱坐标系中光强 I 的表达式为:

$$I(r) = I_0 \exp(-2r^2/w^2) \quad (1)$$

式中, w 为光束的腰斑半径, I_0 为由归一化条件决定的光束强度常数。

1.1.2 输出窗体内热源分析 由于制作输出窗的

红外材料对于 10.6 μm 激光吸收率较小,忽略由于红外材料吸收引起的谐振腔激光能量的减小,可假设谐振腔内光强不变。当激光束通过窗口时,受到红外材料的声子(晶格振动)及载流子的吸收,导致输出窗温度升高,使之转换成热量,耗散在输出窗内。红外材料对激光束的吸收率为 β , 则距输出窗中心 r 处产生的热功率密度为:

$$q_v(r) = I(r) \cdot \beta \quad (2)$$

1.1.3 输出窗内热流线分析 由于输出窗侧面装有良导体制成的水冷系统,良导热体材料(如紫铜)的热传导系数远大于红外材料的热传导系数,可假设输出窗内热流线为径向(r 方向)^[4]。

1.1.4 输出窗的边界条件分析 输出窗的两个通光面均与空气相接触,经过两端面和空气热交换流出的热量远远小于从输出窗侧面热传导流出的热量,可假设输出窗的两端面满足绝热条件。输出窗侧面采用了冷却装置,侧面温度保持恒定,设定为 u_w 。作为热物理模型的数学处理可设其为 0(相对),得出温度场分布后,再叠加冷却环境温度 u_w 。

1.1.5 输出窗中的热传导方程 由于输出窗内部有热源,则输出窗内部热传导方程遵守 Poisson 方程: $u_{rr} + u_r/r + u_{\varphi\varphi}/r^2 + u_{zz} + q_v/\lambda = 0$ (3)

式中, λ 为红外输出窗材料的热导率。

由于热物理模型、热源均具有轴对称性,并且激光束光强不变,输出窗的两端面都近似绝热。热流线为径向假设条件下,输出窗中的温度场分布也就具有了轴对称性,可得出温度场分布便仅仅是 r 的单值函数,即 $u(r, \varphi, z) = u(r)$ 。由(3)式可得:

$$u_{rr} + u_r/r + q_v/\lambda = 0 \quad (4)$$

在以上热物理模型的分析,利用半解析热分析方法得出输出窗内温度场分布的计算公式:

$$u = -\frac{I_0 \beta}{\lambda} \ln \frac{r}{R} \int_0^r e^{-2\rho^2/w^2} \rho d\rho - \frac{I_0 \beta}{\lambda} \int_r^R e^{-2\rho^2/w^2} \ln \frac{\rho}{R} \rho d\rho \quad (5)$$

1.2 输出窗热形变场的计算公式

当输出窗内部形成稳定温度场分布后,红外材料发生的热膨胀会使得窗体发生热形变。热形变使得输出窗产生热透镜效应^[12],同时热形变也导致激光器的输出功率下降。

假设输出窗体内部 r 处原温度为 0,窗体达到热平衡后的温度为 $u(r)$,输出窗沿轴向的热膨胀量为:

$$dl = \alpha u(r) dz \quad (6)$$

式中, α 为窗体红外材料的轴向热膨胀系数,则整个

输出窗沿轴向上的热膨胀量:

$$l = \int_0^L dl = \alpha u(r) L \quad (7)$$

2 各种红外材料输出窗温度场及热形变场的分析

2.1 输出窗各种红外材料热参数

能够用作 CO₂ 激光器输出窗的红外材料很多, 例如 n 型锗 (Ge)、砷化镓 (GaAs)、碲化镉 (CdTe)、硒化锌 (ZnSe) 等。由于不同种类的红外材料, 其吸收系数、导热系数、热胀系数等差异较大, 即使吸收相同的激光能量, 在输出窗内产生出的温场分布不同, 输出窗产生的热形变量也不相同(参见表 1)。

Table 1 Common infrared transmitting windows materials thermal parameters

material	Ge	GaAs	CdTe	ZnSe
thermal conductivity coefficient $/(W \cdot cm^{-1} \cdot K^{-1})$	0.59	0.37	0.041	0.13
absorption coefficient $/cm^{-1}$	0.045	0.015	0.006	0.005
refractive index n	4.02	3.3	2.67	2.4
thermal expansion coefficient $/10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	6.1	5.7	4.5	7.7
$dn/dT / ^\circ\text{C}^{-1}$	4.6×10^{-4}	1.87×10^{-4}	1.14×10^{-4}	

2.2 输出窗常用红外材料温度场、热形变场对比分析

2.2.1 锗窗三维温度场分析 锗有着良好的透红外性能, 机械强度及化学稳定性好、容易加工等特点, 被广泛用作小功率 CO₂ 激光器的输出窗^[13]。在 CO₂ 激光器谐振腔内激光功率为 1000W、锗窗半径 $R = 1.0\text{cm}$ 、厚度为 0.5cm 时的三维温度场见图 2。

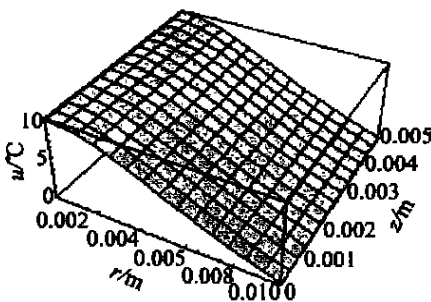


Fig. 2 Three dimensional temperature field diagram of infrared Ge transmitting window

2.2.2 入射基模光束具有不同腰斑时锗窗温场分布 透过输出窗光束半径 w 直接影响输出窗端面

上的激光能量的分布。选取适当的腔镜参数和腔长, 可控制谐振腔内振荡的基模光斑大小。当基模腰斑半径 w 分别为 $R/1.6, R/2.0, R/2.4$ 时(其中 R 为输出窗半径), 照射到输出窗端面上的激光能量与谐振的基模激光总能量之比分别为 99.40%, 99.97%, 99.99%, 其光强分布图 3 所示。

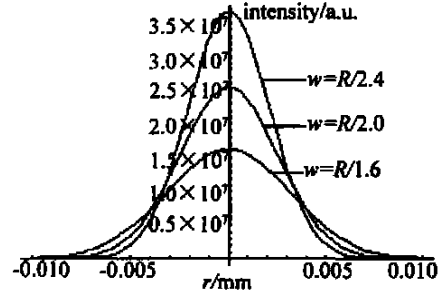


Fig. 3 Intensity distribution diagram of different fundamental mode radii

在 CO₂ 激光器腔内激光功率仍为 1000W, 锗窗半径 R 不变的情况下, 腔内基模激光腰斑半径 w 分别为 $R/1.6, R/2.0, R/2.4$ 时, 锗窗透光面产生的温度场如图 4 所示。

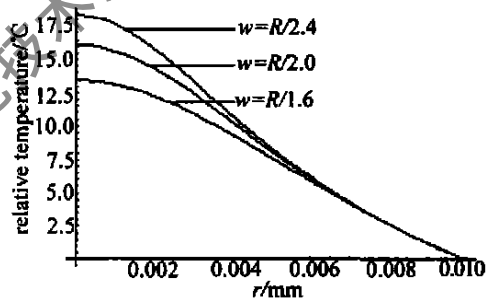


Fig. 4 Temperature field distribution diagram of infrared Ge transmitting window with different fundamental mode radii

从图 4 中可以看出, 谐振腔内基模腰斑半径越小, 照射到输出窗端面的激光能量越向窗中心集中, 近轴中心处窗片温度增加得较大。

2.2.3 谐振腔内不同的功率时锗窗温度场分布 谐振腔内激光功率为 500W, 1000W, 1500W, 2000W, 2500W 时, 图 5 示出锗窗的温度场分布情况。

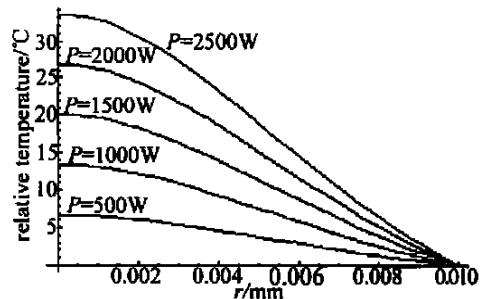


Fig. 5 Ge window temperature field distribution diagram with different resonant power

从图中可以看出, 谐振腔内激光功率的大小对

输出窗近轴中心的温度影响较大,对远轴中心边缘处的温度影响小。

2.2.4 几种红外材料的输出窗温度场的对比分析

由于制作输出窗的各种红外材料的热参量不同。在相同透过功率下,输出窗内产生温度场不相同。在 CO₂ 激光器谐振腔内激光功率为 1000W 时,对比研究了常用做 CO₂ 激光器红外输出窗温度场,见图 6。

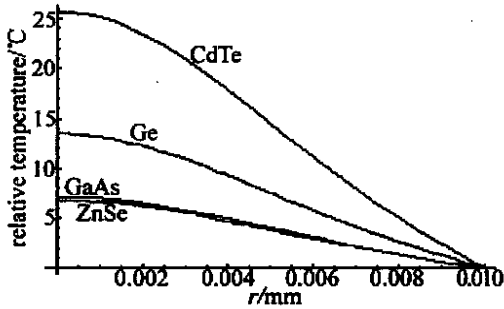


Fig. 6 Contrast temperature field distribution diagram of different infrared materials transmitting windows

由几种红外材料的输出窗温度场的分布图可以看出,由于红外材料的吸收系数、导热系数存在着差异,即使在谐振腔内功率相同状态下输出窗内温度场的差异,ZnSe 材料因具有较小的吸收系数,较大的导热系数其温度场相对温升较小,因此,在千瓦级 CO₂ 激光器中常用 ZnSe 材料制作输出窗。

2.2.5 几种红外材料输出窗热形变场的对比分析

由于不同红外材料的热胀系数存在着差异,故输出窗在高功率密度激光照射下的形变量不同。输出窗的热形变会引起谐振腔参数的改变,不仅影响光束质量和传输特性,且使激光器输出功率下降。在 CO₂ 激光器谐振腔内激光功率为 1000W 时,图 7 中对比地给出了各种红外材料输出窗热形变场分布情况。

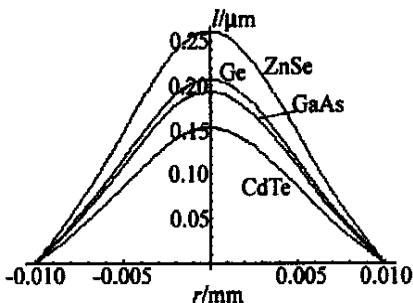


Fig. 7 Contrast thermal distortion field diagram of different infrared materials transmitting windows

导致输出窗产生热形变是红外材料的吸收系

数、导热系数、热膨胀系数的一个综合因素的影响,并且由输出窗热形变场的对比分布可以得出,在相同状态下,用 CdTe 材料做的输出窗具有最小的热形变量。但是由于 CdTe 材料的其它特性,制约了其作为 CO₂ 激光器输出窗材料的实用性。

3 结束语

利用半解析热分析方法研究了高功率 CO₂ 激光器稳定输出 TEM₀₀ 模输出窗温度场和产生的热形变场的分布情况,并将不同红外材料窗片热形变进行了对比研究,为消除输出窗的热透镜效应提高激光器的性能提供了准确、可靠的理论基础。同时半解析热分析方法与数值分析方法相比具有准确度高等特点,研究方法和得出的结论也可以应用到其它具有轴对称形式热源产生温度场和热形变场的计算分析中。

参 考 文 献

- [1] H¹GEL H. Potential of modern CO₂ laser for industrial application [J]. Infrared Phys Technol, 1995, 36(1): 145~ 157.
- [2] JEBBARI N, JEBARI M, AHDAD F *et al.* Energy mechanism during machining process by high power continuous CO₂ laser [J]. Appl Phys, 2000, B70: 99~ 103.
- [3] 刘敬海,徐荣甫. 激光器件与技术 [M]. 北京:北京理工大学出版社,1995. 33~ 65.
- [4] 陆培华,王润文. 高功率激光器窗口三维温度场分析及其热透镜研究 [J]. 光学学报, 2001, 21(8): 965~ 969.
- [5] 蒋金波,程兆谷,牛振亚. 快速轴流 CO₂ 激光器输出窗热透镜效应对输出特性的影响 [J]. 应用激光, 1999, 19(5): 309~ 312.
- [6] 夏金安,程兆谷,熊江涛 *et al.* 高功率横流连续 CO₂ 激光器特性参数模拟 [J]. 中国激光, 1999, 26(9): 769~ 772.
- [7] 马毅勇,程祖海,张耀宁. 高功率激光器窗口热变形分析的有限元方法 [J]. 强激光与粒子束, 1999, 11(1): 6~ 10.
- [8] FU NK J N, MENG¹C M P, TAGAVI K A *et al.* A semi analytical method to predict printed circuit board package temperatures [J]. IEEE Transactions on Components Hybrids and Manufacturing Technology, 1992, 15(5): 675~ 684.
- [9] 史 彭,陈雅妮,王占民. 多层圆形组件半解析热分析方法的研究 [J]. 电子学报, 2001, 29(8): 1121~ 1122.
- [10] 王希权,彭忠奇. 小型可调式 TEM₀₀ 模 CO₂ 激光器 [J]. 应用光学, 1999, 20(6): 27~ 29.
- [11] 朱精敏,张伟坪,赵焕东 *et al.* 改善大功率 CO₂ 激光模式的位相统一输出镜 [J]. 应用激光, 1998, 18(6): 251~ 253.
- [12] 王润文,陆培华. 高功率激光透过窗口材料的传输效应分析 [J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(增刊): 91~ 94.
- [13] 马绍芳. CO₂ 激光器用的低吸收窗 [J]. 激光与红外, 1999, 29(3): 187~ 188.