

# 高功率激光器输出窗口 的热畸变研究\*

唐 家 鹏

(中国大恒公司激光加工中心, 北京10080)

张泽渤 霍 庆 赵玉英

(中国科学院物理研究所, 北京10080)

**摘要** 用有限差分法(FDM)对快速轴流微波激励CO<sub>2</sub>激光器的输出腔镜-GaAs和ZnSe的热效应进行了理论分析和计算, 得到相应的温度场分布, 从而得到窗口的热畸变。

**关键词:** 有限差分法; 热畸变; 高功率激光器; 激光输出窗口

## 一、引 言

高功率CO<sub>2</sub>激光器谐振腔光学元件的热稳定性直接影响到激光器的光束质量。所选用的材料一般要求具有较小的热吸收、热膨胀和较大的热导率, 以使产生的热畸变尽可能的小。有关横流多模CO<sub>2</sub>激光器窗口的热效应分析已见诸报道<sup>[2]</sup>。本文主要讨论轴流CO<sub>2</sub>激光器运行在基模(TEM<sub>00</sub>)状态下窗口的热效应问题, 建立窗口的热传导方程, 并采用有限差分法求出窗口的温度场分布, 从而求出窗口的热畸变。

## 二、理论分析和计算

导热的一般方程为<sup>[1]</sup>

$$KV^2T + H = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

(1) 式中有关参数的意义和量纲为:

$K$ : 导热系数(W/m·°K)	$\rho$ : 材料密度(kg/m <sup>3</sup> )
$C_p$ : 定压比热(J/kg·°K)	$T$ : 温度(°K)
$t$ : 时间(s)	$H$ : 功率密度(W/m <sup>3</sup> )

因为我们讨论基模光束的传输特性, 它具有圆对称的光强分布, 即光强分布与角度 $\theta$ 无关; 另外, 因窗口较薄, 可认为热量在厚度方向基本均匀。因此, (1)式可变为—维柱坐标形式:

注: \* 此项目为国家自然科学基金资助课题

$$K \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right] + H = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

(2) 式中有关各项的考虑:

1.  $H$ 项

$H$ 为体积热源项, 即等于激光功率密度与吸收系数 $\beta$ 和输出窗厚度 $d$ 的乘积。

基模光束的场振幅为高斯分布, 即:

$$E = E^0 e^{-r^2/z^2} \quad (3)$$

(3) 式中:  $\omega$ 为基模光束腰斑半径。我们所测得的功率是平均功率 $\bar{P}$ , 通过对(3)式求平均值, 并取模的平方, 可得到任意一点的功率 $P$

$$P = C^2 \bar{P} e^{-r^2/z^2} \quad (4)$$

(4) 式中:  $C = 2.37$  (积分常数)

因此 $H$ 项可表示为:

$$\begin{cases} H(r, z) = \frac{P}{V} = \beta d C^2 \bar{P} e^{-r^2/z^2} / V & r \leq \omega \\ H(r, z) = 0 & r > \omega \end{cases} \quad (5)$$

(5) 式中:  $V$ 为激光光斑在输出窗口上形成的体积( $m^3$ ),  $\beta$ 为材料 $10.6\mu m$ 波段的吸收系数( $cm^{-1}$ )  $d$ 为窗口厚度( $mm$ )。

计算中有关参数选取如表 1。

表 1

参数	材料	ZnSe	GaAs
$K$		18.0	45.5
$\rho$		5270	5400
$C_p$		342.76	175.56
$\beta$		0.005	0.02
$\alpha$		$5.7 \times 10^{-6}$	$8.5 \times 10^{-6}$

$\alpha$ : 热膨胀系数( $^{\circ}C$ )

2. 差分方程的某些考虑

(2) 式中, 当  $r \rightarrow 0$  时,  $\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \rightarrow \frac{0}{0}$  (不定值), 因此必须取极限

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \quad (6)$$

对一般的内部节点  $i$ , (2) 式的差分形式为:

$$T_{i-1} \frac{-2T_i + T_{i+1}}{(\Delta r)^2} + \frac{1}{r_i} \frac{(T_i - T_{i+1})}{2\Delta r} + \frac{H}{K} = \frac{\rho C_p}{K} \frac{T_i' - T_i}{\Delta t}$$

$$\text{即: } T_i' = \frac{F_0}{2} \left[ \left(2 + \frac{\Delta r}{r_i}\right) T_{i-1} + \left(\frac{2}{F_0} - 4\right) T_i + \left(2 - \frac{\Delta r}{r_i}\right) T_{i+1} + \frac{2H}{K} (\Delta r)^2 \right] \quad (7)$$

(7) 式中:  $\Delta r$  为差分网格步长,  $r_i$  为第  $i$  点距窗口中心距离,  $\Delta t$  为时间步长,  $F_0 =$

$\frac{K}{\rho C_p} \cdot \frac{\Delta t}{(\Delta r)^2}$  为傅立叶系数。

对中心节点 $j$ , 考虑 (6) 式的结果, 有:

$$T_{j'} = F_0 \left[ 4T_{j-1} + \left( \frac{1}{F_0} - 4 \right) T_j + \frac{H}{K} (\Delta r)^2 \right] \quad (8)$$

### 三、计算结果的讨论

利用 (5) (7) (8) 式, 以  $\Delta t$  为步长通过编程可计算出激光输出窗口的温度分布。计算中,  $F_0 \leq \frac{1}{4}$ ,  $T_0 = 15^\circ\text{C}$  (冷却水温), 输出窗口原始状态为平面。

通过计算, 得到 ZnSe, GaAs 输出窗中心温度随激光功率的变化, 如图 1、2 所示。利用所得到的温度值, 并参考输出窗上的温度分布曲线 (图 5、6), 求出窗口的热膨胀, 进而求出等效曲率半径  $R$  随激光功率的变化关系, 如图 3、4 所示。

#### (一) 几点讨论

1. 由图 1、2 看出, 窗口温度 ( $T$ ) 随激光功率 ( $L_p$ ) 的增加呈线性上升。根据 ZnSe 和 GaAs 的温度上升情况, GaAs 适用于较低功率 (1kW 以下) 的激光器, 而 ZnSe 则可用于大功率 (1kW 以上) 的激光器上。温升越大, 窗口热畸变也越大, 相应的等效曲率半径 ( $R$ ) 则越小。由图 3、4, 可知, ZnSe 在 5000W 时的等效曲率半径 ( $R$ ) 近似于 GaAs 在 1200W

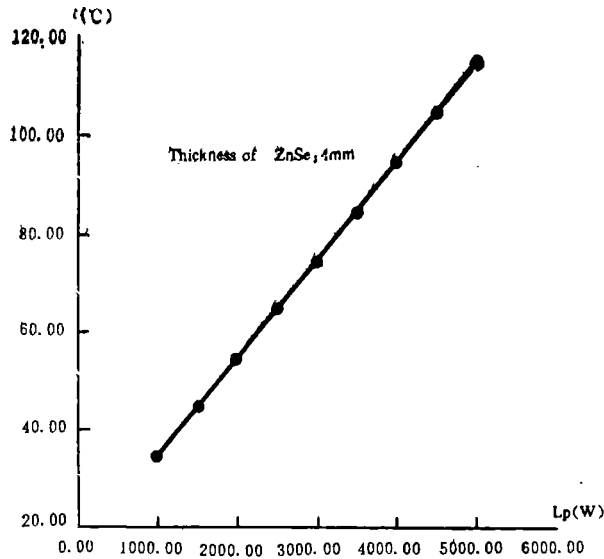


Fig.1 Temperature of ZnSe on Central Point Versus Laser Power

时的曲率半径。对于我们所用 1kW 的激光器, 如采用 ZnSe 做输出窗, 由 ZnSe 在 1kW 时的  $R$  近 200m, 因此无须校正补偿; 而 GaAs 在 1kW 时的  $R$  在 (20~40)m 左右, 因此必须予以补偿。

2. 窗口温度分布曲线图 5、6 中, 在接近光斑边缘点 (7.4mm 处) 的温升较其它点相比低一些。这是因为该点与边缘点 (冷却水处) 直接相接, 而其余点 (除中心点) 都有一定的热积累, 因此温度差别较大。

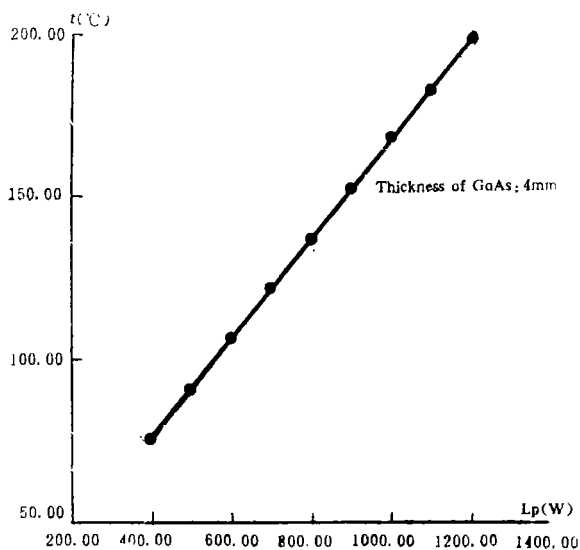


Fig.2 Temperature of GaAs on Central Point Versus Laser Power

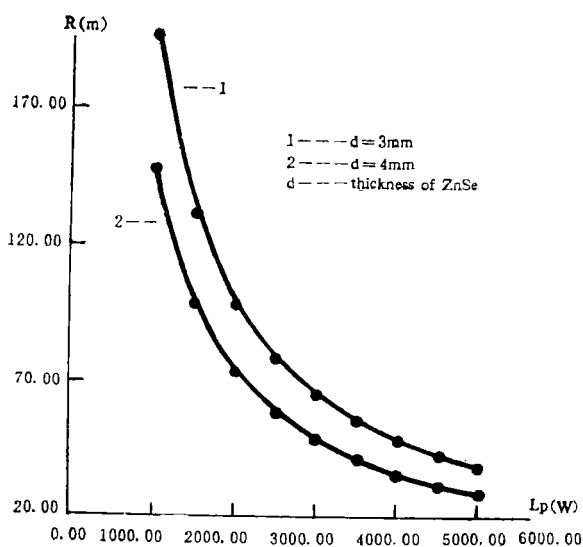


Fig.3 Radius of Curvature(ZnSe) Versus Laser Power

3. 由于窗口温度与所吸收的激光功率( $P_0$ )有直接关系, 而 $P_0$ 与窗口厚度 $d$ 成正比。通过计算, 我们在理论上得到了曲率半径随窗口厚度变化的曲线, 如图7所示。随着 $d$ 的增加, 窗口的热畸变有较大增加, 尤其是 $d$ 从1mm—4mm,  $R$ 的变化很大。因此, 在材料机械性能满足加工和使用要求的情况下, 应尽可能减小窗口厚度, 从而减小热畸变。

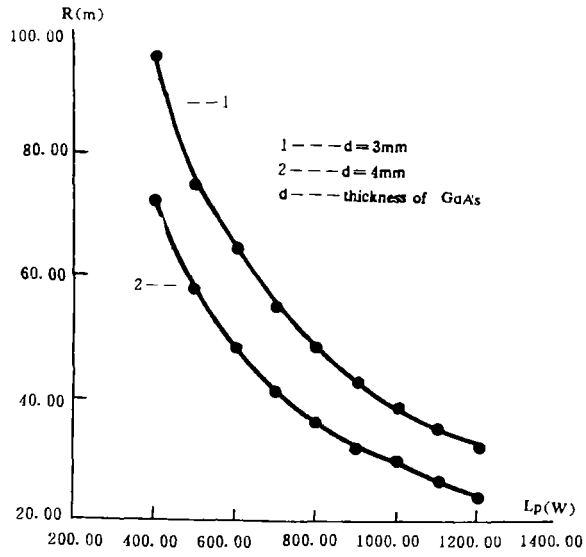


Fig.4 Radius of Curvature(GaAs)Versus Laser Power

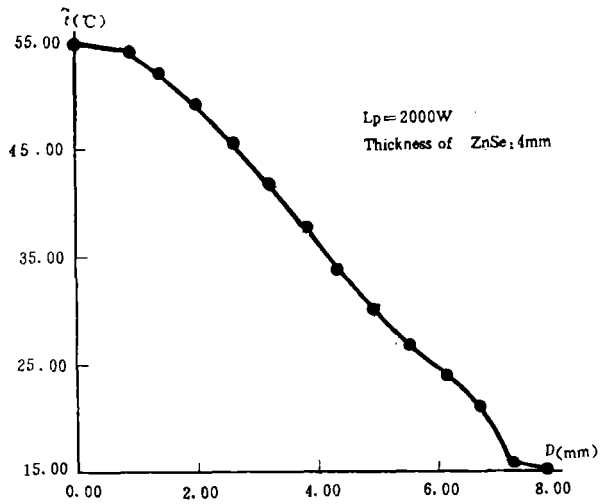


Fig.5 Temperature Distribution Versus Distance from Central Point of ZnAe

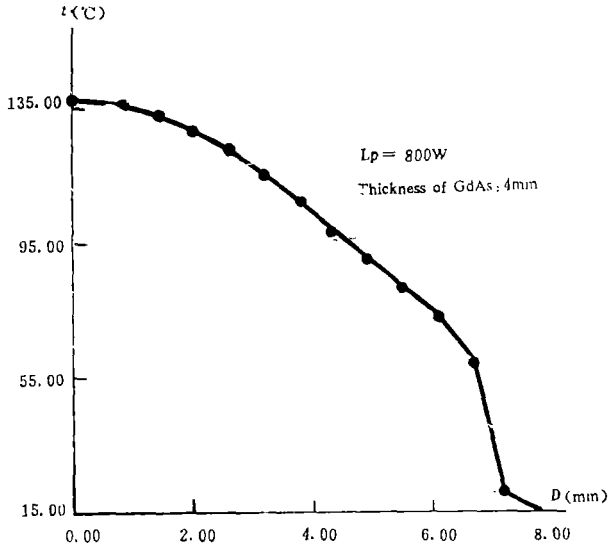


Fig.6 Temperature Distribution Versus Distance from Central Point of GaAs

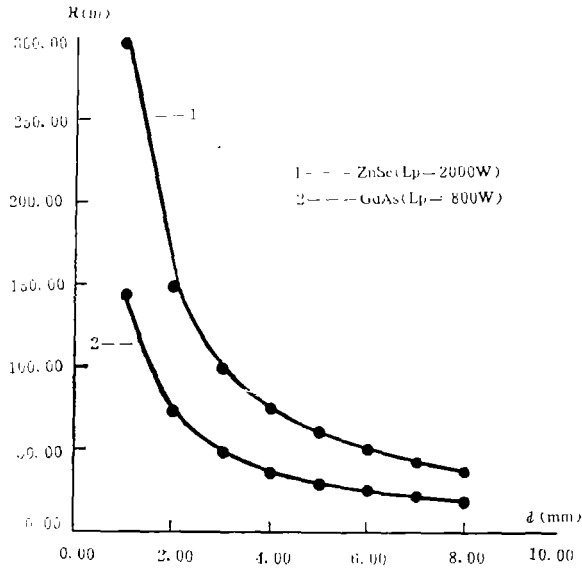


Fig.7 Radius of Curvature Versus Thickness of Output Windows

#### 四、实验结果与补偿措施

根据上述理论模型，选用GaAs做窗口， $d = 4\text{mm}$ 计算出 $L_p = 580\text{W}$ 时，窗口中心点温度 $T = 103.6^\circ\text{C}$ ，相应的等效曲率半径 $R = 49.5\text{m}$ 。

依薄透镜焦距公式：

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (9)$$

(9) 式中,  $n$  为 GaAs 在  $T = 103.6^\circ\text{C}$  时折射率:

$$n = n_0(1 + \gamma \cdot \Delta T) \quad (10)$$

其中,  $n_0 = 3.27$  (GaAs 室温下折射率)

$$\gamma = 149 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \quad (\text{GaAs 折射率的温度变化率})$$

$$\Delta T = T - T_0 \quad (T_0 = 25^\circ\text{C 室温})$$

由 (9)(10) 二式可得,  $f = 10.7\text{m}$  (11)

实验测得窗口处光斑  $\omega_0 = 7.5\text{mm}$ , 距离口 900mm 处光斑  $\omega_0' = 6\text{mm}$ 。

利用高斯光束经薄透镜变换公式<sup>[3]</sup>

$$\frac{1}{\omega_0'^2} = \frac{1}{\omega_0^2} \left( 1 - \frac{L}{f} \right)^2 + \frac{1}{f^2} \left( \frac{\pi \omega_0}{\lambda} \right)^2 \quad (12)$$

对于我们的具体实验  $L = 0$  (窗口上), 因此可得:

$$f = 14\text{m} \quad (13)$$

(13) 式的结果与理论值 (11) 式基本相符。

因此, 在实际的激光器设计中, 我们应将输出窗由平面改为平凹镜。根据激光器的最大输出功率, 参照图 3、4 选取合适的曲率半径, 从而改善激光束的光束质量。

## 五、结 束 语

本文的结果是基于激光器运行在基模 ( $\text{TEM}_{00}$ ) 的条件下, 由于光斑能量在窗口径向上的分布是不均匀的, 因此与多模情况下 (光斑能量在窗口上的分布可近似取为常数<sup>[1]</sup>) 的结果是不同的。

### 参 考 文 献

- [1] Craft, D. R., Lilley, D. G., «Heat transfer calculations using finite difference equations», London, Applied Science Pub. Ltd., 1977
- [2] 陈清明等; 中国激光, 16, No.8, 456
- [3] 周炳琨等; «激光原理» 国防工业出版社, 1980, 356

## A Study on Thermal Distortion of High Power Laser Output Windows

Tang Jiapeng, Zhang Zebo, Huo Qing and Zhao Yuying

### Abstract

By means of Finite Difference Method (FDM), thermal effects on GaAs and ZnSe which could be used in fast-axial-flow  $\text{CO}_2$  laser excited by microwave have been analysed and calculated. The temperature distribution and thermal distortion of the output windows have been given.