

高反膜红外耦合窗口 GaAs 热变形的研究*

杨宝春 程兆谷 陈刚 雒江涛 王润文

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

摘要 从理论和实验上研究了高功率横流 CO₂ 激光器高反膜输出耦合窗口 GaAs 的热形变。在作合理近似情况下, 给出了 GaAs 温度分布和热形变的理论表达式, 并从实验上进行验证, 理论和实验较好地一致。

关键词 横流 CO₂ 激光器, 高反膜, GaAs 耦合窗口, 热形变

1 引言

透红外 CO₂ 激光的窗口材料包括半导体材料(如 Ge, CdTe, ZnSe 和 GaAs), 电介质材料(如 KCl, NaCl)和红外玻璃(如 KRS-5)。综合考虑材料的机械、光学、热特性, 对高功率 CO₂ 激光器应用场合, 只有 ZnSe 和 GaAs 两种材料得到了广泛的应用。

一般来说, 高功率 CO₂ 激光器红外耦合窗口都采用周边水冷的方法来冷却。对横流 CO₂ 激光器而言, 由于小信号增益低和放电长度短等特点, 为取得最佳耦合, 红外耦合窗口的内表面通常镀有增反膜, 而外表面镀 100% 的增透膜。在千瓦级激光输出过程中, 腔内光强高达万瓦量级, 窗口内表面高反膜、基底本身和外表面增透膜三部分的吸收引起热形变对输出光束质量产生严重影响, 进而影响激光器在工业生产中的实际应用。本文对 GaAs 窗口的热变形进行理论和实验的研究。

2 高反膜红外耦合窗口 GaAs 热形变理论分析

横流 CO₂ 激光器正常工作气压为 10 kPa 或更低, 大气压力将造成窗口的光学畸变, 为了保证窗口的有效性, 其临界厚度 l_c 为^[1]

$$l_c = 1.68\tau[(n-1)(P/E)^2(2\tau/\lambda)]^{1/5} \quad (1)$$

式中 τ 为窗口的半径, n , E 分别为窗口材料的折射率、杨氏模量, P 为大气压力, λ 为激光波长。对 GaAs, 当取 $\tau = 1.0$ cm 时, 可以算得 l_c 约为 0.04 cm。实际耦合窗口厚度为 0.5 cm 时, 大气压力造成的光学畸变可以忽略不计。

对高反膜耦合窗口, 基于前述原因, 而且内表面高反膜的吸收系数一般要比外表面增透膜的吸收系数高 1~2 倍甚至更高, 因此, 分析耦合窗口的热变形时, 可以忽略外表面增透膜的吸

* 福特-中国研究与发展基金资助项目。

收。另外,不同于 ZnSe,由于 GaAs 的体吸收系数较高,达到 10^{-2} cm^{-1} 的量级,GaAs 基底的吸收不能忽略。

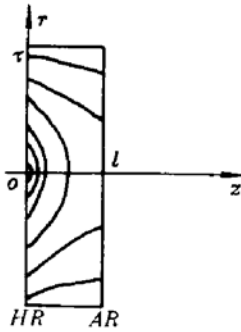


Fig. 1 Temperature distribution within a GaAs coupler

图 1 为 GaAs 耦合窗口, $z = 0$ 的面为窗口镀高反膜内表面, $z = l$ 的面为镀增透膜的外表面。为分析简便起见,激光束在 GaAs 腔片上的半径假定为与周边水冷套之半径相同,且光强均匀分布,水温为 T_w 。 $z = 0$ 的面承受数千瓦乃至万瓦以上高功率 CO_2 激光,其吸收部分形成不变热流 q ; 基底部分的吸收形成热源项 $Q = \beta_0 I(r, z)$, 其中 β_0 为体积吸收系数, $I(r, z)$ 为光强。

只考虑高反膜吸收形成的不变热流 q 时的温度分布可由解下列热传导方程获得

$$\frac{\partial^2 T(r, z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r, z)}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

边界条件为

$$-K \frac{\partial T(r, z)}{\partial z} \Big|_{z=0} = q, \quad \frac{\partial T(r, z)}{\partial z} \Big|_{z=l} = 0, \quad T(r, z) \Big|_{r=\tau} = T_w$$

解方程(2),得解析解为

$$T(r, z) = T_w + \sum_{m=1}^{\infty} A_m \frac{\text{ch}[(\mu_m/\tau)(l-z)]}{\text{sh}[(\mu_m/\tau) \cdot l]} \cdot J_0[(\mu_m/\tau) \cdot r] \quad (3)$$

其中, $A_m = 2\tau \cdot q / [K \cdot \mu_m^2 \cdot J_1(\mu_m)]$, $q = \beta \cdot P_L / (\pi \cdot \tau^2 \cdot T)$, 式中 μ_m 为零阶贝塞尔函数 $J_0(\mu) = 0$ 之根, $J_1(\mu_m)$ 为一阶贝塞尔函数之值, P_L 为激光功率, T 为 GaAs 窗口的透过率, K 为 GaAs 的热导率, β 为其内表面高反膜的吸收系数。(3) 式说明温度分布是轴对称的,高反膜内表面中心处温度最高,外表面温度与内表面相比要低得多。

温度分布引起的光轴 z 方向的增长 $\Delta l_1(r)$ 可表示为

$$\Delta l_1(r) = \sum_{m=1}^{\infty} \alpha A_m \frac{J_0[(\mu_m/\tau) \cdot r]}{\text{sh}[(\mu_m/\tau) \cdot l]} \cdot \int_0^l \text{ch}\left[\frac{\mu_m}{\tau}(l-z)\right] dz \quad (4)$$

式中 α 为 GaAs 的线膨胀系数。

对(4)式做定积分得

$$\Delta l_1(r) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\alpha \cdot A_m \cdot \tau}{\mu_m} \cdot J_0[(\mu_m/\tau) \cdot r] \quad (5)$$

由公式(5)和 A_m, q 表达式得

$$\Delta l_1(r) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2\alpha \cdot \beta \cdot P_L}{\pi \cdot K \cdot \mu_m^3 \cdot J_1(\mu_m) \cdot T} \cdot J_0\left(\frac{\mu_m}{\tau} \cdot r\right) \quad (6)$$

(6) 式的物理意义是,高反膜耦合窗口内表面的热变形正比于激光功率 P_L 、高反膜的吸收系数 β 以及基底本身的线膨胀系数 α ,反比于基底材料热导率 K 和腔片的透过率 T 。

对于腔片中心处($r = 0$),由公式(6),热变形量达到最大值,为

$$\Delta l_1(0) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2\alpha \cdot \beta \cdot P_L}{\pi \cdot K \cdot \mu_m^3 \cdot J_1(\mu_m) \cdot T} \quad (7)$$

若只考虑 GaAs 基底的体吸收,则窗口温度分布为^[2]

$$T = T_w + B(\tau^2 - r^2), \quad \Delta T = B(\tau^2 - r^2) \quad (8)$$

其中 $B = \beta_r \cdot P_L / (\pi \cdot \tau^2 \cdot K)$, 温度分布轴对称, 且与 z 无关, 引起平面耦合窗口向两边凸出, 中心 $r = 0$ 处热变形量

$$\Delta l_2(0) = l \cdot \alpha \cdot \beta_r \cdot P_L / (\pi \cdot K) \tag{9}$$

综合考虑内表面高反膜的吸收及基底本身的体吸收, 其温度分布如图 1 所示, 内表面凸出量为

$$\Delta l(0) = \Delta l_1(0) + \Delta l_2(0) / 2 \tag{10}$$

将内表面近似看作一个曲率半径为 R 的球面, 由简单的几何关系得

$$R = \tau^2 / [2\Delta l(0)] \tag{11}$$

举例: GaAs 的线膨胀系数 $\alpha = 5.7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, 内表面高反膜的吸收系数为 $\beta = 0.02$, 激光输出功率 $P_L = 3 \text{ kW}$, 热传导率 $K = 0.48 \text{ W/cm} \cdot ^\circ\text{C}$, 窗口透过率 $T = 0.20$, 输出光斑半径 $\tau = 1.0 \text{ cm}$, GaAs 的体积吸收系数 $\beta_r = 0.02 \text{ cm}^{-1}$, 窗口厚度 $l = 0.5 \text{ cm}$, 由公式(7), (9)得 $\Delta l_1(0)$, $\Delta l_2(0)$ 分别为 $2.84 \mu\text{m}$, $1.13 \mu\text{m}$, $\Delta l(0) = (2.84 + 1.13) / 2 = 3.41 \mu\text{m}$, $R = (1.0 \times 10^{-2})^2 / (2 \times 3.41 \times 10^{-6}) = 14.7 \text{ m}$.

3 高反膜 GaAs 腔片热变形的实验验证

由于 GaAs 对可见光不透明, 因此在数千瓦 CO_2 激光输出过程中, 要定量检测 GaAs 耦合窗口内外表面变形不能用 He-Ne 等可见光, 可以用 CO_2 激光束。

一束瓦级 CO_2 激光束以小角度 i 入射耦合窗口 GaAs 镀增透膜的外表面, 经折射达 GaAs 镀高反膜的内表面, 由内表面反射后从外表面出射。原有 GaAs 加工面为一平行平板, 由简单几何关系求得 GaAs 外、内表面反射光斑之间的间隔 l 为

$$l = 2l \cdot \sin i / (n \cdot \cos \beta_1) \tag{12}$$

这里 β_1 为折射角, n 为 GaAs 的折射率。

我们在距离 GaAs 耦合窗口为 L 处用一复写纸的屏来接收并记录由 GaAs 外、内表面反射的 CO_2 激光, 由外表面反射光烧蚀之斑点的中心位置设为点 1, 由内表面反射而从外表面出射的光之第一个烧蚀斑点中心位置设为 2, 其后续光束烧蚀斑点中心位置依次为 3, 4, 5, ..., 由实验和理论分析可得如下结果:

3.1 大气状态

激光器处于大气状态, GaAs 腔片无大气压力。记录 CO_2 激光束入射 GaAs 腔片形成的点 1, 2, 3, 4, ..., 由公式(12)可知, 如果入射角 i 足够小, 例如 $i \leq 10^\circ$, GaAs 厚度 $l = 0.5 \text{ cm}$, 折射率 $n_0 = 3.275$, 则上述各光斑之间间隔相等, $l \leq 0.54 \text{ mm}$ 。实际上这些光斑形成一团, 如图 2(a) 所示。

3.2 无激光输出

激光器抽真空后, 充上合适的工作气体, 一般为 $5 \sim 10 \text{ kPa}$, 仔细观察与 3.1 情况的区别, 1 号光斑及 2 号等后续光斑位置变化趋近于零。表明大气压力引起的 GaAs 内、外表面的压力变形可以忽略, 这和由公式(1)理论计算相一致, 实验结果如图 2(a) 所示。

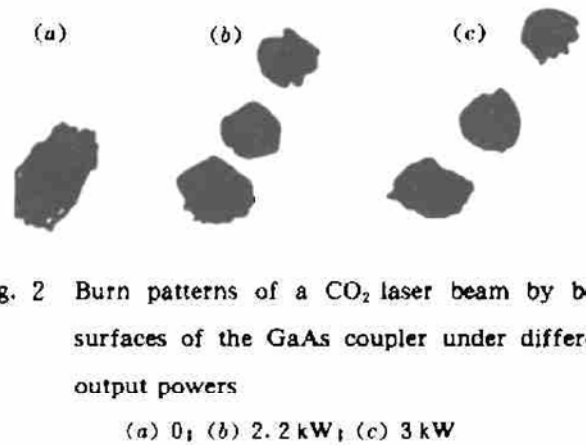


Fig. 2 Burn patterns of a CO_2 laser beam by both surfaces of the GaAs coupler under different output powers

(a) 0; (b) 2.2 kW; (c) 3 kW

3.3 激光输出

在高功率 CO₂ 激光输出情况下,随着输出激光功率的增加,图 2 中 GaAs 外、内表面反射形成的系列光斑不再“抱团”,而逐渐从原来位置移开,移动速度和激光功率增加相一致,斑点间距离逐渐变大,如图 2 中 (b), (c) 所示,而且斑点间距离不同于平行平板下的等间距,而是间隔越来越大。

另外,实验中观察到,当激光功率高达 3 kW 时,点 1 的位置与无激光输出时相比无明显变化,这说明在高功率 CO₂ 激光作用下,GaAs 腔片镀增透膜的外表面热变形较小。由理论分析知,腔片变形主要是内表面。

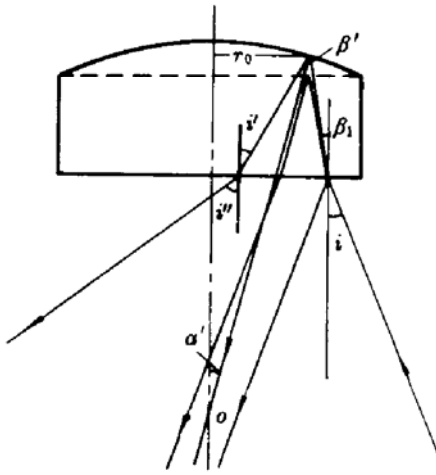


Fig. 3 Computational model of thermal distortion of a GaAs coupler

由点 1, 2 两点之间的距离可以确定内表面之变形量,如图 2 和图 3 所示。

如果 CO₂ 激光束的入射角为 i , 折射角为 β_1 , 则

$$\frac{\sin i}{\sin \beta_1} = n_0 \cdot \left[1 + \frac{dn}{dt} \cdot \Delta T(r \cdot l) \right] \quad (13)$$

这里 r_1, l 为 CO₂ 激光束入射点的坐标, dn/dt 为折射率温度变化数。

由图 3 可知,

$$\beta' = \alpha' + \beta_1 \quad (14)$$

这里 β' 为 CO₂ 激光束对于 GaAs 内表面之入射角, α' 为内表面入射点与曲率中心 o 之连线与腔面法线之夹角, CO₂ 激光束经内表面反射后入射外表面之入射角为 i'

$$i' = \alpha' + \beta' \quad (15)$$

根据折射定律

$$\sin i'' / \sin i' = n_0 [1 + \Delta T(r_2, l) \cdot dn/dt] \quad (16)$$

由图 3 知,如果接收屏至 GaAs 窗口的距离为 L , 则 1, 2 两点间距离 Δ 为

$$\Delta = L(\operatorname{tg} i'' - \operatorname{tg} i') + (r_1 - r_2) \quad (17)$$

这里, r_1, r_2 分别为 CO₂ 激光束入射点和出射点之坐标, 由图 3 得

$$r_1 - r_2 \approx l(\operatorname{tg} \beta_1 + \operatorname{tg} i') = i[\operatorname{tg} \beta_1 + \operatorname{tg}(2\alpha' + \beta_1)] \quad (18)$$

耦合窗口 GaAs 的温升不太高, 一般情况下 ΔT 小于 250 K, 折射率温度系数 $dn/dt = 149 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 忽略折射率随温度的变化, 当入射角 i 足够小时, 由公式 (13) ~ (18) 求得

$$\Delta = 2n_0 \alpha' L + l(2\alpha' + 2i/n_0) \quad (19)$$

公式 (19) 的物理意义十分明显, 当角度 $\alpha' = 0$, 即耦合窗口为一平行平板时, $\Delta = l \cdot 2i/n_0$, 与公式 (12) 结果一致。

确定了 Δ 后, 内表面热变形之曲率半径

$$R = r_0 / \sin \alpha' \quad (20)$$

如图 3 所示, 当入射角 i 足够小, $r_0 \approx r_1, \Delta \approx 2n_0 \alpha' L + 2l \cdot i/n_0, \sin \alpha' \approx \alpha' = (\Delta - 2l \cdot i/n_0) / (2n_0 \cdot L)$, 代入式 (20), 得

$$R = 2n_0 \cdot L \cdot r_1 / (\Delta - 2l \cdot i/n_0) \quad (21)$$

实验中取 $i = 5^\circ, r_1 = 10.0 \text{ mm}, L = 2.5 \text{ m}$, 得不同功率下的 Δ 值

输出功率 P : 0 2.2 kW 3 kW
间隔 Δ : 0 9.8 mm 13.3 mm

GaAs 的折射率 $n_0 = 3.275$, 由公式(21) 算得 $R = 12.6$ m。

以上分析没有考虑到外表面之变形, 而实验测出的 Δ 包含了外表面变形的影响, 所以代入公式(21) 中的 Δ 应略为小些, R 就相应要大些, 与理论计算值 $R = 14.7$ m 将更为接近。

4 结 论

理论计算和实验检测表明, 对于高反膜红外耦合窗口 GaAs 而言, 在 2~3 kW CO₂ 激光输出时, 它的内表面明显变凸, 其曲率半径的数量级在 10~20 m 之间, 结果对激光器输出光束的选模产生严重影响, 甚至导致窗口本身的破坏。由于篇幅所限, 这里不再论述。

参 考 文 献

- 1 M. Sparus, M. Cottis. Pressure-induced optical distortion in laser windows. *J. Appl. Phys.*, 1973, 44(2): 789~794
- 2 陈清明, 张永方, 李再光. 高功率激光窗口的热透镜效应及补偿. *中国激光*, 1989, 16(8): 459

Study on Thermal Distortion of a GaAs Output Coupler with HR Coatings

Yang Baochun Cheng Zhaogu Chen Gang Luo Jiangtao Wang Runwen
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

Abstract A study on the thermal distortion of a GaAs output coupler with high reflection (HR) coatings in high power transverse-flow CO₂ lasers is presented theoretically and experimentally. Using a reasonable approximation, the GaAs coupler's temperature distribution and thermal distortion are given in formulae. The experimental data coincide well with the theory.

Key words transverse-flow CO₂ laser, HR coatings, GaAs output coupler, thermal distortion