

玻璃板条激光器的热效应

黄国松 张国轩 顾绍庭 顾根才 朱从善

中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海, 201800

1989 年 11 月 27 日收到

本文报道了矩形玻璃板条激光器泵浦感应热效应引起的激光材料热破坏和光学畸变的实验结果, 给出了与实验结果相符的计算公式。

PACC: 4255B; 4410; 4460

一、引 言

板条激光器由于可获得高质量、高平均功率输出而受到重视。YAG 板条激光器已获得 600W 平均功率输出, 与相同功率的棒状器件相比, 其工业加工效果提高了 3 倍^[1,2]。最近两年, 玻璃板条激光器在日本取得了显著进展。保谷玻璃公司用掺钕氟磷酸铵玻璃板条获得 300W 准连续输出^[3]。河野公司采用掺钕浓度为 6wt% 的 LHG5 磷酸盐玻璃板条获得 380W 平均功率输出^[4], 这是目前公开报道的玻璃板条器件的最高水平, 它已经接近 YAG 板条器件水平。棒状玻璃激光器输出平均功率约为 50W^[5], 而棒状 YAG 器件最高输出功率已达 2.3kW^[6]。棒状和板条器件上述差异主要原因在于难以获得足够尺寸的 YAG 板条, 而大尺寸、高质量的玻璃板条制造工艺已相当成熟, 因而板条器件可能更适于玻璃激光器的发展。

玻璃板条热效应的分析是器件设计的关键, 对矩形板条热效应的分析已有详细报道^[7,8], 但尚缺乏与实际器件运转之间的联系。

本文在上述分析工作基础上, 建立了与实际器件运转相符的有关公式, 为玻璃板条器件设计提供依据。

二、玻璃板条的热破坏

厚度为 t 的矩形玻璃板条在泵浦作用下产生温度上升, 达到热平衡的时间为^[7]

$$\tau = \frac{c\rho}{\kappa} \left(\frac{t}{\pi} \right)^2. \quad (1)$$

其中 c , ρ 和 κ 分别为板条材料的比热、密度和热传导系数。对大多数玻璃, $c \simeq 0.7 \text{ J/g}^\circ\text{C}$, $\rho \simeq 2.5 \text{ g/cm}^3$, $\kappa \simeq 0.01 \text{ W/cm}^\circ\text{C}$ 。当 $t = 0.6 \text{ cm}$ 时, $\tau = 6.4 \text{ s}$ 。当用 1Hz 脉冲泵浦板条, 达到热平衡时, 板条内温度分布与连续泵浦时的热稳态温度分布之间的波动约为 1%, 因此可用热稳态理论求解板条的热应力断裂极限^[9]

$$(E_{in}f)_{\max} = \frac{12R_t}{\chi_t} LW. \quad (2)$$

其中 E_{in} , f 分别为泵浦脉冲能量和频率, L , W 分别为板条的长和宽, χ 为板条内热耗散功率与泵浦功率之比, 一般取 8%^[10], R_t 为板条材料的热冲击参数, 即

$$R_t = \frac{1-\nu}{\alpha E} \kappa \sigma_{\max}. \quad (3)$$

其中 α , E , ν 和 $\sigma_{\max}$ 分别为板条材料的热膨胀系数、杨氏模量、泊松比和抗张强度。板条材料内部残余应力、表面缺陷和泵浦、冷却的不均匀等因素, 使实际能承受的最大泵浦功率约为理论值的一半, 即

$$(E_{in}f)_{\max} = (P_{in})_{\max} = \frac{6R_t}{\chi_t} LW. \quad (4)$$

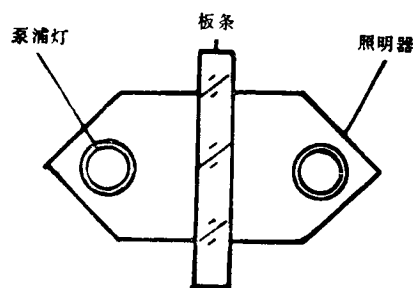


图1 玻璃板热破坏实验装置



图2 玻璃板的热破坏

选取若干不同热性质的钹玻璃进行热破坏实验以验证(4)式。表1给出这些玻璃的物理参数。玻璃板的尺寸为 $100 \times 40 \times 6 \text{ mm}^3$, 实际被泵浦体积为 $80 \times 25 \times 6 \text{ mm}^3$, 图1示出实验装置。所采用的泵浦灯尺寸为 $\phi 8 \times 70 \text{ mm}$, 三角形照明器顶角为 93° , 开口宽度为 25 mm , 长为 80 mm 。以去离子水作全腔冷却, 水流量为 30 l/min , 水温控制在 $15 \pm 1^\circ \text{C}$ 。每个脉冲泵浦能量为 186 J , 脉冲宽度为 $500 \mu \text{s}$ 。激光器在理论泵浦功率极限的 40% 下运转, 然后以 1 Hz 的速率逐渐增加泵浦脉冲频率, 并达到热平衡, 直到玻璃板发生炸裂为止。由产生炸裂时的脉冲频率和每个泵浦脉冲能量求出破坏功率。图2为典型的破坏照片。表2给出实验测量结果和利用表1数据按(4)式计算的结果。上述结果表明, (4)式作为实际板条器件运转时的热破坏功率负载具有足够的准确度。

表1 几种钹玻璃的热物理性质

玻璃牌号	玻璃类型	ν	α ($10^{-6}/^\circ \text{C}$)	E (10^3 kg/cm^2)	κ ($10^{-3} \text{ W/cm}^\circ \text{C}$)	$\sigma_{\max}$ $10^3 (\text{kg/cm}^2)$	R_t (W/cm)
N2135	磷酸盐	0.27	12.0	5.64	5.6	0.65	0.4
SPG-10	磷酸盐	0.23	9.2	6.00	7.5	0.56	0.59
N0335	硅酸盐	0.22	8.0	7.60	10.1	0.94	1.20
N1035	硅酸盐	0.22	8.9	7.50	14.4	0.89	1.50

要使板条器件长期稳定运转, 泵浦平均功率必须在极限值的 0.7 以下。设板条器件

表 2 板条热破坏时的泵浦功率极限

玻璃牌号	产生热破坏时的平均泵浦功率 $\bar{P}_{max}$ (W)	泵浦功率极限 (W/cm ³)	
		实 验 值	计 算 值
N2135	1116	93	95
SPG-10	1488	124	128
N0335	3534	295	286
N1035	3720	310	312

激光转换效率为 η , 那么单位体积工作物质的输出平均功率为

$$\bar{P}_{out} = 52R\eta/t^2 \quad (\text{W/cm}^3). \quad (5)$$

当板厚 t 取 6mm, 激光转换效率 η 取 1.5% 时, 对 N2135 玻璃, $\bar{P}_{out} \approx 1\text{W/cm}^3$, 对 LHG-5 玻璃, $\bar{P}_{out} \approx 2\text{W/cm}^3$. 文献[4]的 LHG-5 玻璃板输出达 380W, 但其 $\bar{P}_{out}$ 也只有 1W/cm^3 . 文献[11]中用的玻璃板体积约为 20cm^3 , 而作者却认为该玻璃板输出可以达到 125W, 这时其 $\bar{P}_{out}$ 达到 6W/cm^3 以上. 该文报道的激光效率为 1%, 按(5)式计算, 其安全运转功率约为 25W. 因此, 该文作者认为其激光器在 5Hz 频率下运转可获得 125W 输出的观点值得商榷. 因为在这条件下运转, 其热应力已超过 N2135 玻璃机械强度的 3 倍, 目前还不能制造出如此高强度的激光玻璃.

三、热透镜效应

玻璃板在泵浦作用下产生温度上升, 热传导使温度产生一定的分布, 由于材料折射率温度系数和热应力的作用, 使原来均匀介质内部折射率呈一定分布, 光束沿着非均匀介质传播时将发生偏转. 当温度分布只在板厚方向上并有对称性时, 光束沿 z 轴传播时将聚焦成一根线, 矩形板呈柱透镜效应. 图 3 所示矩形板的折射率热变化已在文献[7]中给出, 我们将其中的 (62a) — (64b) 式改写成

$$n_{x,y}(y) = n_{x,y}^0 - \frac{1}{2} \alpha_{x,y} y^2. \quad (6)$$

其中 $n_{x,y}(y)$ 分别为 x, y 方向偏振光在 y 方向上的折射率分布, 而

$$n_{x,y}^0 = n_0 + \frac{Q t^2}{24\kappa} (p \mp q), \quad (7)$$

$$\alpha_{x,y} = \frac{Q}{\kappa} (p \mp q), \quad (8)$$

$$n_0 = n + \left(T_c + \frac{Q t}{2\lambda} + \frac{Q t^2}{12\kappa} \right) \beta$$

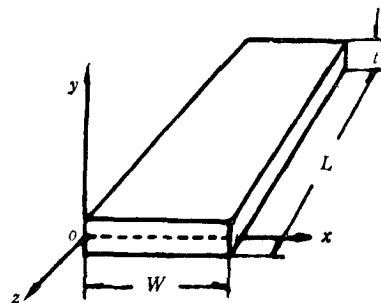


图 3 矩形板坐标

$$p = \beta - \frac{\kappa}{2M_s} (C_1 + 3C_2),$$

$$q = \frac{\kappa}{2M_s} (C_1 - C_2)$$

上列各式中, Q 为材料单位体积热耗散功率, T_c 为冷却剂温度, λ 为板表面热交换系数, n , β , p , q 和 C_1 , C_2 分别为材料的折射率、折射率温度系数、应力热光系数、热应力双折射系数和应力光学系数, M_s 为材料的品质因素, 即

$$M_s = \frac{1-\nu}{\alpha E} \kappa.$$

当自然光沿板轴向 z 传播时, (6)–(8) 式可近似为

$$n(y) = n^0 - \frac{1}{2} \alpha y^2, \quad (9)$$

$$n^0 = n_0 + \frac{Ql^2}{24\kappa} p, \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{Q}{\kappa} p. \quad (11)$$

由于 $\alpha L \ll 1$, 板的热畸变可等效成类柱透镜^[7], 对自然光其热透镜焦距为

$$f_H \simeq \frac{1}{\alpha L} = \frac{\kappa}{pQL}. \quad (12)$$

用同样方法可得到圆棒工作物质的热透镜焦距

$$f_r = \frac{2\kappa}{PQL} \quad (13)$$

在相同泵浦功率密度下, 矩形板的热畸变较圆棒大 1 倍, 因此板状激光器中光束不应沿轴向传播。

当矩形板沿宽度 x 方向温度不均匀时, 沿 z 轴传播的光束将发生象散并难以补偿, 而沿传播方向 z 轴上的温度不均匀只改变光波面的位相, 不发生波面的畸变。

为减轻热畸变对激光输出的影响, 使光束在板两大面之间内全反射形成锯齿状光路, 在两次反射中热畸变将被抵消。但是, 沿板厚方向上的热畸变将不能补偿, 并且在每一次反射时, 还将引进板面形加工带来的影响。因此, 板状激光器对板面形加工和宽度方向上的泵浦均匀性和热边界条件均提出严格的要求。

表 3 板条的热透镜效应

$\bar{P}_{in}$ (W)	y 方向热透镜焦距 f_y (cm)		x 方向热透镜焦距 f_x (cm)
	实 验 值	计 算 值	
686	243	245	-9800
988	178	170	-6500
1372	140	122	-4800
2059	78	82	-2900

为了达到上述要求,设计了如图 1 所示的三角形照明器,其顶角为 100° , 开口宽度为 45mm, 长为 250mm, 泵浦灯为 $\varnothing 12 \times 230\text{mm}$ 的脉冲氙灯。该照明系统在板宽度方向上的照度起伏为 7%。玻璃板为 $300 \times 60 \times 6\text{mm}^3$ 的 N2135 玻璃, 泵浦体积为 $230 \times 45 \times 6\text{mm}^3$, 玻璃板两大面用水冷却, 两侧面加绝热材料以减小边界效应。热透镜效应测量采用经扩束后的 He-Ne 激光(非偏振), 在玻璃板达到热平衡后测量类柱透镜焦距。表 3 给出实验结果和按(12)式计算的结果。计算中所用的玻璃参数为: $p = 1.1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $\kappa = 0.0056\text{W}/\text{cm}^\circ\text{C}$, $L = 250\text{mm}$, $Q = 0.08\bar{P}_{in}$ (单位体积材料的平均泵浦功率)。表 3 的结果表明, 由于泵浦和冷却的不均匀以及边界热传导的存在, 在板宽度方向上有轻微的热畸变, 沿 z 轴传播的光束产生严重的象散。但在厚度方向上的热畸变, 表 3 中的结果说明理论公式(12)准确地描述了板条的热畸变。

当光束在板条内部以波导方式传播时, 热畸变不会引起聚焦效应。测量板条输出光束发散角与泵浦脉冲频率 f 的关系(见图 4), 结果表明, Z 字形光路与直通光路相比, 光束发散角减了 3 倍以上。

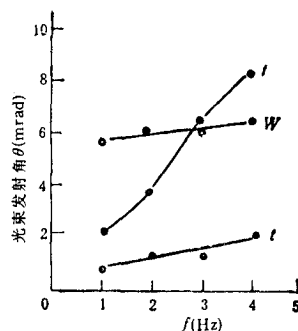


图 4 板条输出光束发散角与泵浦脉冲频率的关系(940J/脉冲)
● 为直通光路; ○ 为 Z 字形光路

四、谐振腔的热变化

激光材料的热透镜效应使在谐振腔内振荡的光束不再是在均匀介质中传播、而是相当于在均匀介质腔内插入一透镜, 其结果改变了腔的损耗和振荡模的特性。用类透镜等效腔可描述腔的变化^[12]。

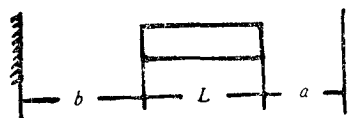


图 5 含有类透镜介质的平行平面腔

其中 A, B, D 分别为光线在含有类透镜介质的腔内单程传输矩阵的各元素, R_1, R_2 为腔片曲率半径。如图 5 所示的平行平面腔, G 因子的表达式为^[13]

$$\begin{aligned} G_1 &= A - \frac{B}{R_1}, \\ G_2 &= D - \frac{B}{R_2}. \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} G_1 &= \left(1 - \frac{L}{nf_H}\right)^{1/2} - \frac{b}{f_H}, \\ G_2 &= \left(1 - \frac{L}{nf_H}\right)^{1/2} - \frac{a}{f_H}. \end{aligned} \quad (15)$$

实验中采用平行平面腔, $a = 23\text{cm}$, $b = 11\text{cm}$, 板条长度 $L = 30\text{cm}$ 。当激光沿着板条轴向振荡时, 由于热透镜效应使 G 因子发生变化, 将热透镜焦距测量值和谐振腔参数代入(15)式, 得到谐振腔随平均泵浦功率增加而变化的情况, 如图 6 所示。其中 G_y 和 G_z 分别代表板条厚度方向和宽度方向 G 因子的变化。泵浦功率增加导致热透镜焦距变短,

板条厚度方向上 G_z 因子减小, 腔往低损耗区运动, 而宽度方向上呈负透镜效应, 因而腔 G_x 因子大于 1, 腔往高损耗区运动。当光束以波导方式振荡时, 板条厚度方向上热畸变的影响被偶次数内全反射后相抵消, 而宽度方向上谐振腔损耗随着重复频率增加而增大, 激光输出能量下降, 因此板条激光器不能采用处于介稳状态的平行平面腔结构。

为了克服输出能量随重复频率增加而下降的情况, 设计了 $G_1 = 1$, $G_2 = 0.9$ 的谐振腔, 在与上面相同的条件下运转, 输出能量基本不变。图 7 为上面两种谐振腔结构的实验结果。以上结果表明, 板条激光器应采用稳定腔结构。

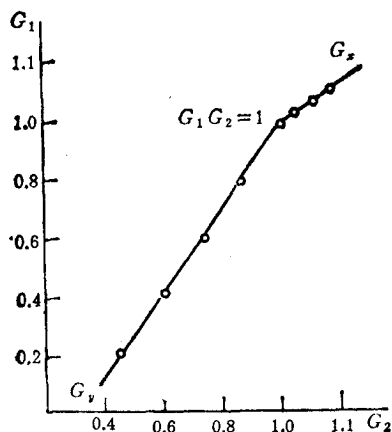


图 6 谐振腔随平均泵浦功率增加的变化

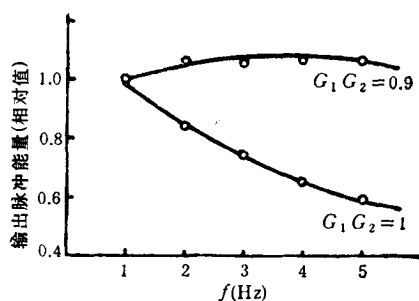


图 7 激光输出脉冲能量随脉冲频率的变化

五、结 论

从本文的分析和实验结果得到如下结论:

- (4)和(5)式准确地描述了矩形板条激光器产生热破坏时的平均泵浦功率和安全运转的输出功率, 可作为实际器件的设计公式。
- 板条激光器的热透镜效应由(12)式可以精确地计算。由于板条热效应较圆棒大 1 倍, 因此板条器件中光束不应沿轴向振荡或放大。
- 激光束在板条内以波导方式传播, 光束发散角显著减小, 板条激光振荡器容易获得 10 倍以下衍射极限角的激光输出。
- 板条器件不能采用介稳腔, 必须用稳定谐振腔结构。

- [1] L. Holmes, *Laser Focus*, 22(1986), 58.
- [2] *O Plus E*, (94)(1987), 90.
- [3] *O Plus E*, (106)(1988), 123.
- [4] H. Sekiguchi *et al.*, Digest of Ann. Meeting of Japan Phys. Soc., (1989), 810.
- [5] N. E. Alekseev *et al.*, *Sov. J. Quantum Electron.*, 15(1985), 1132.
- [6] *O Plus E*, (102)(1988), 105.
- [7] J. M. Eggleston *et al.*, *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-20(1984), 289.
- [8] T. J. Kane *et al.*, *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-21(1985), 1159.
- [9] 周峰等, 物理学报, 33(1989), 247.

- [10] S. Basu, R. Byer, *Opt. Lett.*, **11**(1986), 617.
- [11] 张梅珍等, 激光与红外, **19**(2)(1989), 16.
- [12] H. Kogelnik, *Bell. Syst. Tech. J.*, **44**(1965), 455.
- [13] J. Steffen *et al.*, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-3**(1972), 239.

THERMAL EFFECTS IN Nd:GLASS SLAB LASERS

HUANG GUO-SONG ZHANG GUO-XUAN GU SHAO-TING GU GEN-CAI ZHU CONG-SHAN

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai, 201800

(Received 27 November 1989)

ABSTRACT

In this paper, the characters of thermal fracture and optical distortion pump-induced in Nd: glass slab lasers are described. Both the calculation formulas and the experimental results are given. The calculation results are well consistent with the experiments.

PACC: 4255B; 4410; 4460