

文章编号: 1001-4322(2002)04-0493-04

板条侧面绝热技术研究*

蔡 震, 杨成龙, 杨森林, 姚震宇

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 分析了当侧面绝热不彻底时所带来的侧向温度梯度对板条光程畸变造成的影响, 提出采用吸收材料吸收板条的自发辐射, 控制吸收材料的温升使之与板条中心的平均温度相同的方法来实现板条侧面绝热, 并给出了“隔热层+吸收层+铜热沉”的绝热结构的设计方法。板条热透镜效应实验结果表明, 在 500Hz 重复频率下, 未装绝热结构的板条热焦距为 0.78m, 而装有绝热结构的板条的热焦距为 1.93m, 热聚焦大为改善。

关键词: 板条激光器; 光学畸变; 热聚焦; 绝热

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

二极管泵浦固体激光器工作时, 输入激光工作物质中的能量只有部分转化为激光输出, 剩余能量一部分转化为荧光损耗, 其它能量都转化为热。热使工作物质温度升高, 引起工作物质发光特性发生变化, 如荧光谱线加宽, 荧光寿命缩短, 导致激光器阈值升高和效率降低。因此在激光器工作时, 必须对工作物质进行冷却。而激光工作物质一方面由于吸收光泵辐射发热, 另一方面由于通水冷却, 二者共同造成工作物质内部温度分布不均匀, 形成温度梯度。温度梯度的存在会使激光介质内部形成折射率梯度和应力分布, 引起激光束产生聚焦、双折射和退偏振等热效应, 从而降低激光器的光束质量和功率水平。为了减小热效应对激光器带来的不利影响, 1969 年 Martin 提出了采用矩形板条来消除应力双折射^[1], 在此基础上 1975 年 Hulme 进一步将工作物质的几何结构发展成为之字形光路板条 (如图 1 所示)^[2], 在理想情况下 (即认为板条泵浦均匀、侧面无限大, 温度梯度为严格垂直于泵浦面的一维分布), 之字形板条的热效应能够得到完全补偿, 此时板条中不存在一阶光程畸变。但在实际的有限尺寸板条中, 由于板条存在自由表面, 使得板条侧面边缘的应力分布不同于板条中心的应力分布, 因此存在因反射面变形、应力光学和端面效应而造成的热聚焦。特别是当板条存在因侧面绝热不彻底而造成的侧向 (x 方向) 温度梯度时, 会加剧板条的热聚焦。本文从改善侧向温度梯度造成光学畸变的角度出发, 开展了之字形光路板条侧面绝热技术研究。

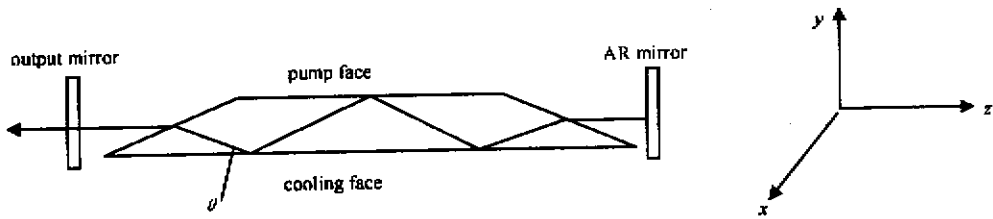


Fig. 1 Schematic of a zig-zag slab laser

图 1 之字形光路板条激光器

1 侧向温度梯度对有限板条热聚焦的影响及绝热方案的提出

当光束在板条内传输时, 由侧向温度梯度所带来任一点的光程变化可表示为^[3]

$$\Delta p_{p,t}(x) = \left\{ \frac{dn}{dT} + E\alpha[B_{\perp} \cos^2(\theta) + B_{\parallel} \sin^2(\theta)] + (1 + \nu)\alpha n \sin^2(\theta) \right\} \bar{T}(x)l \tag{1}$$

式中: E 为杨氏模量; n 为板条的折射率; α 为板条的热膨胀系数; ν 为泊松比; $B_{\perp}, B_{\parallel}$ 为板条的应力光学张量; l 为板条内的光程长度; θ 为光束的传播角度; $\bar{T}(x)$ 是板条的平均温度。由 (1) 式可以看出: 当侧面完全实现绝热时, $\bar{T}(x)$ 是一个定值, 对板条的热聚焦没有影响, 它仅会在整个光束的波阵面上造成共同的相位变化; 但当侧面绝热不彻底时, 此时 $\bar{T}(x)$ 将不再是定值, 由此引起的光程变化不均匀将引起光束波前畸变。

* 收稿日期: 2001-11-17; 修订日期: 2002-03-27
基金项目: 国家 863 激光技术领域资助项目 (863-401-1)
作者简介: 蔡 震 (1970-), 男, 祖籍江西, 硕士, 工程师, 主要研究方向为二极管泵浦固体激光器; 绵阳 919-1013 信箱。

为了减小侧面方向上的温度梯度,必须对板条侧面进行绝热处理。通常情况下研究人员都是通过增加板条侧向热阻的方法来减小侧向温度梯度。实验表明当激光器的功率较低时,这种被动绝热的方法是行之有效的,但对高功率的激光器而言,这种被动结构的绝热效果就不太理想了。

本文提出一种主动方式的绝热方法,希望通过控制板条两个侧表面的温度使之与板条中心的平均温度相同,从而阻止板条侧面方向上的热流,实现板条绝热。根据这一思想,受文献[4]的启发,提出了如图 2 所示的板条绝热结构。绝热结构由吸收层、隔热层及带循环水冷却的铜热沉组成,采用吸收层的目的是为了吸收板条侧面方向的自发辐射;采用隔热层的目的是为了减少吸收层对板条侧面的加热,以保证板条中的一维温度分布;采用带冷却水道的铜热沉的目的是为了通过控制其中冷却水的温度和流量来控制吸收层的温升使之与板条中心的平均温度相同,从而阻止侧向热流实现板条侧面的绝热。

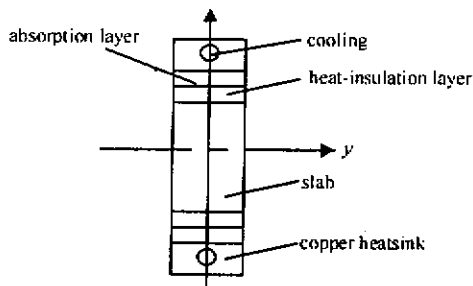


Fig. 2 Slab with adiabatic structure

图 2 带绝热结构的板条

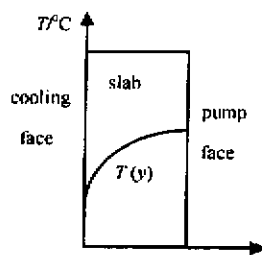


Fig. 3 Temperature distribution of slab

图 3 板条的温度分布

2 绝热结构参数的确定

2.1 板条平均温度的确定

根据上述绝热方案,首先我们对板条的平均温度作出计算,板条的受热状况可简化为如图 3 所示的热物理模型。为了简化分析过程,物理模型的热流是一维的(在实际工作中也希望工作物质的温度分布是一维的)。

在稳态条件下,板条的平均温度可表示为

$$\bar{T}(y) = \frac{q\dot{t}^2}{3k} + \frac{q\dot{t}d}{0.664Pr^{1/3}k} \left(\frac{\mu}{\rho u_{\infty}d} \right)^{1/2} + T_{\infty} \quad (2)$$

式中: k 为材料的热导率; $\dot{q}$ 为板条单位体积的热功率; t 为板条的厚度; T_{∞} 为板条冷却水的温度; d 为板条的冷却长度; Pr 为冷却水的普朗特数; ρ 为冷却水的密度; μ 为冷却水的粘度; u_{∞} 为冷却水的流速。

2.2 板条吸收层中热负载的确定

根据设计思想,吸收层中的热负载就是其所吸收的荧光功率。对于调 Q 激光器来说,由于光脉冲发生在每一个泵浦脉冲期间的末端,因此在泵浦期间里,工作物质中反转粒子数在不断积累的同时,也通过荧光辐射不断地损耗存储的能量,工作物质总的荧光损耗功率为

$$P_{\text{损}} = \eta_q \eta_s \eta_c \left[1 - \frac{\tau}{T} (1 - e^{-\frac{T}{\tau}}) \right] P_{\text{泵浦}} \quad (3)$$

式中: τ 为工作物质的荧光寿命; T 为激光介质的泵浦时间; $P_{\text{泵浦}}$ 为泵浦功率; η_q 为 Nd:YAG 的量子效率; η_s 为斯托克斯效率; η_c 为泵浦耦合效率。而板条的一个侧面所通过的荧光能量即吸收层的热负载为

$$P_{\text{吸收}} = P_{\text{损}} (S_{\text{侧}}^2 / z_1) / 2 (S_{\text{侧}}^2 / z_1 + S_{\text{端}}^2 / z_2 + S_{\text{泵}}^2 / z_3) \quad (4)$$

式中: $S_{\text{侧}}$, $S_{\text{端}}$ 和 $S_{\text{泵}}$ 分别为板条的一个侧平面、端面 and 泵浦面的面积; z_1 , z_2 和 z_3 分别为板条泵浦区在侧面方向、端面方向、泵浦面方向的长度。

2.3 板条吸收层、隔热层材料的选用及其厚度的确定

通过查阅《光学仪器设计手册》^[5],选用了 QB21 作为吸收层材料,这种材料与开展绝热研究相关的性能参数有:热导率为 0.73 W/mK ,在 1064 nm 处以 10 为底的对数吸收率为 2.102 mm^{-1} 。计算可知当材料的厚度为 0.4 mm 时,经吸收层吸收后返回到板条中的荧光能量只有初始值的百分之二,同时考虑到薄玻璃材料加工上有困难,最终将吸收层的厚度确定为 1 mm ,此时可以认为逸出板条侧面的荧光能量被完全吸收。

隔热层材料的选用原则是：(1)应满足板条、吸收层之间的折射率匹配条件；(2)为了有效隔热，材料的热导率越小越好。基于这些考虑，选用了 QF3 作为隔热层材料，这种材料的相关性能参数为：热导率为 0.73W/mK，折射率为 1.575，隔热层的厚度确定为 1mm。

2.4 铜热沉中冷却水温度、流量的确定

为了对板条侧表面有效绝热，必须控制吸收层的散热温度，使其在稳态传热情况下吸收层吸收面的温度等于板条的平均温度，即当吸收层吸收面的温度等于板条中心的平均温度时，铜热沉中冷却水所带走的热量等于吸收层所吸收的荧光功率。

通过进一步对吸收层的热传导方程进行求解，可得到当吸收层吸收面的温度等于板条中心的平均温度时，吸收层冷却面的温度

$$T(0) = \overline{T}(y) - \delta_1 P_{\text{吸收}} / 2k_1 S_{\text{侧}} \tag{5}$$

式中： δ_1 为吸收层的厚度； k_1 为吸收层的热导率。在知道了吸收层冷却面的温度后，可最终确定出层流状态下铜热沉中冷却水的流量、温度。根据文献[6]，当铜热沉中水流的雷诺数小于 2 300 时，此时冷却水流为层流，即冷却水的流量应满足关系

$$4\dot{m} / \pi D \mu \leq 2\,300 \tag{6}$$

式中： D 为冷却水道的直径； $\dot{m}$ 为冷却水的流量。

根据层流状态下冷却水与吸收层之间的换热关系，可进一步计算出所需冷却水的温度

$$T_{1\infty} = T(0) - DP_{\text{吸收}} / 4.36k'S_{\text{侧}} \tag{7}$$

式中： k' 为铜热沉中冷却水的热导率； $T_{1\infty}$ 为冷却水的温度。

3 实验及实验结果

为了检验绝热结构对板条热聚焦所产生的影响，进行了热焦距测量实验。实验中所采用的板条是长边为 52.92mm，短边为 41mm，截面尺寸为 3.3mm×8mm 的布儒斯特窗板条，所采用的二极管的占空比为 20%，峰值功率为 960W，脉宽为 200μs，泵浦电流为 80A。测量热焦距的实验布局如图 4 所示，将准直扩束的 He-Ne 激光束入射至被测板条，由于热透镜效应，通过板条后 He-Ne 光被会聚。此时准确判断会聚点的位置，测得其与板条中心之间的距离 L 是实验的关键，通过适当设计实验条件就可以近似认为此时所测得的 L 就是板条的热焦距 f 。按照热焦距的测量要求，实验布局必须满足两个条件：第一应能准确判断光束通过板条后其束腰的位置，这意味着通过板条后 He-Ne 光束的瑞利距离 Z_r 越短越好；第二由于高斯光束的传输过程与理想平行光束的传输过程存在差别，因此 He-Ne 光束束腰的像距 L 并不与板条的热焦距严格相等，所以实验布局应满足使 He-Ne 光束束腰的像距 L 与板条的热焦距近似相等。

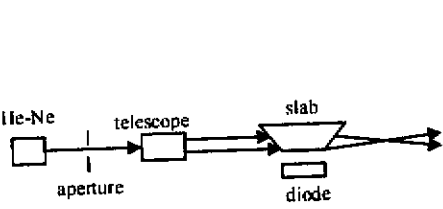


Fig. 4 Focal length measurement layout
图 4 实验布局图

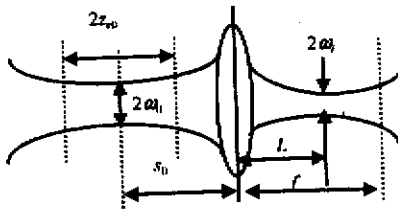


Fig. 5 Transformation of beam
图 5 He-Ne 光束通过热透镜的变换

为了使实验条件满足上述这两点，通过对 He-Ne 光束的传输作出分析(图 5)，可以发现当使扩束后的 He-Ne 光束腰大致位于工作物质中心时(通过高斯光束变换，可确定扩束后 He-Ne 光束束腰位置)，测量的相对误差 η 为

$$\eta = (1 + z_{r0}) / [1 + (z_{r0}/f)^2] \tag{8}$$

式中： f 为板条热焦距； $z_{r0} = \pi \omega_0^2 / \lambda$ 为扩束后的 He-Ne 光束的瑞利距离， ω_0 为扩束后的 He-Ne 光束的束腰。从(8)式可以看出， z_{r0} 越大则测量误差越小。因此为了减小测量误差，应该选用大倍数的扩束镜以便获得较长的瑞利距离 z_{r0} 。

在上述误差分析的基础上，选用了放大倍数为 9 倍的扩束镜(当热焦距小于 4m 时，测量误差小于 15%)，

实验中分别测量了带主动绝热结构的板条和带被动绝热结构的板条在 100~500Hz 重复频率下的热焦距,绘制出了相对应的光焦度变化曲线(图 6),其中曲线 A 为带主动绝热结构板条的光焦度变化曲线,曲线 B 为带被动绝热结构板条的光焦度变化曲线,从曲线中可以清楚看到:在相同的热功率下,带主动绝热结构板条的光学畸变明显小于带被动绝热结构的板条,并且其优势随着热功率的不断提高而表现的更加突出。

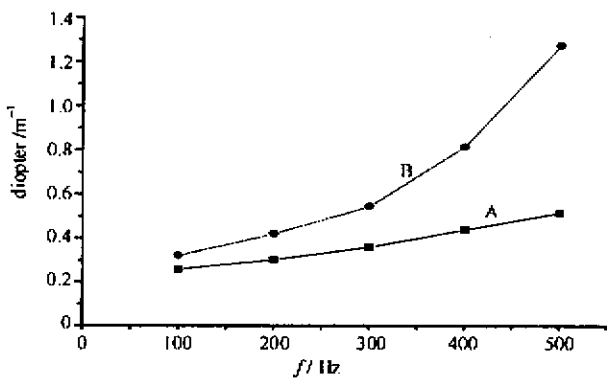


Fig. 6 Curve of dioptr
图 6 光焦度变化曲线

参考文献:

[1] Martin W S, Chernoch J P. Multiple internal reflection face pumped laser[P]. US. Patent:3633:126,1972.
[2] Hulme G J, Jones W B. Total internal reflection face pumped laser[J]. *Proc Soc Photo-optical Instr Eng*, 1975, **69**:38—45.
[3] Kane, Thomas J. Thermal effects in a finite slab[J]. *IEEE Journal of quantum electronics*, 1985, **QE-21**: 1195—1210.
[4] Holder Lonnie E. One joule per Q-switched pulse diode-pumped laser[J]. *IEEE Journal of quantum electronics*, 1992, **28**(4):986—991.
[5] 王之江. 光学仪器设计手册[M]. 北京:国防工业出版社,1971. (Wang Z J. The design handbook of optical instrument. Beijing:National Defence Industry Press,1971)
[6] 陆大有. 传热基础[M]. 北京:宇航出版社,1987. (Lu D Y. The basic of heat-transport. Beijing:Space Navigation Press,1987)

Study on the adiabatic technology of slab laser

CAI Zhen, YANG Cheng-long, YANG Sen-lin, YAO Zhen-yu

(Institute of Applied Electronics, CAEP, P. O. Box 919-1013, Mianyang 621900, China)

Abstract: On the base of analyzing the thermal lensing effect caused by the temperature-gradient in direction of unpolished-face, a new type construction consisted of absorbing glass, insulative glass and heat sink has been designed for adiabatic structure of slab, and the experiment of thermal focal length of slab has been done. The result proves that the thermal lensing effect of slab has been improved due to adoption of adiabatic construction. The focal length of 1.93m in direction of unpolished—face has been measured from the slab with adiabatic construction at 500Hz, comparing with 0.78m measured from the slab without adiabatic construction.

Key words: slab laser; optical distortion; thermal focus; adiabatic