

LD 泵浦的紧贴式产业化固体绿激光器的研究

刘伟仁 钱龙生 余锦

(中国科学院长春光学精密机械研究所应用光学国家重点实验室 长春 130022)

摘要 通过对 LD 泵浦的固体激光器热效应的分析,给出了计算热效应的理论方法,以及紧贴腔结构的实验方法,对 LD 泵浦的固体激光器的产业化提供理论与实验基础。

关键词 LD 泵浦的固体激光器 紧贴式平平腔激光器

1 引言

随着半导体激光器的发展,LD 泵浦固体激光器的研究也不断迈进,这主要得益于 LD 泵浦的固体激光器同传统的闪光泵浦的固体激光器相比有许多不可比拟的优点:(1)体积小,重量轻,便于携带。(2)寿命长,易于操作和维护。(3)效率高,对电源功率要求低,机械震动小等等。这些优点源于半导体激光器自身的特性决定的,由于半导体激光器的发射谱同固体激光器工作物质吸收谱相匹配,因此可以达到近乎为 1 的吸收效率,进而提高了激光器的整体效率。另外随着半导体激光器价格的不断下降,这种激光器的价格也随之下落。基于以上缘故,半导体激光器泵浦的固体激光器的研究愈来愈广泛和深入,此种激光器发展极快,九十年代就已经从实验室阶段走上了产业化和商品化的阶段,近几年来,国外市场上成型的产品有 $1.06\mu\text{m}$, 532nm , 355nm , 266nm , 430nm , 473nm , 2100nm 等连续和脉冲激光器,国内的绿激光器也形成产业化。尽管半导体泵浦的固体激光器在理论和技术上都已经达到了相当成熟的地步,但在具体的细节问题上尚存在困难须深入研究。例如激光器的工作物质的热效应,光光转换效率,倍频激光的稳定性,激光器的光束质量,激光器的优化设计,产品的成本和加工制作的可行性。上述问题的研究对半导体泵浦的固体激光器的产业化具有重要的指导意义和实用价值。本人拟打算针对产业化的半导体泵浦的固体激光器的关键技术对上述各个问题进行细致和深入的研究。限于篇幅,本文中只讨论其中的一个方面即热效应,并从热效应入手研制开发适合产业化的紧贴式的绿激光器。

2 热效应的分析

同闪光灯泵浦的固体激光器相比,半导体泵浦的固体激光器的热效应要小得多。但在高功率密度泵浦情况下所产生的热效应不得不考虑,否则将导致功率下降,效率降低,输出不稳定,光束质量差等严重后果,另外如采用特殊结构或在工作物质本身热效应大(如 $\text{ND}^{3+}:\text{YVO}_4$)的情况下,热效应也必须考虑。本人从热传导方程入手,逐步深入研究如何解决热效应和利用热效应。为了和实际相符,我们采用如下模型(图1):半导体辐射出的光经过聚光系统的整形和聚焦后会聚到工作物质上(厚度为 d),形成一个近似圆形的光斑,光强分布为高斯分布,直径约 $100\ \mu\text{m}$,由于晶体很薄,可以近似为平面波。以光斑中心为坐标原点,光场振幅分布为:

$$U(x, y) = u_0 \times \exp[-(x^2 + y^2)/\omega^2]$$

$$\text{光强 } I(x, y) = |U \times U^*| = I_0 \times \exp[-2(x^2 + y^2)/\omega^2]$$

当高斯光束泵浦晶体时,晶体内部吸热,温度升高,晶体内的发热率同晶体在该点的光强成正比,由物理光学容易得出晶体内的发热率为:

$$F(x, y, z) = \frac{2P}{\pi\omega^2}(1 - e^{-ad}) \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega^2}\right] \exp(-az)$$

式中 P 为半导体激光器的功率, ω 为光腰半径, Z 为距端面的长度, d 为晶体的厚度。

在分析晶体热效应之前做如下假设:(1) 激光晶体的物理特性不随温度改变(2) 晶体为圆对称,晶体侧面低温冷却,恒温 T_0 ,端面空气冷却,近似为绝热。(3) 晶体为各向异性,导热轴和晶体主轴重合。

由热传导定律可以给出如下方程:

$$c\rho \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial t} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = F(x, y, z)$$

式中 c 为晶体的比热, ρ 为晶体的密度, q_x, q_y, q_z 为晶体沿 x, y, z 方向的热通量, F 为光泵产生的发热率, T 为温度, t 为时间。

由于晶体侧面低温传导冷却,热交换系数很大,端面空气冷却,热交换系数很小,相比之下沿 z 轴方向的热流量可以近似为零。忽略 q_z 则方程化为:

$$c\rho \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial t} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + F(x, y, z)$$

由数理方法化简为

$$\frac{\partial T(x, y, z)}{\partial t} = k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{1}{c\rho} F(x, y, z) \quad (1)$$

将 $F(x, y, z) = \frac{2P}{\pi\omega^2}(1 - e^{-ad}) \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega^2}\right] \exp(-az)$ 代入上式整理得:

$$\frac{\partial T(x, y, z)}{\partial t} = k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_0 \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega^2}\right] \exp(-az) \quad (2)$$

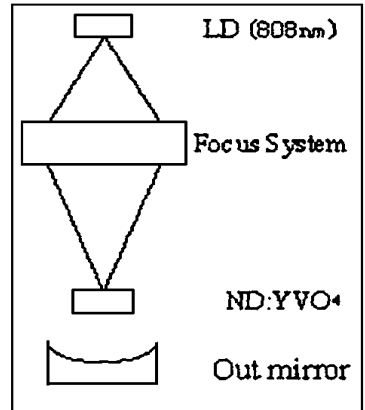


Fig. 1 Model structure of diode-pumped laser

当激光器稳定时, $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ 。上式化为:

$$k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_0 \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega^2}\right] \exp(-az) = 0 \quad (3)$$

为解此方程用分离变量法, 令 $T(x, y, z) = T(x, y)T(z)$, 代入上式得:

$$k_x \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial x^2} T(z) + k_y \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial y^2} T(z) + k_0 \exp\left(-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega^2}\right) \exp(-az) = 0 \quad (4)$$

观察易得方程有如下形式的解:

$$k_x \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial y^2} + k_0 \exp\left(-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega^2}\right) = 0 \quad (5)$$

$$T(z) = \exp(-az) \quad (6)$$

现在的任务是解 $T(x, y)$, 为使方程具有一般性, 方程分两种情况讨论: (1) $k_x = k_y = k$; (2) $k_x \neq k_y$

当(1) $k_x = k_y = K$ 时方程化为:

$$\frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial y^2} + \frac{k_0}{k} \exp\left(-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega^2}\right) = 0 \quad (7)$$

由于模型为圆对称, 采用在柱坐标系讨论更加方便:

$$\text{在柱坐标系下方程化为 } T_{rr} + \frac{1}{r} T_r + T_{\theta\theta} + \frac{k_0}{k} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2}\right) = 0$$

对称情况下, T 只是径向函数, 与角度无关, 即

$$T_{rr} + \frac{1}{r} T_r + \frac{k_0}{k} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2}\right) = 0 \quad (8)$$

此时方程已经化为一元二阶非奇次微分方程, 经过计算方程有如下形式的解:

$$T(r) = C_1 \ln r + C_2 \frac{e^{-r^2}}{r\omega^2} dr + C_2$$

式中各参数由边界条件和初始参数确定, 但此方程仍不能给出解析形式, 因此须另寻办法利用计算方法知识通过三点差分法将方程(8)写成离散形式:

$$\frac{T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}}{h^2} + \frac{1}{r_i} \frac{T_{i+1} - T_{i-1}}{2h} + \frac{k_0}{k} \exp\left(-\frac{2r_i^2}{\omega^2}\right) = 0$$

边界条件

$$T_\alpha = T_\beta = T_0$$

这时一个由 $(n-1)$ 个未知数 $(n-1)$ 个方程组成线性方程组, 用追赶法求解, 由计算机可以得出各点的 T 值。当给出确定参数时可以得到如下图形(图 2)

当 $k_x \neq k_y$ 时, 方程(5) $k_x \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial x^2} = k_y \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial y^2} + k_0 \exp\left(-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega^2}\right) = 0$ 。通过五点差分法也可以写成离散形式:

$$\frac{1}{k_x} \left(\frac{T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j}}{h^2} \right) + \frac{1}{k_y} \left(\frac{T_{i,j+1} - 2T_{i,j} + T_{i,j-1}}{2h} \right) + \frac{k_0}{k} \exp\left(-\frac{2(x_i^2 + y_j^2)}{\omega^2}\right) = 0$$

加上边界条件 $T_{i,j} = T_0$ T 边界

用超松弛法求解, 下图(3)为温度在 x, y 平面上的分布:

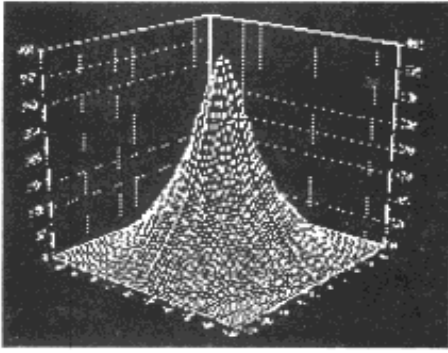


Fig. 2 Temperature distribution in laser medium when $k_x = k_y$

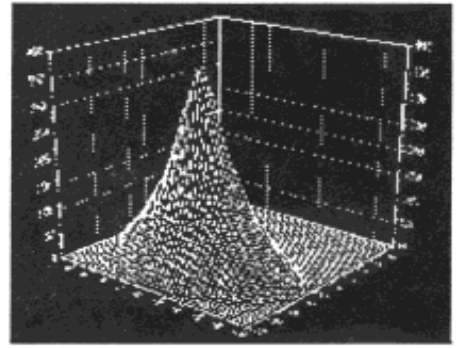


Fig. 3 Temperature distribution in laser medium when $k_x \neq k_y$

由 $T(x, y, z) = T(x, y)T(z)$ 可得各点的空间分布。

我们的目的不仅仅求各点的空间分布,还要求出晶体受热后的膨胀,进而求出中心处的曲率半径:

$$\begin{aligned} \text{设晶体的线胀系数为 } k_l, \text{ 则 } dl &= dz(1 + k_l(T - T_0)), \text{ 在晶体}(x, y) \text{ 处, 晶体的厚度变为} \\ d(x, y) &= \int_0^d dl = d + k_l \int_0^d dz(T(x, y, z) - T_0) = d - k_l T_0 d + k_l \int_0^d T(x, y) \exp(-az) dz \\ &= d - k_l T_0 d + k_l T(x, y)(1 - \exp(-ad))/a \end{aligned}$$

最后根据各点的厚度可以求出各点的曲率半径,由于激光的束腰半径同泵浦光斑半径相当,所以应在以内对各点求曲率半径的平均,既得出作为谐振腔的半径 R 。

3 实 验

为了验证理论的正确性,我们采用紧贴式平平腔激光器做实验,实验中采用功率为 1W 的半导体激光器作为泵浦源,经过光学系统的整形和聚焦后,在晶体端面上形成一个功率为 600mW,半径为 $100\mu\text{m}$ 的近平面波高斯光束,晶体的厚度为 1mm 的 ND:YVO₄ 晶体,经倍频晶体 KTP 后出射 532nm 的绿光,两块晶体用透明胶水粘合,晶体镀双增透膜,该结构简单,而且不需要调整光路,就可以出光,非常适合产业化批量生产,该实验中 KTP 晶体厚度为 3mm,当泵浦功率为 1W 时,输出 532nm 波长绿光 12mW,发散角为 8.2mrad。实验中通过测定不同泵浦功率下绿光的发散角,便可以推算出由于热效应产生的谐振腔的曲率半径,由实验可以看出,当泵浦光的功率越高时,激光的发散角越大,这和欲想结果一致。为了使泵浦光斑半径与由于热效应产生的谐振腔的光腰半径相一致,适当调整泵浦功率和晶体厚度,使之达到最优化以提高效率。该实验结果和理论计算值略有差别,这可能由于晶体的热透镜效应或参数误差造成的,限于篇幅,热透镜效应将在另外文章中讨论,实验结果和理论计算在误差范围内是一致的。

4 结 论

通过对半导体激光器泵浦的固体激光器的热效应的研究,我们能够定性和定量的了解热效应对固体激光器的影响,有了这些结论可以指导我们如何在热效应存在情况下重新设计激光器的结构参数,或采取相应的补偿措施来拟补热效应带来的不良后果,同时也启发我们在热效应不可避免的情况下,如何利用热效应来设计激光器的结构,并为半导体激光泵浦紧贴式的绿激光器产业化提供理论和实验基础。

参 考 文 献

- 1 郑朝思. 半导体激光泵浦各向异性介质的热效应. 中国激光, 1997, 8: 679 ~ 683
- 2 Farruth U V, Buoncrisliani A M, Byyik C E, et al. An analysis of the temperature distribution in finite solid state laser rods. IEEE J. Quant Electr, 1988, 24: 2253 ~ 2255

Study on Diode-pumped Microchip Solid-state Laser for Industry

LIU Wei-Ren, QIAN Long-Sheng, YU Jin

(*Laboratory of Applied Optics,*

Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Changchun 130022)

Abstract

Study on the thermal effect of diode-pumped microchip solid-state laser for industry is provided, also the means to realize the structure of compact tie of micro-chip. It provides the basis of theoretical and laboratory for industry of diode-pumped solid-stated laser.

Key words: Diode-pumped solid-stated laser, Compact micro-chip

刘伟仁 男, 1971 年生. 中国科学院长春光机所应光室, 现在半导体泵浦的蓝绿固体激光实验室攻读博士学位, 本人长期在激光技术领域工作, 并在蓝绿激光器方面获得多项研究成果。