

LD 侧泵浦固体激光器的热效应分析和模拟研究^{*}

姜东升^{**} 周寿桓

(华北光电技术研究所 北京 100015)

胡渝 刘盛纲

(电子科技大学应用物理所 成都 610054)

【摘要】 针对大功率二极管阵列侧泵浦固体激光器产生的热效应进行了分析;同时根据所建立的理论模型,利用计算机模拟了不同泵浦强度、不同泵浦结构和不同边界冷却条件下,固体工作物质内热透镜焦距的变化和热致退偏强度的分布,并在此基础上提出了补偿热效应的具体措施。

关键词 二极管阵列; 侧泵浦; 热透镜效应; 热致退偏效应

中图分类号 TN245; TN248.1

相对于传统的灯泵固体激光器而言,由于二极管泵浦的固体激光器的泵浦光谱与固体工作物质的吸收光谱相匹配,从总体上说热效应大大减轻。但这并不意味着,在二极管泵浦的固体激光器中不存在热效应所导致的负面影响。相反,由于固体工作物质的尺寸减小以及采用光学耦合系统,使得在工作物质的局部区域内,泵浦功率密度大大增强,甚至远远高于灯泵固体激光器,这同样会引起很强的热效应,导致很强的热应力、热致双折射、相位畸变、退偏等,严重的还会引起工作物质的破坏。因此在二极管泵浦的调 Q 固体激光器中,尤其是在大功率二极管阵列泵浦下,要充分考虑热效应的影响,采取相应的补偿措施,以获得高光束质量、高重频、大能量的二极管泵浦的调 Q 固体激光的输出。此外,在二极管泵浦的固体激光器中,为了获得大功率激光的输出,通常采用二极管阵列侧泵浦固体工作物质的方式。由于结构上的原因,侧泵浦往往造成泵浦的不均匀,兼之此时泵浦功率较强,大量的泵浦功率转化为热功率,而直接导致在晶体横截面内的温度呈不均匀分布,且不再是以往考虑的温度在晶体内沿径向呈二次型曲线的变化关系,但仍然是径向的函数,这种现象称为工作物质的光学畸变。即使在工作物质中热源分布是均匀的情况下,这种光学畸变也是存在的,只是当工作物质中热源分布是非均匀的情况下。光学畸变变得更为严重而已。光学畸变类型有热透镜和因热应变光弹性效应引起的热致双折射,尤其是热致双折射效应的存在,使激光器在高平均功率泵浦下,线偏光通过工作物质时,光束质量变差且退偏严重,从而导致输出功率降低,大大影响了二极管泵浦固体激光器的总体效率。本文基于此,对大功率二极管阵列侧泵浦下,由于热效应而导致的热透镜和热致退偏进行了详细的理论分析和研究,并利用计算机模拟了不同泵浦功率强度、不同泵浦结构和不同冷却边界条件下,工作物质的横截面内,热致退偏的分布情况和相应的热透镜焦距的变化情况,为进一步采取补偿措施,提供了形象、直观的依据。

1 理论模型

我们针对二极管侧泵浦板条状Nd:YAG固体脉冲激光器的情况,结合其相应的边界条件给出计算分析的模型。假定板条晶体内部发热和沿晶体表面冷却都是均匀的,当激光器运转在高重复频率状态下时,由于脉冲间隔与热弛豫时间相比短得可以忽略不计,激光工作物质很快建立起稳态工作条件,即流出工作物质的热量等于进入其内部的总热量,此时激光晶体的热分布就达到了连续条

件,而热效应仅取决于平均输入功率。由热传导方程可求得板条激光晶体的横截面内任何一点上的稳态温度分布为^[1]

$$\Delta^2 T(x, y) = -Q(x, y)/K \quad (1)$$

式中 K 为热导率, Q 为单位体积均匀发热的功率。

考虑到在实际工作中,激光工作物质存在可采用强制冷却和自然冷却两种情况,因此相应的方程(1)的边界条件也可分为两类:

1) 第一类边界条件为

$$T_n(x, y) = T_c \quad (2)$$

2) 第二类边界条件

$$K \frac{\partial T_n(x, y)}{\partial n} = \lambda(T_c - T_n(x, y)) \quad (3)$$

式中 λ 为工作物质表面的热耗散系数; $T_n(x, y)$ 为工作物质表面的温度; T_c 为工作物质外界的环境温度。

可以看出这个温度分布是非均匀的,由于工作物质中产生的这种温度梯度,引起晶体中产生热应变,进而通过光弹性效应产生折射率变化,导致工作物质横截面内各点的折射率随温度发生变化。引入光弹性矩阵,作为二阶张量的折射率为

$$n_{ij} = [n_0 + \frac{dn_0}{dT}T] \delta_{ij} + \sum_{kl} B_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (4)$$

式中 dn_0/dT 表示折射率随温度的变化; σ_{kl} 是压力分布量; δ_{ij} 是压力相位角; B_{ijkl} 是四阶光弹张量; n_0 是光轴上的折射率。

当激光在板条状工作物质内沿轴向直线通过时,在垂直于光传播方向,即工作物质的横截面内,折射率的分布为

$$n = \begin{vmatrix} n_{xx} & n_{xy} \\ n_{xy} & n_{yy} \end{vmatrix} \quad (5)$$

式(5)的有特征值为

$$n_{\pm} = \frac{1}{2} \left\{ (n_{xx} + n_{yy}) \pm \sqrt{(n_{xx} + n_{yy})^2 + 4n_{xy}} \right\} \quad (6)$$

对于任一组 n'_{xx} , n'_{yy} , n'_{xy} , 特征值均为实数,这样特征向量对应的实际方向可定义为 u_+ 和 u_- , 也即线偏振激光沿着 u_+ 和 u_- 轴方向的折射率分别为: n_+ 和 n_- 。定义 x 轴方向和 u_+ 轴方向的夹角为 β 。根据琼斯矩阵,可得到线偏振激光沿 Z 轴直线通过板条状工作物质时,工作物质横截面内的光场分布为^[2]

$$\begin{vmatrix} E_x(z) \\ E_y(z) \end{vmatrix} = \exp(ikn_a z) \mathbf{R}(-\beta) \begin{vmatrix} \exp(ikn_s z) & 0 \\ 0 & \exp(-ikn_s z) \end{vmatrix} \mathbf{R}(\beta) \begin{vmatrix} E_x(0) \\ E_y(0) \end{vmatrix} \quad (7)$$

式中 $\mathbf{R}(\beta)$ 为偏振面旋转 β 角的旋转矩阵, $\mathbf{R}(-\beta)$ 为其共轭矩阵。

$$n_a = \frac{(n_+ + n_-)}{2} \quad (8)$$

$$n_s = \frac{(n_+ - n_-)}{2}$$

方程(7)即是我们要建立的线偏振激光通过板条状工作物质后发生退偏的理论模型,在此基础上利用计算机模拟了不同泵浦功率下、不同边界冷却条件下,工作物质横截面内的退偏分布和热焦距的变化情况。

2 计算机模拟结果

板条状 Nd:YAG 的尺寸为:3 mm×3 mm×20 mm,激光沿 20 mm 长的方向(即 Z 轴方向)传播,二极管阵列可沿工作物质的+X、-X、+Y、-Y 方向进行侧泵浦,每一方向上的泵浦平均功率为:30 W,强制冷却的温度设置为:25°,泵浦结构如图 1、和图 2 的下半部所示。我们分别模拟了当二极管阵列单面侧泵浦(其他三面强制冷却)、四面侧泵浦(无强制冷却)下,板条状固体工作物质的横截面内由温度梯度所导致的热透镜焦距的变化和热致退偏强度的分布。

图 1 为单面侧泵浦的模拟结果:晶体横截面内 X 方向和 Y 方向的温差分别为: $\Delta T(X)=1.925\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta T(Y)=3.966\text{ }^{\circ}\text{C}$; X 方向偏振的激光退偏强度百分比为: $D_x=0.31\%$,此时晶体中 X 方向和 Y 方向的热焦距分别为: $F_{xx}=2.83\text{ m}$ 和 $F_{yy}=-36.8\text{ m}$ 。同时可看出,由于单面侧泵浦的不均匀性,在晶体的横截面内,激光退偏强度分布也呈不对称性。

图 2 为四面侧泵浦的模拟结果。表明晶体横截面内 X 方向和 Y 方向的温差分别为: $\Delta T(X)=4.392\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta T(Y)=4.393\text{ }^{\circ}\text{C}$; X 方向偏振的激光退偏强度百分比为: $D_x=3.66\%$,此时晶体中 X 方向和 Y 方向的热焦距分别为: $F_{xx}=1.59\text{ m}$ 和 $F_{yy}=1.59\text{ m}$ 。同时可看出,由于四面对称的侧泵浦,在晶体的横截面内,激光退偏强度分布也表现出对称性。

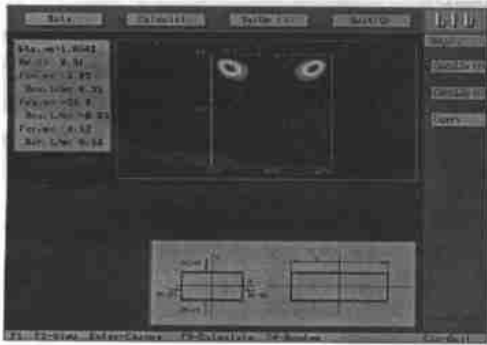


图 1 单面侧泵浦时的热退偏强度分布和热焦距的模拟图

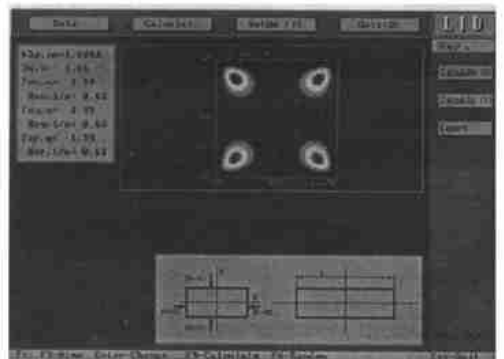


图 2 四面侧泵浦时的热退偏强度分布和热焦距的模拟图

3 热致退偏的补偿

由以上模拟的图像结果来看,无论泵浦是否均匀,热致退偏现象总是存在的,只是泵浦越不均匀,热畸变越剧烈,热致退偏分布越不均匀;同时,泵浦的总功率越强,热致退偏越严重,因此对于大功率二极管阵列泵浦的 Nd:YAG 固体激光器,为了获得高光束质量和高峰值功率的线偏振激光输出,就必须设法消除由此带来的负面影响。当然,加强对工作物质的冷却可降低热效应的影响,但另一方面也可针对热致退偏和热透镜产生的机理,采用相应的技术措施来进行补偿。在实际工作中,热透镜效应可通过激光谐振腔的设计等措施来进行有效补偿,而对热致退偏效应进行补偿就相当困难,这是由于热致双折射效应的主轴在工作物质的横截面上每一点上,都存在两个方向,即 X 方向和 Y 方向,而且大小随所处的位置而发生变化,因此线偏振光通过晶体内部时,不仅发生一系列的退偏,光束的波前也要发生畸变。正是由于热致双折射在晶体内部的这种非均匀分布,才使得采取的补偿措施和方法相当困难。

目前补偿热致双折射所导致的退偏,通常所采取的方法是^[3]:在两块完全相同的激光晶体之间放一个 90° 的石英旋转器,当第一块晶体发射的激光通过 90° 的旋转器后,激光的偏振面就要旋转 90° ,这样本来 X 向偏振的光就旋成了 Y 向偏振,而原来 Y 向偏振的光就变成了 X 向偏振。旋转后的两个偏振方向的光,再通过第二块晶体后,由于两个偏振方向的光线经历了同光程,发生的相位畸变和扭曲也完全一致,这样前一块晶体诱发的双折射就可被另一块晶体抵消掉,从而热致退偏效应就可降至最小。用这种技术可获得多模功率的 $50\% \sim 70\%$ 的 TEM_{00} 输出^[4]。另外,在单块工作物质的激光谐振腔中,也可在工作物质和反射镜之间,放一个 45° 旋转器,同样也可获得热致退偏效应的补偿。

上述技术虽可对热致双折射和双聚焦进行补偿,但是补偿元件的插入损耗也是很明显的,尤其对于二极管阵列泵浦的Nd:YAG激光器,由于其本身增益较低,再兼之腔内插入补偿元件所带来的损耗过大,就很难获得高峰值功率和大能量的激光输出,因此对于二极管泵浦的固体激光器,通过插入补偿元件来修正热致退偏效应就有些得不偿失。

参 考 文 献

- 1 Koechner W. 固体激光工程, 北京: 科学出版社, 1992
- 2 Jae Yong Lee, Hyun Sukim, Ki Yong Um, *et al.* Compensation of polarization distortion of a laser beam in a four-pass Nd: glass amplifier by using a Faraday rotator. OSA on Advanced Solid-State Lasers, 1996, 1: 216~221
- 3 Richards J. Birefringence compensation in polarization coupled lasers. Applied Optics 1987, 26(13): 2 514 ~ 2 517
- 4 Kato K. Parametric oscillation at $3.2 \mu\text{m}$ in KTP pumped at $1.064 \mu\text{m}$. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1991, 27(5): 1 137~1 140

Simulation Study on Thermal Effects of LD Side-pumped Solid State Laser

Jiang Dongsheng Zhou Shouhuan

(North China Research Institute of Electro-Optics Beijing 100015)

Hu Yu Liu Shenggang

(Inst. of Applied. Physics, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract The thermal effects of high power laser diode array (LDA) side-pumped solid state laser are studied and a theoretical model is established. Based on simulated the model, laser depolarized density distribution in the perpendicular of active medium and the change in focus length of the thermal lens at the different pumping density are simulated with different pumping construction and different cooling condition of the lasers. The compensation on thermal effects is also discussed.

Key words laser diode array (LDA); side-pumped; thermal lens; the thermal induced depolarization