

双棒 Nd:YAG 激光器双折射补偿未对准灵敏度的研究

李忠洋¹, 张会云², 闫昕¹, 李继武¹, 邢丕彬¹, 姚建铨²

(1. 郑州大学河南省激光与光电信息技术重点实验室, 河南 郑州 450052; 2. 天津大学精仪学院激光与光电子研究所, 天津 300072)

摘要:在双棒 Nd:YAG 激光器中, 利用一块 90° 石英旋转片来改变激光在两棒间的偏振态, 利用一个望远镜系统在激光棒的两个主面间构成像传递光学系统, 从而达到热致双折射的补偿。在这个补偿系统中, 可能会产生激光棒和透镜横向或纵向未校准以及激光棒倾斜而导致的未校准等情况, 我们对于激光腔内每一种未校准而产生的退偏损耗进行了理论分析。

关键词:应力双折射; 双折射补偿; 热应力; Nd:YAG

中图分类号: TN248

文献标识码: A

Investigation of the Misalignment Sensitivity of a Birefringence-compensated Two-rod Nd:YAG Laser System

LI Zhong-yang¹, ZHANG Hui-yun², YAN Xin¹, LI Ji-wu¹, BING Pi-bin¹, YAO Jian-quan²

(1. Henan Key Laboratory of Laser and Opto-electronic Information Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China;

2. Institute of Laser and Optoelectronics, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A system for the compensation of thermally induced birefringence in laser rods that consists of two identical Nd:YAG laser rods, a telescope to image the principal planes of the rods onto each other and a 90° quartz rotator to change the state of polarization between the rods has been investigated theoretically. In this system, there may be increase of depolarization due to the laser rod and telescope lens transversal or longitudinal misalignment. Theoretical investigation has been done onto each case.

Key words: stress birefringence; birefringence compensation; thermally induced stress; Nd:YAG

1 引言

在高功率 Nd:YAG 激光器中, 因光泵浦热效应, 会在激光棒中产生应力双折射和退偏, 严重妨碍了激光输出能量的进一步提高, 并使光束质量恶化。为了补偿 Nd:YAG 棒中的应力双折射和退偏, 已经研究了很多方法^[1]。较好的方案是在两块完全相同的激光棒中间, 利用一个对称的望远镜系统在激光棒的主面间构成像传递光学系统, 一块 90° 石英旋转片在两棒间交换 r 偏振和 ϕ 偏振^[2], 这样可以较好地补偿固体激光介质的退偏效应, 它可以使退偏损耗从 25% 降低到 5%^[3]。

当谐振腔中的元件未校准时, 会发生退偏补偿不完全的现象。未校准情况包括激光棒和透镜的横向及纵向未校准, 还有棒倾斜时的未校准。当任一元件未校准时对于双折射补偿的灵敏度我们给出了

理论曲线。在二阶近似下, 棒和透镜横向或纵向未校准的灵敏度是相同的, 棒的倾斜导致的退偏损耗很小, 相对于横向未校准和纵向未校准引起的退偏损耗可以忽略不计。我们对于双棒 Nd:YAG 激光器双折射补偿未校准灵敏度的研究对于提高 Nd:YAG 激光器的功率和光束质量有重要意义。

2 双棒串接 Nd:YAG 激光器双折射补偿未校准灵敏度的理论计算

2.1 双折射补偿未校准灵敏度的理论分析

在高功率 Nd:YAG 激光器中, 由于温度变化和热致应力, 棒的折射率将产生变化, 导致了光束在激

作者简介: 李忠洋 (1983 -), 男, 主要从事固体激光器和太赫兹激光器的研究。E-mail: lizhongyangwz@163.com

收稿日期: 2007-10-30; **修订日期:** 2007-11-04

光棒中产生径向和切向的相位差 $\delta^{[4-7]}$ 。径向和切向之间的相位差 δ 将改变光束的偏振态,偏振态的改变与 P_{depol} 和 P_{total} 有关, P_{total} 是偏振光未经棒之前的功率, P_{depol} 是光束经过棒之后与原偏振方向垂直的光束的功率。在激光棒中点 (r, ϕ) 附近的一个无穷小截面内沿 z 轴传输的光束的退偏损耗可以用下式表示^[8]:

$$\frac{P_{\text{depol}}}{P_{\text{total}}} = \frac{I \sin^2(2\phi) \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) df}{I df} \quad (1)$$

式中, I 是光束强度; df 是无穷小截面面积; ϕ 是光束的偏振面和点 (r, ϕ) 矢量方向的夹角。由于应力双折射,光束经过激光棒产生的总退偏损耗 η_{depol} 可以由式(1)在棒的整个截面积分得到:

$$\eta_{\text{depol}} = \frac{P_{\text{depol}}}{P_{\text{total}}} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} \sin^2(2\phi) \sin^2\left(\frac{\delta(r)}{2}\right) r dr d\phi}{\pi r_0^2} \quad (2)$$

$$= \frac{1}{4} \left[1 - \frac{\sin(q\eta_h P_p)}{q\eta_h P_p} \right]$$

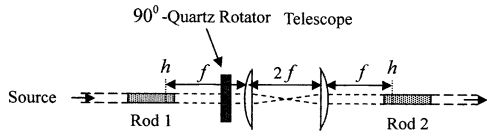


图1 双折射补偿示意图

Fig. 1 scheme for birefringence compensation

为了计算方便,列出未校准参数:激光棒横向未校准量(Δa)或透镜横向未校准量(Δb),激光棒纵向未校准量(Δu)或透镜纵向未校准量(Δv),棒的倾斜角度($\Delta \alpha$)。除了 $\Delta \alpha$ 这个参量外,由于未校准参量 Γ 而产生的退偏损耗 η_{Γ} 可以近似用二阶泰勒展开式表示^[8]:

$$\eta_{\Gamma} = \frac{P_{\text{depol}}}{P_{\text{total}}} = \frac{1}{2} \beta_{\Gamma} \Gamma^2 \quad (3)$$

式中, Γ 是 $\Delta a, \Delta b, \Delta u, \Delta v$ 中的一个参量。在棒倾斜时,二阶和三阶泰勒展开式为零,退偏损耗必须近似用四阶泰勒展开式表示^[8]:

$$\eta_{\Delta \alpha} = \frac{P_{\text{depol}}}{P_{\text{total}}} = \frac{1}{4!} \beta_{\Delta \alpha} \Delta \alpha^4 \quad (4)$$

2.2 单棒横向未校准时对双折射退偏的影响

当单棒的横向未校准量为 $\Delta \alpha$ 时相位差如图2所示。

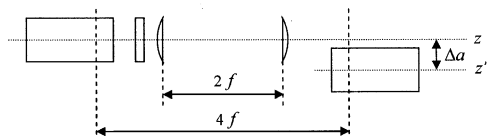


图2 双棒中的一个棒横向未校准

Fig. 2 transversal misalignment of a single rod

$$\delta_{\text{rem}} = \delta_1 \left(x + \frac{\Delta \alpha}{2}, y \right) - \delta_2 \left(x - \frac{\Delta \alpha}{2}, y \right)$$

$$= 2 \frac{q\eta_h P_p}{r_0^2} \Delta \alpha x \quad (8)$$

式中, P_p 是单棒上的泵浦功率。用 δ_{rem} 代替式(5)中的 δ ,总的退偏损耗可由式(5)计算得到:

$$\eta_{\Delta \alpha} = \frac{P_{\text{depol}}}{P_{\text{total}}} = \frac{4}{F} \int_0^{r_0 - \frac{\Delta a}{2}} \int_0^{\left[\sqrt{r_0^2 - \left(x + \frac{\Delta a}{2} \right)^2} \right]^{1/2}} \sin^2 \left(\frac{q\eta_h P_p}{r_0^2} \Delta \alpha x \right) \times \frac{2x^2 y^2}{(x^2 + y^2)^2} dy dx \quad (9)$$

$$F = \pi r_0^2 - \Delta a \left(r_0^2 - \frac{\Delta a^2}{4} \right)^{1/2} - 2r_0^2 \arcsin \left(\frac{\Delta a}{2r_0} \right) \quad (10)$$

泰勒系数为:

$$\beta_{\Delta \alpha} = \left. \frac{\partial^2 \eta_{\Delta \alpha}}{\partial \Delta a^2} \right|_{\Delta \alpha=0} = \frac{1}{4r_0^2} q^2 \eta_h^2 P_p^2 \quad (11)$$

所以退偏损耗与泵浦功率的平方和未校准量($\Delta a/r_0$)的平方有关。

2.3 单透镜横向未校准时对双折射退偏的影响

当其中的一个透镜未校准时,退偏损耗由两棒的中心到 z' 轴的距离 a_1 和 a_2 之间的差值 Δa 决定(如图3所示)。

$$\Delta a = a_2 - a_1 = \frac{\Delta b}{2f} \left(3f + \frac{n_0 - 1}{2n_0} l - f - \frac{n_0 - 1}{2n_0} l \right)$$

$$= \frac{\Delta b}{2f} 2f = \Delta b \quad (12)$$

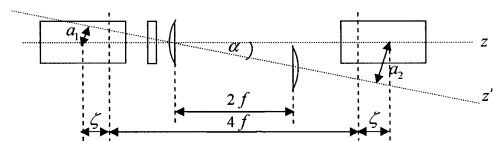


图3 两个透镜中的一个透镜横向未校准

ζ 等于棒中心到热透镜主面的距离

Fig. 3 transversal misalignment of a telescope lens

ζ is equal to the distance between the center of the rod and the principal plane of the thermal lens with

$$\zeta = (n_0 - 1)l/2n_0$$

可以看到,在近似的情况下,透镜的横向未校准量 Δb 等于棒的横向未校准量 Δa 。所以相对的泰勒系数 $\beta_{\Delta b}$ 等于 $\beta_{\Delta a}$ 。图4表示了退偏损耗与横向未校准量的理论曲线。从图中可以看出,横向未校准引起的退偏损耗是非常灵敏的。

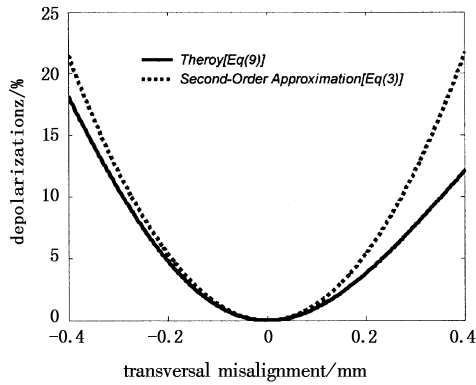


图4 4kW 时退偏损耗与棒或透镜横向未校准量的函数关系

Fig.4 depolarization as a function of transversal misalignment of a rod or a lens at a total pump power of 4kW

2.4 棒或透镜纵向未校准时对双折射退偏的影响

假设入射光平行于 z 轴 (如图 5 所示), 光束经过第一个棒的第二个主面时, 与棒轴线的距离为 r_1 , 与 z 的夹角为 α_1 , 经过第二个棒的第一个主面时与棒轴线的距离为 r_2 , 有:

$$r_2 = \left| \left(\frac{\Delta u \Delta v}{f^2} - 1 \right) r_1 - \Delta u \alpha_1 \right|$$

$$= \left(1 - \frac{\Delta u \Delta v}{f^2} \right) r_1 + \Delta u \alpha_1 \quad (13)$$

$$\alpha_1 = -\arctan\left(\frac{r_1}{f_{th}}\right) = -\arctan(r_1 D) \approx -r_1 D \quad (14)$$

式中, D 是棒的光焦度; f_{th} 是棒的热透镜焦距。

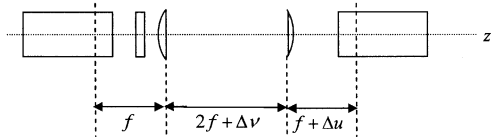


图5 棒或透镜纵向未校准

Fig.5 longitudinal misalignment of a lens or a rod

如果只是棒未校准 ($\Delta v = 0, \Delta u \neq 0$), r 偏振和 ϕ 偏振之间的相位差为:

$$\delta_{rem} = \delta(r_1) - \delta(r_2)$$

$$= q\eta_h P_p \frac{r_1^2}{r_0^2} (2D\Delta u - D^2\Delta u^2) \quad (15)$$

沿整个截面积分得到退偏损耗的表达式为:

$$\eta_{\Delta u} = \frac{P_{depol}}{P_{total}} = \frac{1}{4} \left\{ 1 - \frac{\sin[q\eta_h P_p (2D\Delta u - D^2\Delta u^2)]}{q\eta_h P_p (2D\Delta u - D^2\Delta u^2)} \right\} \quad (16)$$

棒纵向未校准情况下二阶泰勒系数为:

$$\beta_{\Delta u} = \frac{\partial^2 \eta_{\Delta u}}{\partial \Delta u^2} \bigg|_{\Delta u=0} = \frac{1}{3} q^2 \eta_h^2 D^2 P_p^2 = \frac{1}{3 f_{th}^2} q^2 \eta_h^2 P_p^2 \quad (17)$$

在这样的假设下, 退偏损耗和未校准量 Δu 与热透镜焦距 f_{th} 比值的平方有关。图 6 表示退偏损耗与棒的纵向未校准量之间的函数关系, 可以看出退偏损耗对于棒纵向变化不是很灵敏。

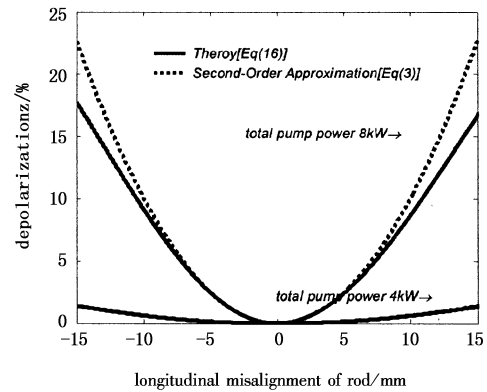


图6 两种不同的泵浦功率下退偏损耗与棒纵向未校准量之间的函数关系

Fig.6 depolarization as a function of longitudinal misalignment of a rod for two different pump powers

如果只是透镜未校准 ($\Delta u = 0$), r 偏振和 ϕ 偏振之间的相位差:

$$\delta_{rem} = \delta(r_1) - \delta(r_2)$$

$$= q\eta_h P_p \frac{r_1^2}{r_0^2} \left[2D\Delta v + \left(\frac{2}{f^2} + D^2 \right) \times \Delta v^2 + 2D \frac{\Delta v^3}{f^2} + \frac{\Delta v^4}{f^4} \right] \quad (18)$$

所以退偏损耗变为:

$$\eta_{\Delta v} = \frac{P_{depol}}{P_{total}} = \frac{1}{4} \times \left(1 - \frac{\sin \left\{ q\eta_h P_p \left[2D\Delta v + \left(\frac{2}{f^2} + D^2 \right) \times \Delta v^2 + 2D \frac{\Delta v^3}{f^2} + \frac{\Delta v^4}{f^4} \right] \right\}}{q\eta_h P_p \left[2D\Delta v + \left(\frac{2}{f^2} + D^2 \right) \times \Delta v^2 + 2D \frac{\Delta v^3}{f^2} + \frac{\Delta v^4}{f^4} \right]} \right) \quad (19)$$

棒纵向未校准和透镜纵向未校准产生的二阶泰勒系数相等, 即:

$$\beta_{\Delta v} = \beta_{\Delta u} = \frac{\partial^2 \eta_{\Delta v}}{\partial \Delta v^2} \bigg|_{\Delta v=0} = \frac{1}{3} q^2 \eta_h^2 D^2 P_p^2 = \frac{1}{3 f_{th}^2} q^2 \eta_h^2 P_p^2 \quad (20)$$

图 7 给出了退偏损耗与透镜的纵向未校准量之间的函数关系。从图中看出纵向未校准量等于横向未校准量时, 纵向未校准量引起的退偏损耗比横向未校准量引起的退偏损耗小一个数量级。

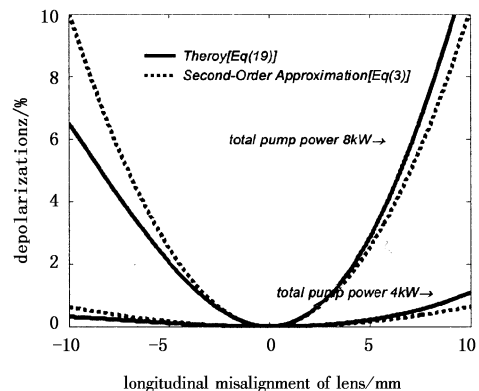


图7 两种不同的泵浦功率下退偏损耗与透镜纵向未校准量之间的函数关系

Fig.7 depolarization as a function of longitudinal misalignment of a telescope lens for two different pump powers

2.5 棒倾斜时对双折射退偏的影响

当入射光束与 z 轴的夹角为 α 时,我们需要对下式进行积分来计算相位差(如图8所示):

$$d\delta = \frac{q\eta_h P_P}{l} \left(\frac{r'(z)}{r^0} \right)^2 dz \quad (21)$$

光束从 $(r + \Delta r)$ 到 $(r - \Delta r)$ 引起 r 偏振和 ϕ 偏振之间的相位差为:

$$\begin{aligned} \delta(r) &= \int d\delta = \frac{q\eta_h P_P}{l r_0^2} \int_0^l \left(r + \frac{l\Delta\alpha}{2} - \Delta\alpha z \right)^2 dz \\ &= \frac{q\eta_h P_P}{r_0^2} \left(r^2 + \frac{1}{12} l^2 \Delta\alpha^2 \right) \end{aligned} \quad (22)$$

所以由于棒的倾斜引起的相位差为:

$$\delta_{\text{rem}} = \frac{q\eta_h P_P l^2}{12 r_0^2} \Delta\alpha^2 \quad (23)$$

相位差不再依赖于 r 。总的退偏损耗由式(2)积分得到:

$$\begin{aligned} \eta_{\Delta r} &= \frac{P_{\text{depol}}}{P_{\text{total}}} = \frac{1}{\pi r_0^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} \sin^2(2\phi) \frac{\delta_{\text{rem}}}{2} r dr d\phi \\ &= \frac{1}{2} \sin^2 \left(\frac{q\eta_h P_P l^2}{24 r_0^2} \Delta\alpha^2 \right) \end{aligned} \quad (24)$$

最低阶非零泰勒系数是四阶的,表示如下:

$$\beta_{\Delta\alpha} = \frac{\partial^4 \eta_{\Delta\alpha}}{\partial \Delta\alpha^4} \bigg|_{\Delta\alpha=0} = \frac{l^4}{3 r_0^4} q^2 \eta_h^2 P_P^2 \quad (25)$$

图9给出了退偏损耗与透镜的倾斜量之间的函数关系。

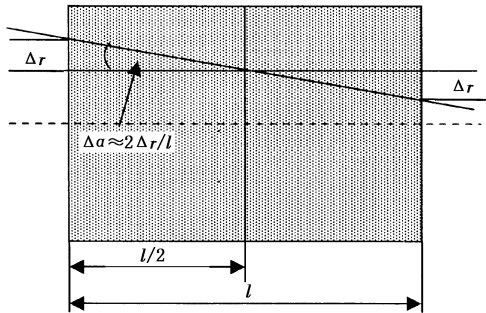


图8 光束在倾斜的棒中传输

Fig. 8 beam propagation in a tilted rod

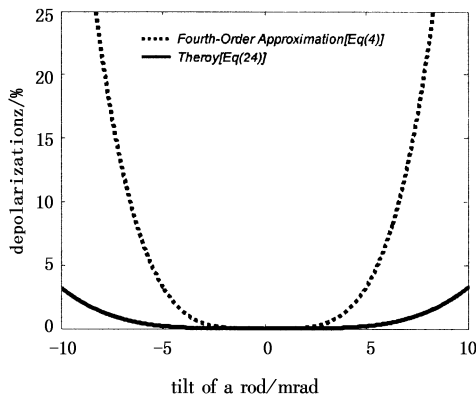


图9 8kW 时退偏损耗与棒的倾斜量之间的函数关系

Fig. 9 depolarization as a function of tilt misalignment of rod at a total pump power of 8kW

3 结论

利用一个对称的望远镜在激光棒的主面间构成像传递光学系统和一块 90° 石英旋转片组成的双棒串接谐振腔双折射补偿系统,当任一元件未校准时对于双折射补偿的灵敏度我们给出了理论曲线。在二阶近似下,棒和透镜横向或纵向未校准的灵敏度是相同的。在横向未校准时,泰勒二阶系数决定于横向未校准量和棒半径的平方,在纵向未校准时退偏损耗决定于纵向未校准量和热透镜的焦距。由于双棒上泵浦功率不相同而导致的退偏损耗只决定于双棒上泵浦功率的差值,与其他值无关。由于棒的倾斜导致的退偏损耗,低于四阶的泰勒系数都为零,泰勒四阶系数决定于棒的长度和半径的四次方。

参考文献:

- [1] J Richards. Birefringence compensation in polarization coupled lasers[J]. Appl. Opt., 1987, 26: 2514 - 2517.
- [2] D C Hanna, C G Sawyers, M A Yuratich. Telescopic resonators for large-volume TEM₀₀-mode operation[J]. Opt. & Quant. Electron., 1981, 13(6): 493.
- [3] Q Lu, N Kugler, H Weber, et al. A novel approach for compensation of birefringence in cylindrical Nd:YAG rods [J]. Opt. Quantum Electron, 1996, 28: 57 - 69.
- [4] W Koechner. Solid-state laser engineering [M]. New York: Springer-Verlag, 1976.
- [5] A L Schawlow, C H Townes. Infrared and optical masers [J]. Phys. Rev., 1958, 112: 1940.
- [6] M Kumkar, B Wedel, K Rixhrwe. Beam quality and efficiency of high-average-power multirodlasers [J]. Opt. & Laser Tech., 1992, 24(2): 67.
- [7] Q Lu, U Wittrock, S Dong. Photoelastic effects in Nd:YAG rod and slab lasers [J]. Opt. Laser Technol, 1995, 27(2): 95 - 101.
- [8] Nicolas Kugler, Shalei Dong, et al. Investigation of the misalignment sensitivity of a birefringence-compensated two-rod Nd:YAG laser [J]. Applied Optics, 1997, 36(36): 9539 - 9366.