

半导体抽运 Yb : YAG 五镜腔 KLM 激光器 理论分析计算*

于海娟¹ 李 港¹ 陈 檬¹ 张志刚²

(1 北京工业大学激光工程研究院, 北京 100022)

(2 北京大学量子电子学研究所, 北京 100871)

摘 要 对半导体抽运的 Yb : YAG 克尔透镜锁模激光器进行理论分析计算, 分析五镜谐振腔和四镜谐振腔的稳区不同, 利用稳区范围变化对五镜谐振腔稳定锁模机理做出合理解释. 详细计算分析 Yb : YAG 激光器内克尔调制效应对锁模的影响, 获得最佳腔参量. 在腔内没有插入硬光阑的情况下, 利用五镜腔实现了 Yb : YAG 晶体克尔透镜锁模运转. 理论分析和实验结果相符.

关键词 五镜谐振腔; Yb : YAG; 克尔效应; 飞秒激光器

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

0 引言

Yb : YAG 晶体具有良好的物理性能: 高热导率 11 W/mK^{-1} , 高的泵浦饱和能量 (28 kW/cm^2), 可以实现 100% 掺杂, 因此受到激光器研究和领域领域的青睐^[1,2]. 用 LD 直接泵浦的 Yb : YAG 激光器成为一个发展趋势. 此外, 由于 Yb : YAG 晶体中 Yb^{3+} 离子 $4f^{13}$ 电子具有大的自旋-轨道耦合系数导致较强的声子耦合, 因此具有宽的荧光线宽, 可以支持飞秒锁模脉冲激光输出. 国外利用 Yb : YAG 晶体进行超短脉冲实验的研究广泛展开^[3~6]. 在国内, 天津大学和北京工业大学分别利用半导体饱和吸收镜进行了 Yb : YAG 晶体被动锁模的实验研究^[7,8]. 2004 年, 植村禎夫等人报道了利用克尔透镜锁模, 采用传统的四镜腔, 谐振腔内插入硬光阑的方法, 在 Yb : YAG 激光器中获得 30 nm 带宽 (支持 38 fs 脉冲) 的实验结果. 使在这种激光器中获得更短脉冲的潜力得到验证.

本文实验中将四镜腔改为五镜腔, 将原来一长臂的全反镜 M_3 换成带曲率的折叠镜, 发现五镜谐振腔更容易稳定锁模. 首次利用这种腔型获得了 Yb : YAG 激光器稳定的克尔透镜锁模^[9]. 并进一步对这种腔型进行理论分析计算, 得到了同实验结果相吻合的最佳腔参量.

1 谐振腔的分析和设计

实验中所采用的五镜谐振腔结构如图 1. Yb : YAG 晶体以布儒斯特角切割, 晶体通光方向

长度为 3 mm, 掺杂浓度为 10%. M_1 和 M_2 是镀有对泵浦光高透和对振荡光高反双色膜的凹面反射镜, 其曲率半径分别为 $R_1 = R_2 = 75 \text{ mm}$. M_3 是凹面全反镜, 曲率半径 $R_3 = 50 \text{ mm}$. M_4 是 1% 耦合输出镜. M'_1 和 M'_2 是反射波长在 1020~1080 nm 全反镜. P_1 和 P_2 是布儒斯特角放置的重火石玻璃 (ZF4) 棱镜对, 棱镜对间隔为 275 mm, 对中心波长 1038 nm, 总腔长为 160 cm, 两臂长 $L_1 = 680 \text{ mm}$, $L_3 = 720 \text{ mm}$. 像散补偿角半角为 $\theta_1 = 8^\circ$, $\theta_2 = 5^\circ$. LD 是抽运源 (激光二极管), 波长为 930 nm, 发光截面为 $1 \times 100 \mu\text{m}^2$, 最大输出功率为 3 W. 抽运光经过整形系统, 近似变为平行光, 然后经过焦距为 45 mm 的会聚透镜 L 将抽运光聚焦到晶体上.

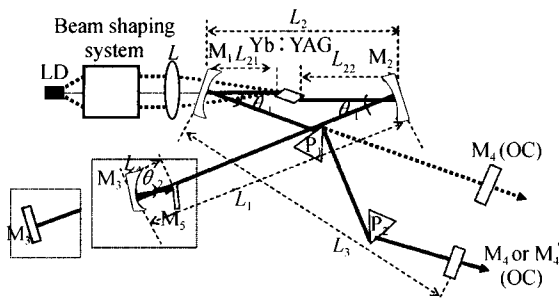


图 1 五镜谐振腔光路图
Fig. 1 The five mirror cavity

1.1 稳区分析

调节谐振腔参量, 使得谐振腔工作在稳区边缘, 因为在稳区边缘处, 腔内具有最大的非线性损耗调制, 容易实现克尔透镜锁模运转. 传统四镜谐振腔调节实现锁模时, 主要微调晶体在谐振腔内的位置, 即调节距离 L_{21} 同 L_{22} 的大小. 臂长 L_1 和 L_3 对稳区的变化影响不大. 由 L_{21} , L_{22} 和 L_1 , L_3 所决定的稳区图如图 2.

*北京市自然科学基金重点项目(3021001)资助

Tel : 010-67396553 Email: haijuanyu@emails.bjut.edu.cn

收稿日期: 2005-06-13

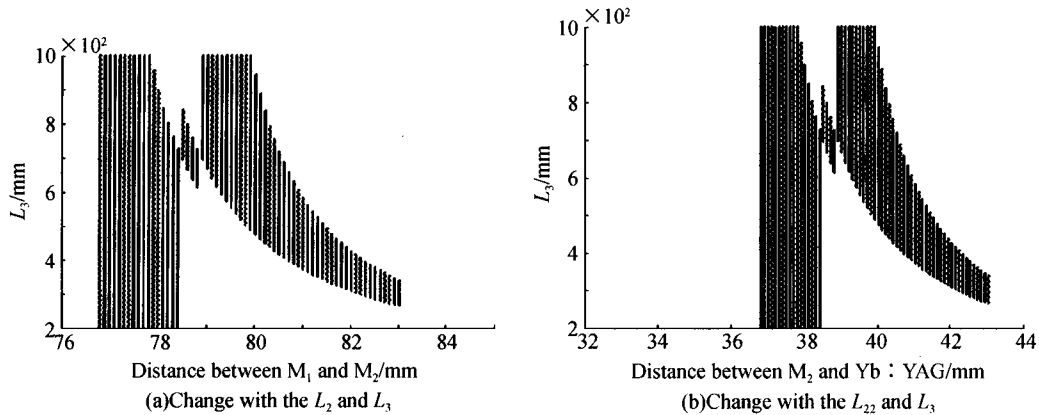


图 2 四镜腔稳区图
Fig. 2 The four mirror stability region

图 2 中,如果把稳区范围定义为左稳区,中稳区和右稳区,可以看出,在左稳区和右稳区范围内调节 L_1, L_3 时,对谐振腔的稳区变化影响很小. L_1, L_3 的调节并不能有效地使得谐振腔工作在稳区边缘,所以通常四镜谐振腔调节锁模时,只是调节 L_{21} 和 L_{22} . 如果将 M_3 换成折叠镜, M_5 做为全反镜,谐振腔变

为五镜腔. 在五镜谐振腔的调节中,通常固定 M_1 , 调节晶体位置和 M_2 的位置,改变 L_{21} 和 L_{22} 的值. 调节中发现,微调五镜谐振腔的 M_2 和 M_5 ,即变化 L_{22} 和 L_4 都可以实现稳定锁模,并且调节 L_4 的灵敏度很高. 为了分析这个现象产生的原因,做出由 L_4 和 L_{22} 确定的稳区图,如图 3.

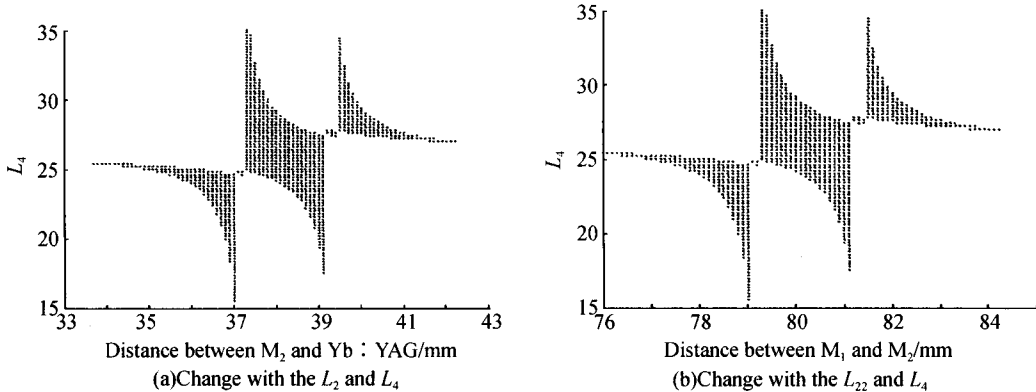


图 3 五镜谐振腔稳区图
Fig. 3 The five-mirror cavity area stability region

比较图 2 和图 3,可以看出,五镜谐振腔中 L_4 的变化,比四镜腔中改变 L_1 带来稳区范围变化明显. 并且从图 3 中可以明显看出,五镜谐振腔增加了中间稳区的范围,稳区边缘增大,从而使得五镜谐振腔获得两个易锁模区域: L_{22} 在 37 mm~37.5 mm, $L_4 = 25$ mm 处和 L_{22} 在 39 mm~39.5 mm, $L_4 = 28$ mm. 同四镜谐振腔(图 2)相比,五镜谐振腔增加了边缘可调范围,可锁模区域增大,从而降低锁模的灵敏度,增加锁模的稳定性能. 从稳区图可以简单直观地看出五镜腔对锁模稳定性的优势.

1.2 克尔强度计算

一般情况下,CW 激光运转时,选择合适的小腔长度 L_2 和 θ 值,使得谐振腔工作在稳区中心附近,避开稳区的分界线,选在 $|G_i| \approx 0$ 处,让谐振腔工作在稳区中心附近. 而对于非对称的谐振腔,在稳区

边缘,即 $g_1 g_2 = 1$ 处,此时的克尔强度 $\delta_p = \left[\frac{1}{\omega} \frac{dw}{dp} \right]_{p=0}$ (δ_p 的物理意义是非线性调制损耗系数) $\delta_{p1max,min} = \pm 1/\sqrt{1-S^2}$ 最大,在稳区边缘最容易实现克尔透镜锁模. $S = A_0 D_0 + B_0 C_0, S = 2g_1 g_2 - 1, A_0 B_0 C_0 D_0$ 是 $p=0$ 时的单程矩阵. 克尔强度的最大值出现在稳区的边缘,即 $g_1 g_2 = 1$ 所对应的曲线.

为了详细计算五镜谐振腔内的克尔强度,可以把晶体分为两个部分,各为 $d/2$, 中间夹有一个无限薄的克尔非线性介质,见图 4.

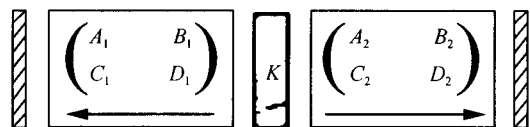


图 4 克尔介质等效矩阵
Fig. 4 Matrix of the Kerr media

非线性介质的矩阵是

$$M_k = \frac{1}{\sqrt{1-\gamma}} \begin{bmatrix} 1-\gamma/2 & -\gamma d_e/4 \\ -\gamma d_e & 1-\gamma/2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\gamma = p \left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{2\pi\omega_c^2}{\lambda d_e} - \frac{\lambda d_e}{2\pi\omega_{01}^2} \right) \right]^{-1} = pF(p) \quad (2)$$

$p = P/P_c$ 是归一化的腔内激光功率, $P_c = \frac{c\epsilon_0\lambda^2}{2\pi n_2}$, P_c

是光束的自陷临界功率, n_2 为克尔介质的非线性折射率. 实验中得到的谐振腔内功率为 2 W, 计算出归一化功率 $p=0.3$, $\gamma=0.75$, 带入 M_k , 得到克尔介质矩阵. 因为 δ_p 的最大值总是发生在腔的端镜, 五镜谐振腔中, 利用谐振腔的高斯传输矩阵, 可以写出一个 δ_p 的显式, 输出镜腔镜 M_1 上的光斑的变化 δ_p 为

$$\delta_p = -\frac{1}{2} \frac{\alpha_1 + \alpha_2 S}{\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + 2\alpha_1\alpha_2 S} \quad (3)$$

$$\alpha_1 = 2B_1 D_1 / d_e - A_1 C_1 d_e / 2 \quad (4)$$

$$\alpha_2 = 2B_2 D_2 / d_e - A_2 C_2 d_e / 2 \quad (5)$$

$$S = A_0 D_0 + B_0 C_0 \quad (6)$$

矩阵元素 $A_1 B_1 C_1 D_1, A_2 B_2 C_2 D_2$ 是图 1 的等效矩阵的元素; 由五镜谐振腔高斯光束传输矩阵特性, 在像散完全补偿时计算各个参量

$$\alpha_1 = (2(1-2L_1/R_1/\cos\theta_1)L_{21} + 2L_1)(-2/R_1/\cos\theta_1 L_{21} + 1)/n_1 + (1-2L_1/R_1/\cos\theta_1)/R_1/\cos\theta_1 \quad (7)$$

$$\alpha_2 = (2(1-2L_4/R_2/\cos\theta_2 - 2((1-2L_4/R_2/\cos\theta_2)L_3 + L_4)/R_2/\cos\theta_1)L_{22} + 2(1-2L_4/R_2/\cos\theta_2)L_3 + 2L_4)((-2/R_2/\cos\theta_2 - 2((1-2L_4/R_2/\cos\theta_2)L_3 + L_4)/R_1/\cos\theta_1)L_{22} - 2/R_2/\cos\theta_2 L_3 + 1)/n_1 - 1/2(1-2L_4/R_2/\cos\theta_2 - 2((1-2L_4/R_2/\cos\theta_2)L_3 + L_4)/R_1/\cos\theta_1)(-2/R_2/\cos\theta_2 - 2((1-2L_4/R_2/\cos\theta_2)L_3 + L_4)/R_1/\cos(\theta_1)) \quad (8)$$

$$S = A_0 D_0 + B_0 C_0 \quad (9)$$

将上述式(7)、(8)、(9)带入式(3), 得到谐振腔参量同克尔强度的关系, 克尔强度取为最大负值时, 谐振腔内的克尔效应最强, 最容易实现锁模. 在实验条件允许的情况下, 选取合理谐振腔的参量以得到尽可能大的非线性调制系数. $L_4 = 25$ mm 时, 固定 M_5 的位置, 微调 L_{22} 的长度, 可以分别得到克尔强度 δ_p 的随 L_{22} 变化情况, 如图 5.

图 5 中 $\delta_{p\max}, \delta_{p\min}$ 分别表示克尔强度的最大正值, 克尔强度取最大负值时, 容易实现克尔透镜锁模. 图 5 中, $L_{22} = 37.5$ mm 时, 克尔调制强度取得最大负值. 在实验调节中, L_{22} 至 37.5 mm 附近, 可以看

到用于监测脉冲序列的示波器上有连续稳定的锁模脉冲序列. L_{22} 左右可调范围为 0.2 mm, 理论分析同实验结果相符.

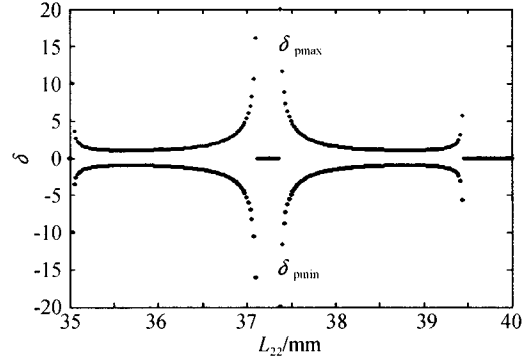


图 5 $L_4 = 25$ mm 时调节 M_2 谐振腔内克尔强度变化
Fig. 5 δ_p change according with the L_{22} when $L_4 = 25$ mm

此外, L_4 的变化对锁模的影响也非常明显, 固定 M_2, L_{22} 在 37.5 mm 附近, 调节 M_5 同 M_3 之间的距离, 分析 L_4 的变化对谐振腔内部克尔效应的影响, 见图 6.

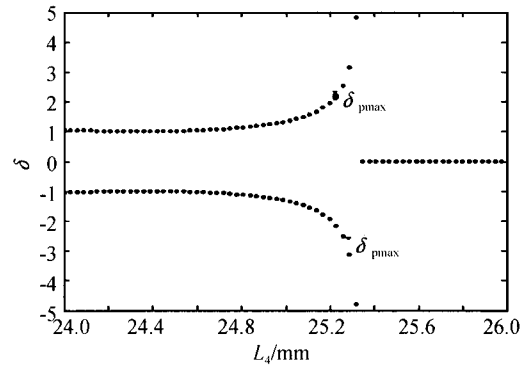


图 6 $L_{22} = 37.5$ mm 时调节 M_5 谐振腔内克尔强度变化
Fig. 6 δ_p change according with the L_4 when $L_{22} = 37.5$ mm

从图 6 中可以看出, $L_4 = 25.3$ mm 时, 得到克尔强度的极值 $\delta_{p\max}, \delta_{p\min}$, 输出镜处的克尔调制效应最强, 此时在实验中也观察到了稳定锁模脉冲序列, M_3 同 M_5 之间的距离 $L_4 = 25.3$ mm, 左右可调范围为 0.15 mm.

图 5 和图 6 是从克尔效应出发分析谐振腔参量, 得出谐振腔在 $L_{21} = 38$ mm, $L_{22} = 37.3$ mm ~ 37.7 mm, $L_4 = 25.15$ mm ~ 25.5 mm 范围内调节时, 得到稳定锁模脉冲序列. 利用高斯光束传输矩阵, 谐振腔内部的各处光斑大小, 利用式(10)

$$\omega = (\lambda/\pi)^{1/2} |B|^{1/2} / \left[1 - \left(\frac{D+A}{2} \right)^2 \right]^{1/4} \quad (10)$$

计算得出谐振腔内各处光斑走势如图 7 (由于 $\theta_2 \neq 0$, 子午面和弧矢面没有严格重合).

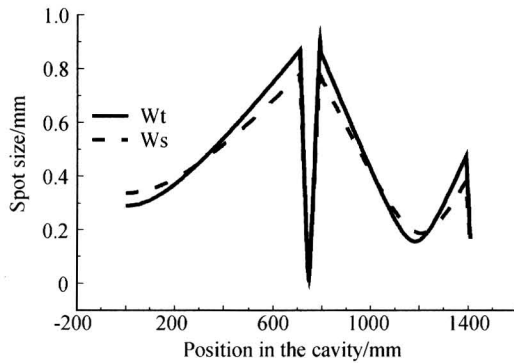


图 7 谐振腔内部各处光斑大小

Fig. 7 Spotsizes in the cavity

调节谐振腔至稳定锁模,此时从光谱仪上观察到,输出激光的谱线宽度突然变宽,谱线宽度如图 8.

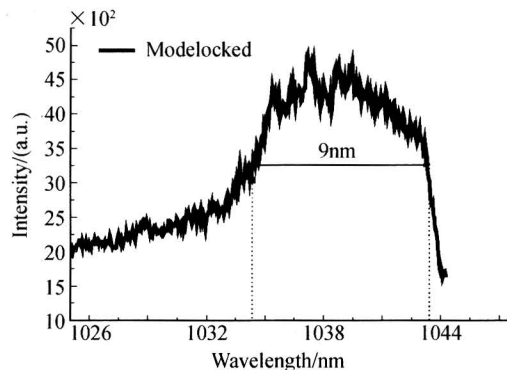


图 8 连续锁模时的光谱情况

Fig. 8 Pulse spectrum of the mode locked Yb:YAG laser

图 8 的脉冲光谱宽度 (FWHM) 大于 9 nm,中心波长在 1038 nm,可以支持 124 fs 的脉冲宽度.功率计测得稳定锁模脉冲输出功率为 20 mW,稳定锁模脉冲序列如图 9.

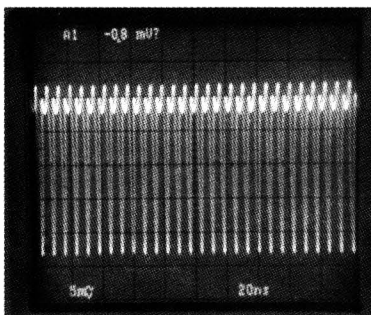


图 9 连续锁模时光脉冲情况

Fig. 8 Mode-locked pulse train in different time scales

2 结论

利用谐振腔稳区分析法,直观地分析五镜谐振

腔稳定锁模的原因.对五镜谐振腔的克尔强度详细计算分析,得出实现克尔强度的最佳腔参量.在最佳腔参量下,在半导体直接泵浦的 Yb:YAG 激光器中,实现该晶体的克尔透镜锁模,得到的光谱线宽可以支持 124 fs 的光脉冲宽度.

参考文献

- 1 杨培志,邓佩珍,陈伟,等.钛宝石泵浦的 Yb:YAG 晶体的激光性能.光子学报,1999,28(4):314~316
Yang P Z, Deng P Z, Chen W, et al. *Acta Photonica Sinica*, 1999, 28(4):314~316
- 2 杨鸿儒,佐铁钊.全固体小型 Yb:YAG 激光器若效应及输出特性研究.光子学报,2003,32(8):907~910
Yang H R, Zuo T C. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(8):907~910
- 3 Brauch U, Giessen A, Karszewski M, et al. Multiwatt diode-pumped Yb:YAG thin disk laser continuously tunable between 1018 nm and 1053 nm. *Opt Lett*, 1995, 27(7):713~715
- 4 Honninger C, Kartner F X, Zhang G, et al. Femtosecond modelocked Yb:YAG laser. *Advanced Solid-state Lasers*, 1996, 1(21):16~18
- 5 Hönninger C, Paschotta R, et al. In trcavity dispersion-compensated diode-pumped mode-locked Yb:YAG laser. *Appl Phys B*, 1999, 69(6):3~5
- 6 J Aus der Au, Spuhler G J, Sudmeyer T, et al. 16. 2 W average power from a diode-pumped femtosecond Yb:YAG thin disk laser. *Opt Lett*, 2000, 25(11):859~861
- 7 Ju Guifang, Lu Chai, Wang Qingyue. Stable modelocking in an Yb:YAG laser with a fast SESAM. *Chinese Optics Letters*, 2003, 1(12):695~696
- 8 于海娟,李港,陈檬,等.用半导体饱和吸收镜进行 LD 泵浦 Yb:YAG 激光器被动锁模研究.光子学报,2005,34(5):648~651
Yu H J, Li G, Chen M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(5):648~651
- 9 于海娟,李港,陈檬,等.激光二极管抽运的克尔透镜锁模 Yb:YAG 激光器.中国激光,2000,32(7):878~880
Yu H J, Li G, Chen M, et al. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, 32(7):878~880
- 10 Vitto Magni, Giulio Cerullo, Sandro De Silvestri. ABCD matrix analysis of propagation of gaussian beams through Kerr media. *Optics Communitions*, 1993, 96(3):348~355

Theoretical Analyses of Diode End-Pumped Kerr-Lens Mode-Locked Yb : YAG Laser Using Five Mirror Cavity

Yu Haijuan¹, Li Gang¹, Chen Meng¹, Zhang Zhigang^{1,2}

1 College of Laser Engineering of Beijing University of Technology, Beijing 100022

2 Institute of Quantum Electronics of Peking University, Beijing 100871

Received date: 2005-06-13

Abstract The five mirror cavity of diode pumped Yb : YAG Kerr-lens mode-locked laser was analyzed theoretically in this paper. To get stable self-mode-locking in the experiment, the best parameters of the cavity had to be found. Compared the five mirror cavity with the four mirror cavity, it was found that the mode-locking was much more stable in the five mirror cavity. The reasonable explanation of five mirror cavity stable mode-locking was given in this paper by using stability region theory. And the Kerr-strength of the five-mirror cavity was calculated. It would provide a theoretical method for the modulation of the diode pumped kerr-lens mode-locked laser.

Keywords Five-mirror cavity; Yb : YAG; Kerr effects; Femtosecond laser



Yu Haijuan Received the bachelor's degree of Yantai Normal University in 2000. From 2000 to 2002, as a master student, she studied in the Beijing University of Technology. From 2002 on, she is studying in Beijing University of Technology as a doctor student. Her major interests includes Femtosecond laser technology.