

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0198-03

# 克尔锁模 Cr<sup>4+</sup>:YAG 激光器的理论分析

宋丽军<sup>1</sup>, 宋晏蓉<sup>2</sup>, 周国生<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>山西大学物理电子工程学院, 山西 太原, 030006; <sup>2</sup>北京工业大学应用数理学院, 北京 100022)

**摘要** 从传统的 ABCD 规律出发,用扩展的非线性介质传输矩阵详细分析了克尔自锁模 Cr<sup>4+</sup>:YAG 激光器激光介质中的光斑变化。结果发现,虽然半导体可饱和吸收镜(SESAM)的引入使两臂的等效长度不再相等,从而破坏了稳区的连续性,却增强了激光器的非线性效应,使锁模脉冲更易得到。实验得到的最大谱线展宽为 40 nm。

**关键词** 激光物理; ABCD 规律; 光斑相对变化量

中图分类号 TN248.3\*5

文献标识码 A

## Theory of Kerr-Lens Mode-Locked Cr<sup>4+</sup>:YAG Laser

SONG Li-jun<sup>1</sup>, SONG Yan-rong<sup>2</sup>, ZHOU Guo-sheng

(<sup>1</sup>College of Physics & Electronics Engineering, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China )  
(<sup>2</sup>College of Applied Mathematics and Physics, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China )

**Abstract** Based on the traditional ABCD law, the relative variation of spot size in the laser medium is analyzed. The results show that the introduction of SESAM destroyed the continuity of the laser stability and enhanced the nonlinearity of the laser. So the mode-locked pulses are generated easily due to the SESAM. The spectrum width of 40nm has been obtained experimentally.

**Key words** laser physics; ABCD law; the relative variation of spot size

### 1 引 言

克尔透镜锁模是 20 世纪 90 年代初发展起来的一种产生超短脉冲的简单方法,与传统的锁模方法不同的是,它不需要复杂的调制器,稍有激光技术基础的人都可以自己动手制作一台。克尔透镜只是提供了一个非线性自强度调制机制。如果在腔内加上一个光阑,腔内光束大小的变化可以转化成腔内损耗的变化,从而形成一种脉冲选择机制。在克尔透镜锁模 Cr<sup>4+</sup>:YAG 激光器中,不仅锁模启动元件 SESAM 的引入使传统的四镜腔变成了五镜腔,而且腔内不需放置硬光阑,损耗调制直接由激光介质中抽运光束来完成,从而形成软光阑调制。因此,对光斑相对变化量(即锁模强度)的分析应以激光介质内的某一平面为参考面。本文基于分析传统稳定谐振腔的 ABCD 规律,用扩展的非线性介质传输矩阵详细分析了克尔自锁模 Cr<sup>4+</sup>:YAG 激光器激光介质中的光斑变化。

### 2 理论计算

所用谐振腔结构与文献[1]的大致相同,不同的是置入光路的不是单个棱镜,而是完成色散补偿作用

的棱镜对;另外就是锁模启动装置 SESAM 的加入使得谐振腔由原来标准的四镜结构变为五镜结构,其等效结构如图 1 所示,当晶体与 F 重合时,x=0。腔内传输光束及抽运光束均用严格的 ABCD 矩阵描述,文献[2]中给出了长度为 l<sub>0</sub> 的克尔介质的传输矩阵,它可以等效为两块长度均为 l<sub>0</sub>/2,折射率为 n<sub>0</sub> 的线性介质与一块非线性介质的合成,具体表示为:

$$\begin{bmatrix} A_k & B_k \\ C_k & D_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & d_e/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} M_k \begin{bmatrix} 1 & d_e/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

上述等式右边矩阵乘积中,中间矩阵 M<sub>k</sub> 是非线性的,

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

$$\gamma = \left[ 1 + \frac{1}{4} \left( \frac{2\pi\omega_c^2}{\lambda d_e} - \frac{\lambda d_e}{2\pi\omega_0^2} \right) \right]^{-1} p \quad (3)$$

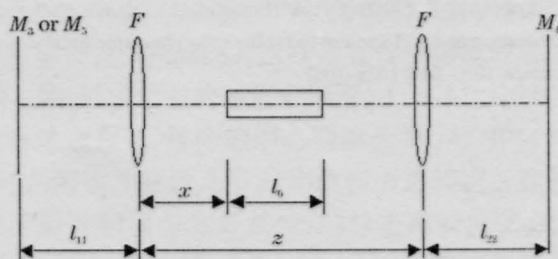


图 1 谐振腔结构

Fig.1 Schematic of the cavity

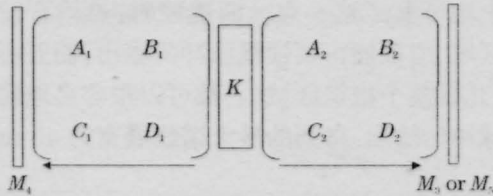


图2 谐振腔的矩阵结构

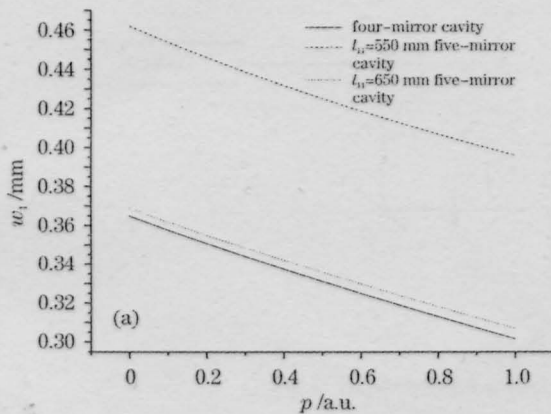
Fig.2 Matrix description of the resonator

其中  $p=p_0/p_c$  为归一化功率参数,  $p_0$  为腔内功率,  $p_c$  为腔内临界功率,  $d_e=l_0/n$  为当  $p=0$  时克尔介质的等效长度,  $w_0$  和  $w_c$  分别为在克尔介质参考面处的光斑尺寸与相应的腰斑尺寸。此时激光腔的传输矩阵可等效为图2形式。如果选择  $M_3$  或  $M_5$  为参考平面, 那么该平面上光斑半径就可以表示为:

$$w_1 = \left( \frac{\lambda}{\pi} \right)^{1/2} |B|^{1/2} / \left[ 1 - \left( \frac{D+A}{2} \right)^2 \right]^{1/4} \quad (4)$$

其中  $A, B, C, D$  是光束在腔内的往返矩阵元素。至此可以得到光斑尺寸与腔内光束归一化功率的关系, 进而得到光斑尺寸对脉冲归一化功率的相对敏感度, 即光斑相对变化率为

$$\delta_1 = \frac{1}{w_1} \frac{dw_1}{dP} \Big|_{P=0} \quad (5)$$



而激光介质棒内的光斑变化则可以这样来计算, 假定位于激光棒内, 非线性介质  $K$  右边的任一平面为参考平面, 且  $A_s$  和  $B_s$  是从端镜  $M_3$  或  $M_5$  到该平面的传输矩阵中第一行的元素, 则此平面上的光斑相对变化率可以表示为:

$$\delta = \frac{(A_s w_1)^2 - [B_s \lambda / (\pi w_1)]^2}{(A_s w_1)^2 + [B_s \lambda / (\pi w_1)]^2} \delta_1 \quad (6)$$

### 3 结果分析

计算时, 选择的 Cr<sup>4+</sup>:YAG 激光器的腔参量与文献[1]中相同。由于 Cr<sup>4+</sup>:YAG 激光器的增益比较低, 输出功率对腔内损耗比较敏感。要在这种激光器中实现自启动的 KLM 锁模, 通常都采用在腔内加入锁模装置的办法, 其中加入启动装置 SESAM 就是一种既简便又行之有效的方法。本实验中用一个曲率半径为 100 mm 的球面镜  $M_5$  代替输出耦合镜  $M_3$ , 将光束折叠一定角度后聚焦在 SESAM 上,  $M_5$  与 SESAM 之间的距离为  $l_3$ ,  $F$  与  $M_5$  之间的距离为  $l_{11}$ 。当谐振腔参数取  $z=118$  mm,  $x=48$  mm 时,  $l_{11}$  分别为 550 mm 和 650 mm 的五镜腔光斑变化与四镜腔光斑变化的比较如图3所示。从图中可以看出, 当

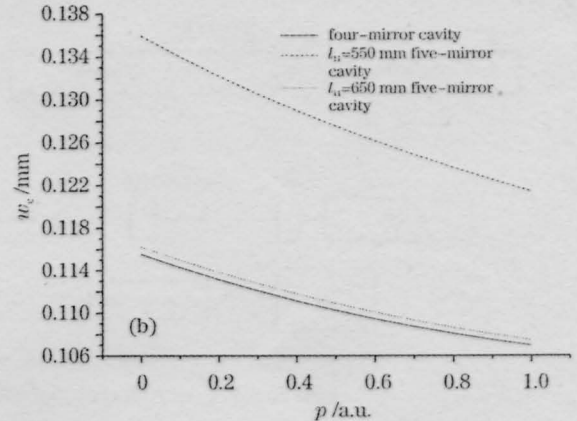


图3 光斑大小与归一化功率的关系

Fig.3 Relations between spot size and the normalized power

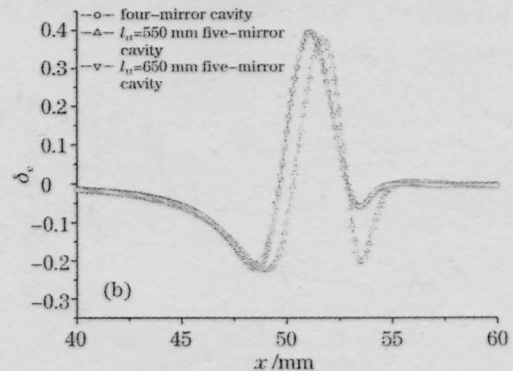
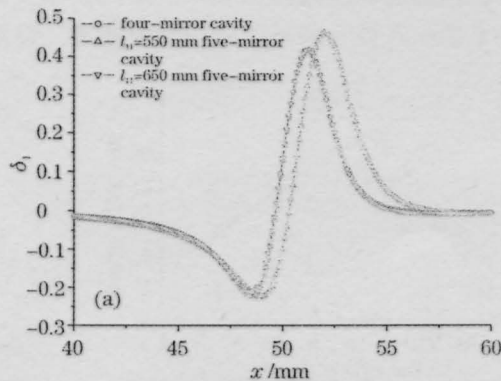


图4 光斑相对变化率与介质位置的关系

Fig.4 Spot size relative variation vs media position  $x$

$l_{11}=650$  mm 时,无论是端镜  $M_4$  上光斑  $w_1$ [图 3(a)] 还是介质棒内的光斑  $w_c$ [图 3(b)],它们随功率的变化规律与四镜腔的变化规律都非常相似,这也说明当用球面镜  $M_5$  和 SESAM 组合代替端镜  $M_3$  时,  $w_c$  的取值非常关键,它直接影响着各处的光斑大小及变化规律。但当  $l_{11}=550$  mm 时,  $w_c$  随功率变化的曲线斜率却比  $l_{11}=650$  mm 时的曲线斜率大,说明此时介质棒内的锁模强度比  $l_{11}=650$  mm 时五镜腔和四镜腔的锁模强度大。正如图 4 中所示,当  $z=188$  mm,  $l_{11}=550$  mm 时,无论是端镜上[图 4(a)]还是介质中[图 4(b)]的锁模范围( $\delta < 0$ )均比四镜腔和  $l_{11}=650$  mm 时的范围大。

由此可以得出结论:虽然 SESAM 的引入使两臂的等效长度不再相等,从而破坏了稳区的连续性,却增强了激光器的非线性,使锁模变得更容易实现,

实验上也证实了这一点。四镜腔时,虽然有较大的锁模区域,但没能得到锁模脉冲的输出;而五镜腔则不同,几乎整个稳定区域内,都可以很容易地观察到飞秒脉冲的输出,得到的最大谱线展宽为 40 nm。

致谢 对天津大学精密仪器与光电子工程学院的张志刚教授给予的大力支持和帮助表示感谢。

### 参 考 文 献

- 1 Song Lijun, Pei Weihua, Song Yanrong *et al.* Continuous-wave tunable Cr<sup>4+</sup>:YAG laser[J]. *Chinese J. Laser*, 2003, **30**(7): 590-592  
宋丽军,裴为华,宋晏蓉等. 连续可调谐的 Cr<sup>4+</sup>:YAG 激光器[J]. *中国激光*, 2003, **30**(7): 590-592
- 2 V. Magni, G. Cerullo, S. de Silvestri. Closed form Gaussian beam analysis of resonators containing a Kerr medium for femtosecond lasers[J]. *Opt. Commun.*, 1993, **101**: 365-370