

文章编号: 0258-7025(2003)12-1079-04

自聚焦型自锁模固体激光器谐振腔的最优化研究

帕力哈提·米吉提, 陶然·瓦吉地

(新疆大学物理系, 新疆 乌鲁木齐 830046)

摘要 提出了对自聚焦型自锁模固体激光器谐振腔最优化的方法, 讨论了 2 个、3 个和 4 个反射镜组成的谐振腔的使用可能性, 并对它们之间的数学关系服从 ABCD 矩阵法的客观规律进行了描述。

关键词 激光技术; 飞秒脉冲; 自锁模; 优化谐振腔

中图分类号 TN 243 文献标识码 A

Optimal Cavities for Self-mode Locking of Solid-state Lasers with Self-focusing

Falihati · Mijiti, Toran · Vajidi

(Physics Department, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China)

Abstract A method is proposed for the optimization of the cavities of solid-state lasers with self-mode locking by the means of self-focusing. The feasibility of using cavities with two, three, and four mirrors for this purpose is discussed.

Key words laser technique; femtosecond pulse; self-mode locking; optimal cavity

1 引 言

利用自聚焦现象进行自锁模得到亚皮秒和飞秒脉冲激光的方法是国际上常用的方法^[1]。对谐振腔内色散进行二阶和三阶补偿已得到脉冲宽度为 11 fs 的超短脉冲^[2]。除 Ti:sapphire 外, 利用 Nd:YLF^[3], Nd:YAG, Cr:YAG, Cr:forsterite(镁橄榄石), Cr:LiSAF, Cr:LiCAF^[4] 等各种新的固体激光材料为激活介质得到飞秒脉冲振荡的文章在国际上也有很多报道。

在许多利用激光器中自聚焦实现自锁模理论的研究中, 均提出了激光器最优化的方法^[5], 这种机制本质上是利用克尔三阶非线性自聚焦效应。在谐振腔内配置相应的光阑时, 低光强的光线通过光阑产生衍射损耗(hard aperture effect), 由于饱和吸收作

用, 保证了激光器的自锁模。

研究表明, 为了获得稳定的自锁模, 要求精确地调整谐振腔的长度。如果谐振腔的任何一个反射镜偏移 2 mm, 就会使锁模失效。要使激光器实现有效锁模就需要谐振腔稳定, 其条件是 $A_0, D_0 \rightarrow 0$, A_0, D_0 是光束在谐振腔中往返一次的 ABCD 矩阵的矩阵元。它描述了谐振腔内模直径由于非线性自聚焦引起的微小变化, 它可表示激光光强变化对自锁模的影响。为了得到饱和吸收, 要求在增加光强的同时减少模的直径。这一效应表明需要在谐振腔输出透镜附近安置一个光阑, 以满足光阑处的光斑半径对功率的变化率最大^[6]

$$\delta = \frac{1}{w} \frac{dw}{dP}$$

式中 w 为光斑半径(高斯光束基模的束腰半径), P

收稿日期: 2002-04-12; 收到修改稿日期: 2002-09-09

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 60168001)资助项目。

作者简介: 帕力哈提·米吉提(1961—), 男, 维吾尔族, 博士, 副教授, 现在新疆大学从事激光物理、飞秒脉冲技术、非线性光学等的研究和教学工作。E-mail: Fmejid@yahoo.com.cn, Fmejid@asia.com

为光功率, δ 应该是负值而且绝对值尽量地大。一般而言, 为了使激光器在自锁模状态下正常工作, 要求在增益介质中的光强足够强, 而且启动自锁模也必须增加装置。谐振腔的最优化, 关系到激光器的稳定性与自聚焦状态的获得。文献[7~10]介绍了通过激光器谐振腔的优化可获得理想的自聚焦自锁模效果。激光器谐振腔的结构见图 1, 其中图 1(a) 为四反射镜结构。球面镜 1, 2 与平面镜 3, 4, 4 个反射镜组成 Z 形谐振腔。应用 Ti:sapphire, LiSAF, LiCAF 等固体激光材料为激活介质, 得到飞秒脉冲振荡依赖于激光器谐振腔的优化选择。激光器谐振腔优化实际上是球面镜间的距离 L_2 与晶体的位置 x 的选择问题。 δ 增大是通过选择反射镜的焦距 f_1, f_2 和臂长 L_1 与 L_3 的最佳值而实现的。

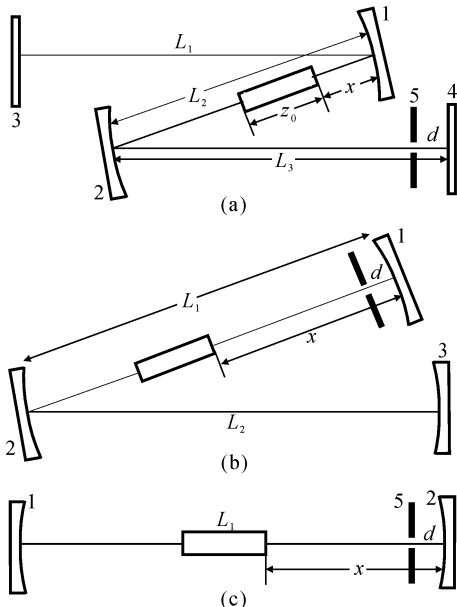


图 1 谐振腔结构

(a) 四镜腔; (b) 三镜腔; (c) 两镜腔。1~4: 反射镜; 5: 光阑;
 z_0 : 非线性激活介质的长度; d : 光阑与输出镜之间的距离

Fig. 1 Schematic diagrams of cavities

(a) cavity with four mirrors; (b) cavity with three mirrors; (c) cavity with two mirrors. 1~4: mirrors; 5: aperture; z_0 is nonlinear element and d is the distance from the aperture to the output mirror

Nd:YAG 晶体有较高的增益系数, 利用三镜腔在匹配的反镜 1, 2 之间不必要靠谐振腔长的伸缩来进行调整(图 1(b))。为此, 适当放置非线性系数高的激活介质, 尽可能地保证光自聚焦现象即可。这种谐振腔应用在二极管抽运的 Ti:sapphire 激光器中^[11]。

2 理论计算

下面讨论图 1(a) 所示的谐振腔中晶体 Ti:sapphire 同时用作增益介质与非线性介质的情况。

除此之外, 文献[6]指出了散射光能增加 $|\delta|$ 的值, 而在切向却减少了它的弧矢平面。近轴近似下高斯基模上横向场分布的主要表达式为

$$E(r) = E_0 \rho^{-1/2} \exp(-kr^2/2\rho - ikr^2/2R) \quad (1)$$

式中 r 为辐射坐标, k 为波数, R 为近轴球面波曲率半径, $\rho = k\omega^2/2$ 为等价共焦腔长。在自洽条件下利用 ABCD 矩阵方法, 可得光束传输参量 q 的表达式为

$$q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D} \quad (2)$$

其中

$$1/q_i = 1/R - i/\rho_i$$

(2) 式中 A, B, C, D 为该光学系统的光束矩阵元,

(2) 式给出了光束传播规律。

光在非线性介质中的传播满足方程

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + i\frac{1}{2k_0}\Delta_{\perp} + i\beta_1|E|^2\right)E(r, z) = 0 \quad (3)$$

其中

$$\Delta_{\perp} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) \quad \beta_1 = \frac{k_0 n_2}{2n_0}$$

(3) 式中, z 表示纵坐标, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$, λ_0 为真空中的波长, n_0, n_2 为线性与非线性折射率, 晶体 Ti:sapphire 的对应值是 1.76 和 $3 \times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{kW}$, 激活介质长度 z_0 透射后的模参数表示为^[11]

$$\rho = [(C_1 z_0 + C_2)^2 + C_3]/C_1$$

$$R = \rho/(C_1 z_0 + C_2) \quad (4)$$

式中 $C_1 = \rho_0/R_0^2 + C_3/\rho_0$, $C_2 = \rho_0/R_0$, $C_3 = 1 - 2\beta_1 \rho_0 E_0^2$, 其中 ρ_0, R_0 为光束参数, E_0 为光束透射非线性激活介质的光场。

通过直径为 D^1 的光阑的光透射率为

$$T(I) = \left\{ 1 + \left[\frac{2\omega_a(I)}{D^1} \right]^2 \right\}^{-1/2}$$

$\omega_a(I)$ 为在光阑位置处的光束半径, 小信号光强微商透射率为

$$\Gamma_0 = \left| \frac{\partial T}{\partial I} \right|_{I \rightarrow 0}$$

该公式描述了透射率对光强的分辨效应, 该量在从脉冲噪声形成飞秒脉冲的初始阶段起关键作用。 Γ_0 的值越高越能更快地形成飞秒主脉冲及有效地抑制其余脉冲。

3 结 果

图 2(a), (b) 表示对四镜腔进行运算后所得的

结果。

臂长 L_1 和 L_3 与焦距 f_2 选定后, 焦距 f_1 变化的范围为 $0 \sim 7$ cm 或 $0 \sim 9$ cm。

图 2(a), (b) 中虚线为 $f_2 = 5$ cm 的情况, 可以看出 $f_1 = f_2 = 5$ cm 时 Γ_0 都不为最大值。最大值的位置与 f_1, L_1, L_3 有密切关系。

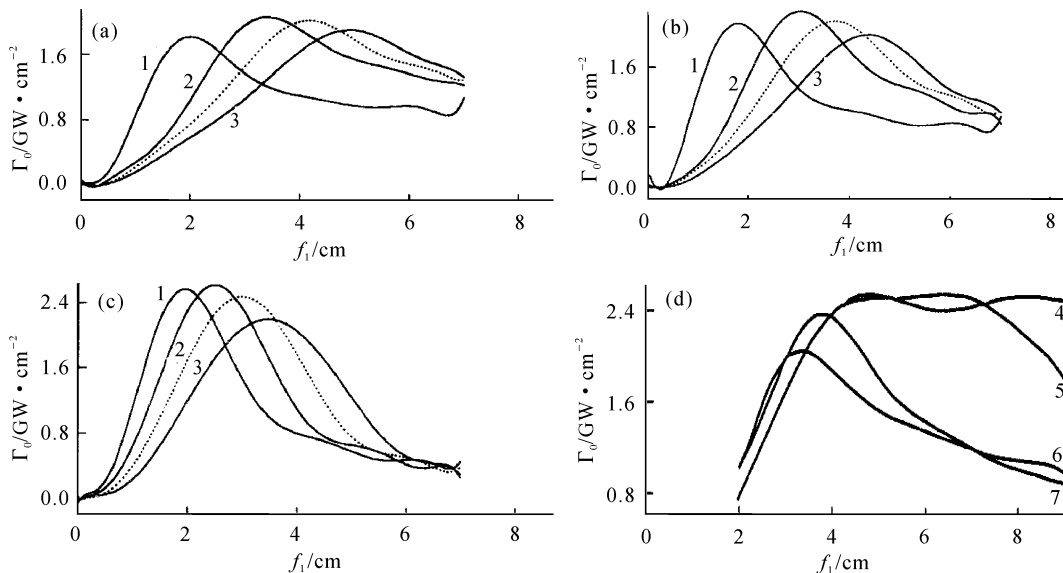


图 2 四镜腔的小信号微商透射曲线

Fig. 2 Derivative of the small-signal transmission coefficient plotted for a four-mirror cavity with $d = z_0 = 1$ cm, $D^1 = 1$ mm, $L_1 = L_3 = 80$ cm (a), 50 cm (b), 25 cm (c), $f_2 = 2$ cm (curve 1), 4 cm (curve 2), 5 cm (dotted curve), and 6 cm (curve 3). The parameters for (d) are $L_1 = 80$ cm, $L_3 = 0.5$ cm (curve 4), 10 cm (curve 5), 50 cm (curve 6), and 80 cm (curve 7)

可见, 平常应用的 Ti:sapphire 四镜腔中, $f_1 = f_2 = 5$ cm 的反射镜对称腔不是优化选择。图 2 中只有图 2(a) 的曲线 1 符合 $f_1 = f_2$, 图 2(a), (b) 的曲线 2 给出优化选择为 $f_2 = 4$ cm, $f_1 \sim 3.5$ cm 对应 $L_1 = L_3 = 80$ cm 及 50 cm。

从图 2(a)~(c) 可以看出, 与选择 $L_1 = L_3 = 80$ cm 相比, 缩短 L_3 到 50 cm 和 25 cm 会出现微商透射的增加。但曲线逐渐变窄, 这就要求焦距 f_1 的调整精确度更高以及 $f_2 - f_1$ 之差更大。

除了微商透射起重要作用外, 对小信号来说激活介质的透过率对确定自锁模的阈值同样起很重要的作用。要解决 Γ_0 的优化性问题需要最短的谐振腔, 为了保证降低抽运强度需要增加小信号的透过率, 改变 f_1 的范围, 从而达到自锁模的目的。为此精密构成的四镜腔要缩短臂长 L_1, L_3 或其中之一, 见图 3。

在保证调制器高分辨本领和低阈值自锁模的前提下, 缩短四镜腔在光阑处的臂长 L_3 , 在 L_1 的长度不变的情况下可增加微商透射率 (参见图 2(d) 曲线 4), 在四镜腔中 $L_3 = 0.5$ cm 实际上等效一个三镜腔。不仅微商透过率增大, 而且在 f_1 足够宽 (大约 $4 \sim 9$ cm) 的范围内, 与 f_1 关系不大, 因此三镜腔可

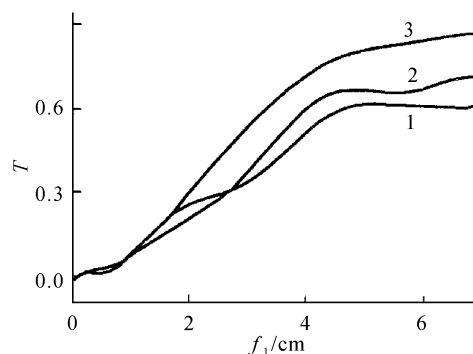


图 3 四镜腔内小信号透过率的关系曲线

Fig. 3 Small-signal transmission coefficient for a four-mirror cavity with $L_1 = L_3 = 80$ cm (curve 1), 50 cm (curve 2), and 25 cm (curve 3); $f_2 = 4$ cm, $d = z_0 = 1$ cm, $D^1 = 1$ mm

能保证激光自锁模的有效高分辨本领。

再来讨论三镜腔的最优化问题。首先要确定图 2 的两种形式中利用哪一种 (光阑接近于腔镜 1 或 3) 形式能获得自锁模。计算结果指出, 光阑位于腔镜 1 附近的状态较好。

从图 4 可以看出在参数 $f_2 = 1$ cm, $f_3 = 4$ cm, $L_2 = 1$ m 时获得了曲线 2。偏离优化值 $f_3 = 4$ cm

时都引起了微商透射率的下降(从曲线 3 和 1 可以看出)。从图 4 中还可以看出,微商透过率很大,但也带来 f_1 过小(~ 5.1 mm)及调整精度过高的缺点。

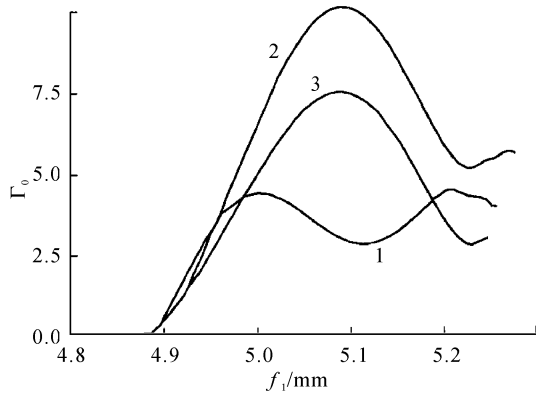


图 4 三镜腔的小信号微商透射率的关系曲线
Fig. 4 Derivatives of the small-signal transmission coefficient for a three-mirror cavity with $L_2 = 1$ m, $f_2 = 1$ cm, $f_3 = 2$ cm (curve 1), 4 cm (curve 2), 6 cm (curve 3), $d = 1$ cm, $z_0 = 1$ cm, $D^1 = 1$ mm

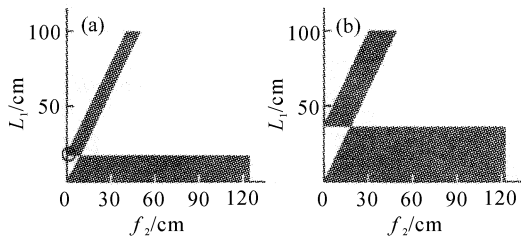


图 5 二镜腔的稳定区域
Fig. 5 Stability regions of two-mirror cavity with (a) $f_1 = 10$ cm; (b) $f_1 = 20$ cm

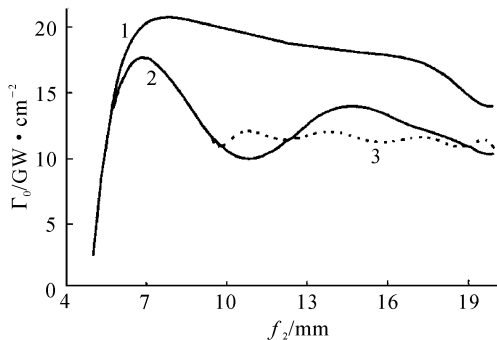


图 6 二镜腔的小信号微商透射率曲线
Fig. 6 Derivative of the small-signal transmission coefficient for a two-mirror cavity with $f_2 = 5$ cm (curve 1), 50 cm (curve 2) and ∞ (curve 3), $d = z_0 = 1$ cm, $D^1 = 1$ mm

在三镜腔中,如果在反射镜 2 的位置上换成焦距为 $f_2 \rightarrow \infty$ 的反射镜,整个谐振腔变成了光阑与激活介质同时起非线性介质作用的二镜腔。

图 5 给出了坐标为 f_2, L_1 的二镜腔的稳定区域, f_1 的增加使稳定区域范围也增大。充分提供高微商透射率的谐振腔参数总是处在稳定区域范围所决定的位置(见图 5 中的阴影区)。

图 6 给出微商透射率与 f_1 的关系。它明显不同于前面所讲的三镜腔、四镜腔的优化的微商透射率。在这种情况下因 f_1 及相应的 L_1 太小而无现实意义。

参 考 文 献

- 1 Falihati · Mijiti, V. L. Kalashnikov, I. G. Poloyko *et al.*. Kerr lens mode-locked operation of Yb:KYW laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **B11**(3):166~168
- 2 M. T. Asaki, C. P. Huang, D. Garvcy *et al.*. Generation of 11-fs pulses from a self-mode-locked Ti:sapphire laser [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(12):977~979
- 3 A. Scavennec. Mismatch effects in synchronous pumping of the continuously operated mode-locked dye laser [J]. *Opt. Comm.*, 1976, **17**(1):14~17
- 4 Zhang Zhigang, Xu Min. Advances in femtosecond laser technology and its applications [J]. *Laser Journal* (激光杂志), 1999, **20**(5):7~11 (in Chinese)
- 5 H. A. Haus, J. G. Fujimoto, E. P. Ippen. Analytic theory of additive pulse and Kerr lens mode locking [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(10):2086~2096
- 6 Zhang Ning, Xing Qi-rong, Han Xiuqin *et al.*. Study on self-starting of self-mode-locked solid state laser [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2001, **A28**(4):293~297 (in Chinese)
- 7 G. Cerullo, S. De. Silvestri, V. Magni. Self-starting Kerr-lens mode locking of a Ti:sapphire laser [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(14):1040~1042
- 8 J. Hermann. Theory of Kerr-lens mode locking: role of self-focusing and radially varying gain [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1994, **11**(3):498~512
- 9 Falihati · Mijiti, Abdurusul, Toran · Vajidi. Self-oscillations in cw solid-state ultrashort-pulse-generating lasers with mode-locking by self-focusing [C]. *SPIE*, 2002, **4914**:414~421
- 10 V. Magni, G. Cerullo, S. De Silvestri. ABCD matrix analysis of propagation of Gaussian beams through Kerr media [J]. *Opt. Comm.*, 1993, **96**(4~6):348~355
- 11 V. L. Kalashnikov, V. P. Kalosha, V. P. Mikhailov *et al.*. Self-mode locking of four-mirror-cavity solid-state lasers by Kerr self-focusing [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12**(3):462~467