

自锁模 Cr:LiSAF 飞秒激光器的谐振腔设计*

王加贤

(华侨大学电气技术系, 泉州 362011)

摘要 以自聚焦理论为基础, 考虑象散补偿的情况, 推导出包括 LiSAF 晶体在内的三镜腔的非线性传输矩阵. 由此, 可计算出腔内及晶体内部光束半径随激光功率的变化, 并确定腔的较佳参数.

在实验上实现了三镜腔 Cr:LiSAF 激光器的自锁模运转.

关键词 三镜腔, Cr:LiSAF, 自锁模, 克尔透镜

分类号 TN 242

Cr:LiSAF(Cr^{3+} :LiSrAlF₆)晶体是继掺钛蓝宝石之后, 出现的一种近红外宽调谐的固体激光材料^[1]. 它的发射谱与钛宝石相似(约 750~950 nm), 但吸收谱红移, 可采用包括氪离子激光器、氙离子激光器、二极管激光器, 以及闪光灯在内的多种泵浦光源. Cr:LiSAF 晶体的激光上能级寿命长(67 μs), 这就有利于反转粒子数的提高和能量的贮存. 近年来, 国外利用氪离子激光(或二极管激光)泵浦的自锁模 Cr:LiSAF 激光器已分别获得 33 fs 和 34 fs 的锁模脉冲^[2,3], 但它们都是在四镜腔的结构中实现的. 为了使激光器小型化、调整方便, 以及提高脉冲的重复率, 作者在国内首次采用三镜腔结构实现低泵浦功率下 Cr:LiSAF 激光器的自锁模, 得到重复频率 150 MHz、脉宽 51 fs、输出功率 48 mW 的脉冲序列. 本文报道腔的设计及激光模式的理论计算, 并与实验结果比较.

1 谐振腔设计

近年来, 关于自锁模激光器的实验和理论研究, 绝大多数是基于 Z 型腔和 X 型腔. 在普通的 Z 型腔中, 有 2 个长臂, 一个放置棱镜对, 另一个放置小孔和狭缝. 两臂长度取对称时, 腔的稳定性较好, 所以腔长在 1.5 m 左右. 长臂和小曲率半径的球面镜是在晶体内产生小束腰的关键, 我们认为, 一个长臂就可以达到这个作用. 所以, 在利用增益介质的软光阑产生克尔透镜效应时, 可以去掉另一臂, 并把相应的球面镜转向晶体, 成为三镜腔结构, 如图 1 所示. 图中 M_1 , M_2 为球面反射镜(对 850 nm 光全反), 构成半共焦半共心内腔; M_3 为透过率 2.5% 的平面输出镜; P_1 , P_2 为熔石英

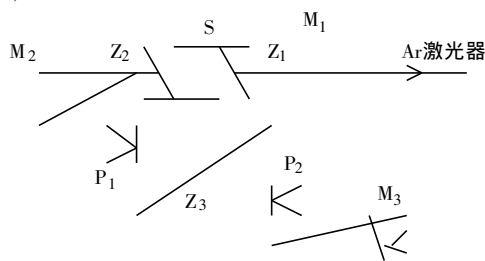


图1 三镜腔结构的 LiSAF 激光器

棱镜对. 三镜腔保留了四镜腔中高斯光束以布氏角进入晶体, 减小了损耗, 引入了象散的一些特点, 但折叠镜 M_2 使象散得到了补偿, 同时为晶体内部提供了很小的振荡光腰半径. 然而, 与四镜腔相比, 三镜腔除了具有腔长缩短, 实现激光器的小型化和提高脉冲重复率的优点外, 更值得注意的是, 可独立地改变 M_1 镜到晶体端面的距离(在四镜腔内, 移动折叠镜时, 必须同时改变其角度), 使激光器的调整更加方便, 提高调整精度, 减小腔的损耗. 这对于像 LiSAF 晶体这类二阶非线性系数不大的增益介质, 是非常重要的.

1.1 腔的设计理论

对于图 1 所示的三镜腔, 当腔内振荡光束以布氏角进入晶体时, 子午面和弧矢面内的光斑半径发生不同的变化, 引起了象散. 该象散可以用斜入射球面镜产生的象散来补偿. 当激光器运转在连续光状态时, 把 LiSAF 晶体看作是一段线性的、均匀的光学介质. 可以写出以 M_3 镜为参考平面的子午面和弧矢面内的单程传输矩阵为

$$T_{0i} = \begin{bmatrix} a_i & b_i \\ c_i & d_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & z_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & S_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & z_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_i} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & z_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中下标 i 取 x 代表子午面, i 取 y 代表弧矢面(下同). z_1 为 M_1 镜与晶体端面 1 的距离, z_2 为 M_2 镜与晶体端面 2 的距离, z_3 为 M_3 镜与 M_2 镜的距离. 在子午面内, $S_x = S/n_0^3$, $f_x = f_0 \cdot \cos\theta$; 在弧矢面内, $S_y = S/n_0^3$, $f_y = f_0 \cdot \cos\theta$. 其中 $n_0 = 1.41$ 为晶体的折射率, θ 为 M_2 镜的入射角, f_0 为 M_2 镜的焦距. 采用等效 G 参数分析法, 即

$$G_{1i} = a_i - b_i/R_3 = a_i; \quad G_{2i} = d_i - b_i/R_1. \quad (2)$$

三镜腔有 2 个光腰, 其中 1 个在 M_3 镜上(设为光腰 1), 另 1 个在 M_1 镜与 M_2 镜之间(设为光腰 2), 可以得到光腰 1、光腰 2 的半径以及光腰 2 与 M_1 镜的距离分别为^[8]

$$\omega_{1i} = \left[\frac{\lambda b_i}{\pi} \frac{1}{G_{1i}(1 - G_{1i}G_{2i})} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

$$\omega_{2i} = \left[\frac{\lambda b_i}{\pi} \frac{G_{1i}G_{2i}(1 - G_{1i}G_{2i})}{G_{2i} + d_i^2 G_{1i} - 2d_i G_{1i}G_{2i}} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

$$L_i = \frac{b_i G_{1i}(d_i - G_{2i})}{G_{2i} + d_i^2 G_{1i} - 2d_i G_{1i}G_{2i}}. \quad (5)$$

用等效 G 参数表示的腔的稳定性条件为 $0 < G_{1i}G_{2i} < 1$.

利用上面这些式子, 可求出激光器在连续光运转时的稳定区范围以及相应的激光模式. 但是, 当激光器运转在自锁模状态时, 腔内的激光峰值功率较高, 晶体的折射率将不再是均匀分布的, 而是与光强 I 有关, 即

$$n = n_0 + \frac{n_2 I^2}{2}, \quad (7)$$

式中 n_2 为晶体的非线性折射率. 当激光功率低于自聚焦的阈值功率时, 高斯光束在晶体中的传播仍然保持为高斯光束. 所以, 可根据文献 [5] 的理论, 把光在非线性和晶体中的子午面和弧矢面内的传输矩阵表示为

$$T_{Ni} = \frac{1}{1 - \gamma_i} \begin{bmatrix} 1 & S_i \\ -\gamma_i & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

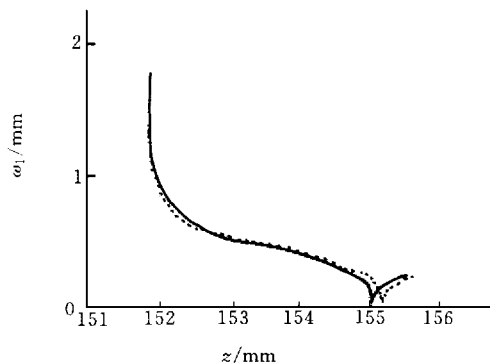
$$\gamma_i = \frac{P}{P_c} \left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{2\pi\omega_i^2}{\lambda S_i} - \frac{\lambda S_i}{2\pi\omega_i^2} \right)^2 \right]^{-1}, \quad (9)$$

式中 P 是腔内激光功率, P_c 是自聚焦的阈值功率, ω_i, ω_r 是连续光运转 ($P=0$) 时 M_1 与 M_2 镜之间的光腰半径和晶体中心的光斑半径. 设计自锁模腔时, 首先利用式(1)~(5)及高斯光束在均匀介质中的传输公式求出 $P=0$ 时的 ω_r 及 ω_i , 进而求出 $P=0$ 时的 T_{Ni} . 然后, 用 T_{Ni} 矩阵代替式(1)中的 $\begin{bmatrix} 1 & S_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 矩阵, 重复式(1)~(6)的运算, 就可得到自锁模时三镜腔的稳定性条件、激光模式及腔的有关参数.

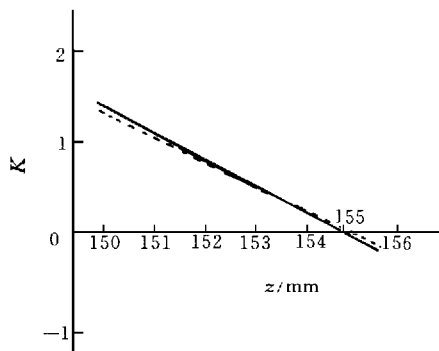
1.2 计算结果及讨论

Cr:LiSAF 晶体通光长度 $S=4$ mm, 球面镜的曲率半径 $R_1=R_2=100$ mm, $z_3=850$ nm, 激光波长 $\lambda=850$ nm. 由式(1),(2),(6)可确定象散补偿角 $\theta=9.5^\circ$. 根据这些参数及上述的方法及式子, 作者进行了下面一些计算.

(1) 计算激光器连续光运转时输出镜上子午面和弧矢面内光斑半径 ω_x, ω_y . 研究腔的稳定性因子 $K_x = G_{1x} \cdot G_{2x}, K_y = G_{1y} \cdot G_{2y}$ 随球面镜之间的几何距离 $z = z_1 + z_2 + S$ 的变化情况, 分别如图 2(a),(b) 所示(实线对应子午面, 虚线对应弧矢面). 可以看出, 三镜腔的稳定区为 z 在 151.9~154.9 mm 范围(几何距离). 当 $z=151.9$ mm 时, 光斑半径趋于无限; 当 $z=154.9$ mm 时, 光斑半径趋于零. 两条曲线重合, 说明象散得到了较好的补偿.



(a) 光斑半径

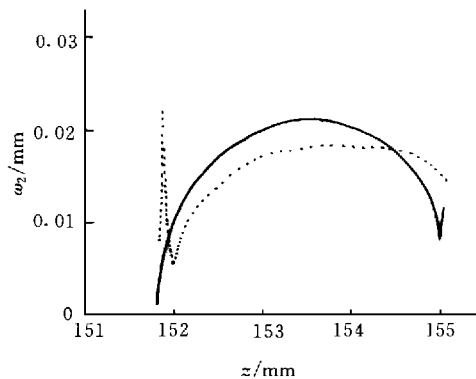


(b) 稳定性因子

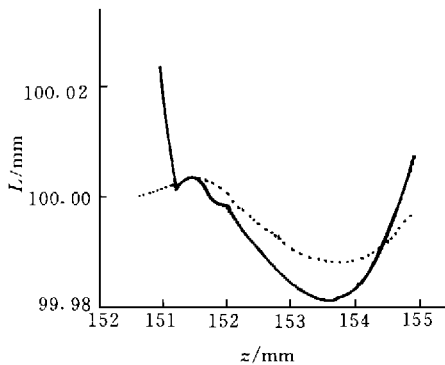
图2 输出镜上的光斑半径(ω)和稳定性因子(K)与球面镜距离(z)的关系

(2) 晶体在内腔中的位置是实现自锁模的关键因素. 由于在稳定区范围内, 连续光运转时, 激光的子午面和弧矢面内的光腰在 M_1 镜的曲率中心附近基本重合. 所以, 选取 $z_1=99.8$ mm, 以便使泵光的光腰(子午面和弧矢面)和激光光腰在晶体端面实现较好的匹配^[6]. 在此情况下, 计算了归一化光功率 $P_N = P/P_c = 0.5$ 时, 光腰半径及位置随 z 的变化, 如图 3(a),(b) 所示(实线对应子午面, 虚线对应弧矢面). 图 3 表明, 自锁模时, 子午面和弧矢面的光腰位置也基本一致, 均处于晶体端面附近; 光腰大小有点差别, 当 $z=154.7$ mm 时, 差别最小. 因此, 对于自锁模三镜腔来说, 选择 $z_1=99.8$ mm, $z=154.7$ mm 是合理的.

(3) 为了确定在何处放置狭缝, 或可否利用增益光阑产生克尔透镜效应. 我们计算了 $P_N = 0, 0.5$ 两种情况下, 当腔工作于稳定区边缘($z=154.7$ mm, $z_1=99.8$ mm)时, 腔内不同位置



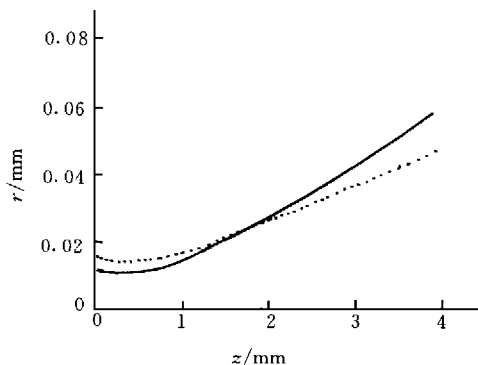
(a) 光腰半径



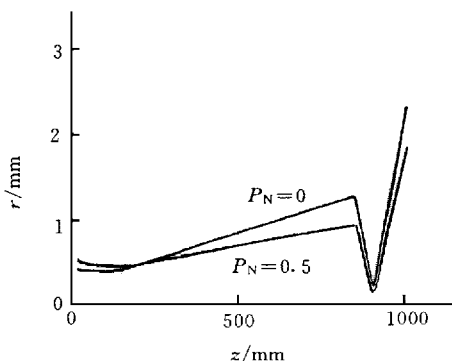
(b) 光腰位置

图3 内腔中光腰半径(ω_2)和光腰位置(L)与球面镜距离(z)的关系

子午面内的光束半径,如图4(a)所示(坐标参考点为输出镜).同时也计算了晶体内部不同位置的光束半径,如图4(b)所示.图4表明,在输出镜及其附近,光束半径随着激光功率的增加



(a) 腔内不同位置的光束半径



(b) 晶体内部的光束半径

图4 腔内不同位置和晶体内部的光束半径(r)与球面镜距离(z)的关系

而增大;在折叠镜附近及晶体内部的绝大部分区域,光束半径随着激光功率的增加而减少.根据克尔透镜锁模的形成机制,可得出结论:对于所设计的三镜腔,在输出镜附近放置小孔或狭缝,不能产生克尔透镜效应.但在折叠镜附近放置狭缝,或利用棱镜对的两个棱边所起的狭缝作用,或利用LiSAF晶体的增益光阑,都可产生明显的克尔透镜效应.因此,采用合适参数的三镜腔结构来实现LiSAF激光器的自锁模是可行的.

2 实验研究

采用图1所示的实验装置及上节理论计算中所选取的参数.Cr:LiSAF晶体由北京人工晶体所提供,掺杂6%,对488 nm激光的总吸收为70%.氩离子激光器输出的蓝光作为泵浦光,由焦距120 mm的透镜聚焦到晶体.在插入棱镜对后细调激光器各元件,使连续光输出最大.然后,在不改变其它元件位置的情况下,沿腔轴移动M₁镜,使激光器工作在稳定区边缘.

通过对腔的仔细调整, 当泵浦光功率为 760 mW 时, 轻敲 M_3 镜, 就出现自锁模; 当泵浦功率为 860 mW 时, 输出功率 48 mW, 测得脉冲宽度 51 fs, 重复频率 150 MHz. 自锁模时, 腔的各项参数与计算结果一致.

3 结论

三镜腔结构的 Cr:LiSAF 激光器具有小型化、调整方便、重复频率高的优点. 通过对腔的理论计算, 得出了在象散补偿情况下, 三镜腔工作的稳定区. 当三镜腔工作于稳定区边缘时, 晶体内部有较强的克尔透镜效应, 可利用增益光阑来实现自锁模运转. 计算结果与实验符合.

参 考 文 献

- 1 Payne S A, Chase L L, Smith L K, et al. Laser performance of $\text{LiSrAlF}_6: \text{Cr}^{3+}$. J. Appl. Phys., 1989, 66 (3): 1 051 ~ 1 056
- 2 Rizvi N H, French P M, Taylor J R. Generation of 33 fs pulse from a passively modelocked Cr:LiSAF laser. Opt. Lett., 1992, 17(22): 1 605 ~ 1 607
- 3 Dymott M J P, Ferguson A I. Self-mode-locked diode-pumped Cr:LiSAF laser producing 34 fs pulses at 42 mW average power. Opt. Lett., 1995, 20(10): 1 157 ~ 1 159
- 4 卢亚雄, 吕百达. 矩阵光学. 大连: 大连理工大学出版社, 1989. 221 ~ 223
- 5 Magni V, Cerullo G, Silvestri S D. ABCD matrix analysis of propagation of gaussian beams through kerr-media. Opt. Commun., 1993, 4(96): 348 ~ 355
- 6 Valentine G J, Hopkins J M, Alvarez P L, et al. Ultralow-pump-threshold, femtosecond $\text{Cr}^{3+}:\text{LiSrAlF}_6$ laser pumped by a single narrow-stripe AlGaInP laser diode. Opt. Lett., 1997, 22(21): 1 639 ~ 1 641

Design of Cavity Resonator for a Self-Mode-Locking and Femtosecond Cr:LiSAF Laser

Wang Jiaxian

(Dept. of Elec. Tech., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract Based on the theory of self-focusing and give consideration to compensation of astigmatism, a non-linear transfer matrix is derived for the three-mirror cavities including LiSAF crystal. By applying this matrix, change of radius of beams in the cavity and inside the crystal along with that of laser power can be calculated and the relatively good parameter of the cavity can be determined. The self-mode-locking operation of three-mirror cavity and Cr:LiSAF laser is realized experimentally.

Keywords three-mirror cavity, Cr:LiSAF, self-mode-locking, Kerr lens