

高效连续波钛宝石激光器的优化设计及实验研究³

王屹山 陈国夫 于连君 赵尚弘 王贤华
(西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室, 西安 710068)

摘 要 运用 ABCD 律及自再现条件对钛宝石线性腔的折叠角进行了优化, 从而大大提高了钛宝石晶体中光束束腰的耦合效率。同时实验上对连续钛宝石激光器进行了研究, 采用 20mm 长的钛宝石晶体和 10% 输出耦合镜, 并运用优化后的折叠角, 最终用全氩离子激光器泵浦的连续波钛宝石激光器的斜率效率高达 3412%, 在泵浦功率为 717W 下, 连续钛宝石激光器输出功率达 1189W。
关键词 连续波; 钛宝石激光器; 斜率效率; 弧矢面

1 问题的提出

在钛宝石激光器中, 由于以布儒斯特角切割的钛宝石晶体在子午面和弧矢面中的光程长度不一样, 离轴聚焦凹面镜在子午面和弧矢面上的光斑尺寸大小不同, 形成激光腔模的象散。象散不仅影响激光的输出模式, 导致输出光束质量下降, 还影响了钛宝石晶体中泵浦光和振荡光的耦合效率^{1~6}。在线性折叠腔中, 人们一般通过选择合适的折叠角, 使激光腔的准直臂上钛宝石晶体和聚焦凹面镜对象散的影响抵消, 从而输出非象散的高斯基模。运用的公式为

$$n^{-4}h(n^2-1)\sqrt{n^2+1}-R\sin(H)\tan(H)=0$$
(1)

式中 h 为激光晶体在通光方向上的长度, n 为激光晶体的折射率, R 为聚焦凹面镜的曲率半径, H 为象散补偿角。但这个公式并不能保证晶体中的光束模式为高斯基模。事实上, 随着晶体长度的增加, 晶体中光束束腰模式将变坏, 这会大大影响泵浦光和振荡光的耦合效率。

本文首先运用 ABCD 传输矩阵及自再现条件², 数值分析了钛宝石线性折叠腔中钛宝石晶体内的振荡光束腰尺寸, 并以 20mm 钛宝石晶体长

度为例, 得出了最佳的折叠角。同时采用此折叠角对钛宝石激光器进行了实验研究, 得到了很高的斜率效率。

2 数值计算与理论分析

钛宝石激光器的线性折叠腔如图 1 所示, 其中准直臂的长度为 L_1 和 L_2 , 聚焦凹面镜到钛宝石晶体面的距离为 d_1 和 d_2 。

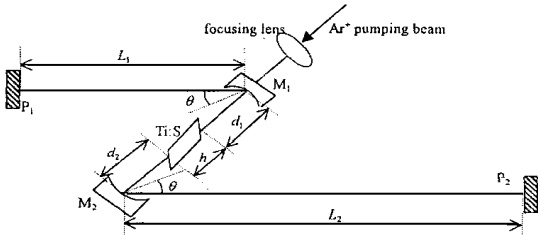


图 1 钛宝石激光器折叠直腔腔型结构图
Fig11 Diagram of linear folded cavity of Ti:sapphire

聚焦凹面镜在弧矢面和子午面中的焦距分别为 $f_s=R/(2\cos H)$ 和 $f_t=(R\cos H)/2$, 而以布儒斯特角切割的钛宝石晶体在弧矢面和子午面中的有效光程长度分别为 $h\cos H$ 和 $h\sin H$ ³, 这样聚焦凹面镜和钛宝石晶体在弧矢面和子午面中的传输矩阵分

³九五攀登计划资助项目
收稿日期: 199—05—07

别为 $F_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2R^{-1}\cos H & 1 \end{bmatrix}$, $F_t = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2(R\cos H)^{-1} & 1 \end{bmatrix}$ 和 $B_s = \begin{bmatrix} 1 & h\ddot{O}n \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $B_t = \begin{bmatrix} 1 & h\ddot{O}n^3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, 则激光腔中从镜 P_1 到 P_2 在弧矢面和子午面上的 $ABCD$ 传输矩阵分别为

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_s = \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2R^{-1}\cos H & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & h\ddot{O}n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2R^{-1}\cos H & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_t = \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2(R\cos H)^{-1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & h\ddot{O}n^3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2(R\cos H)^{-1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(2)

利用上式和自再现条件可求出激光腔中任意点的光斑尺寸, 我们计算了不同准直臂长度比例下钛宝石晶体中弧矢面和子午面上的光束束腰尺寸随折叠角的变化, 其它参数为钛宝石晶体长度为 20mm, 聚焦凹面镜 M_1 、 M_2 的曲率半径 R 均为 100mm, 距离钛宝石面 $d_1 = d_2 = 50\text{mm}$, 结果如图 2 所示, 其中 B 、 C 曲线分别代表准直臂长度之比

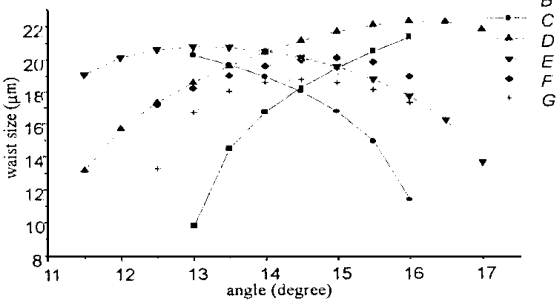


图 2 钛宝石晶体内弧矢面和子午面上的光斑束腰尺寸随折叠角的变化, 其中 B 、 D 、 F 曲线分别表示弧矢面内准直臂之比为 1:3、1:2、1:1; C 、 E 、 G 曲线分别表示子午面内准直臂之比为 1:3、1:2、1

Fig12 The spot size of beam waist in the sagittal and tangential plane in the Ti:sapphire crystal as a function of folded angle on the different condition 为 1:3 情况下弧矢面和子午面上光束束腰尺寸随折叠角的变化, D 、 E 曲线分别代表准直臂长度之比为 1:2 情况下弧矢面和子午面上光束束腰尺寸随折叠角的变化, F 、 G 曲线分别代表准直臂长度之比为 1:1 情况下弧矢面和子午面上光束束腰尺寸随折叠角的变化, 可以看出, 在不同准直

臂比例下, 弧矢面和子午面上的束腰尺寸大小均在折叠角等于 14 左右相等或最接近, 这表明在此折叠角处钛宝石晶体中的光束束腰最接近高斯基模, 从而与泵浦光聚焦光束最匹配, 耦合效率最高, 并且这个最佳折叠角与准直臂的长度及比例无关 1 通过计算还表明, 平面镜 P_1 和 P_2 处弧矢面和子午面上的光斑尺寸分别随距离 L_1 或 L_2 的变化而不同, 这样我们可以通过改变 L_1 或 L_2 的值找出弧矢面和子午面上的光斑尺寸相等或最接近的地方, 从而使输出光束最接近高斯基模 1

3 实验研究

我们采用 Z 形折叠腔对钛宝石激光器进行实验研究, 实验结构图如图 1 所示, 泵浦源为相干公司生产的 NNOVA 300 氙离子激光器, 最高输出功率达 819W, 泵浦光采用全泵浦 1 泵浦光通过聚焦透镜经聚焦凹面镜 M_1 聚焦在钛宝石晶体上, 钛宝石晶体长度为 20mm, 为减小反射损耗以布儒斯特角切割, 泵浦光聚焦透镜焦距为 66mm, M_1 和 M_2 均为曲率半径为 100mm 的凹面镜, P_1 和 P_2 为平面镜, M_1 、 M_2 及 P_2 镜上均镀有 750nm~850nm 的全反膜, P_1 为耦合输出镜, 在 750nm~850nm 上输出率为 10% 1

实验中取准直臂分别为 $L_1 = 46\text{cm}$, $L_2 = 4916\text{cm}$, $d_1 = d_2 = 50\text{mm}$, 在此实验条件下, 用前面的方法计算出的结果如图 3 所示, 可以看出, 折叠角在 13~14 之间时, 弧矢面和子午面上的束腰尺寸差别最小, 与前面的结果基本一致, 因而在实验中取折叠角 $H = 14^\circ$

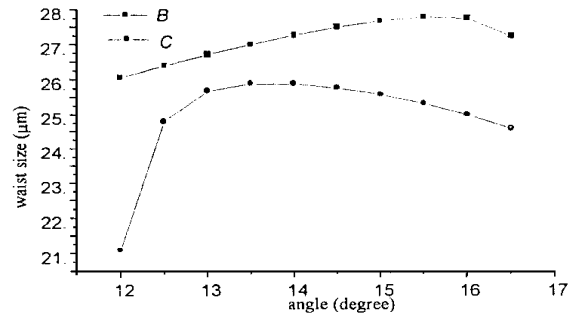


图 3 实验条件下, 钛宝石晶体内弧矢面和子午面上的光斑束腰尺寸随折叠角的变化, 其它参数为 $L_1 = 46\text{cm}$, $L_2 = 4916\text{cm}$, $d_1 = d_2 = 50\text{mm}$

Fig13 The spot size of beam waist in the sagittal and tangential plane in the Ti:sapphire crystal as a function of folded angle on the experimental condition

测量出激光输出功率随泵浦功率的变化如图 4 所示, 图中点为测量结果, 曲线为线性拟合结果, 可以看出两者符合得非常好, 由图可测得曲线的斜率效率可达 3412%, 这是我们迄今为止见到的由连续氙离子激光器泵浦的连续波钛宝石激光器的最大斜率效率 1 当泵浦功率为 717W 时, 钛宝石激光最大输出达 1189W 1 实验还表明, 钛宝石输出光斑质量与距离 L_1 有关, 当 L_1 的值选择合适时可输出非常好的高斯基模, 这也与前面的分析一致 1

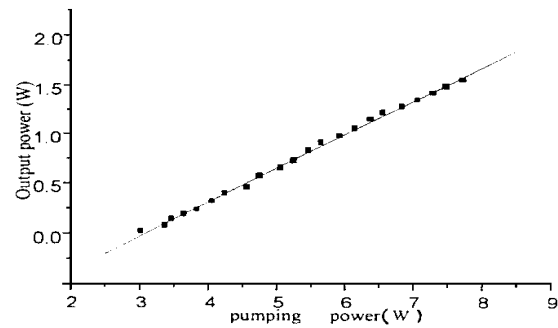


图 4 连续波钛宝石输出功率随泵浦光功率的变化, 由图可测出泵浦光向激光转换的斜率效率为 3412%

Fig14 The output power of continuous wave Ti : sap2 phire as a function of pumping power1The slope efficiency of 3412% is measured from the linear fit curve

参考文献

1 Kane D M 1Ti : sapphire laser cavity mode and pump 2laser mode calculations1Applied Optics, 1994, 33(18): 3849~ 3856

2 吕百达 1 激光光学 1 成都: 四川大学出版社, 1986: 22~ 38, 74~ 76, 137~ 1383

3 王屹山, 陈国夫, 赵尚弘, 王贤华, 侯洵 1 带宽扩展腔产生 15 飞秒光脉冲的实验研究 1 光学学报, 1997, 17(9): 1185~ 1188

4 Wang X L, Hu G J, Li Y, et al1Numerical analysis of beam parameters and stability regions in a folded or ring cavi2 ty1J Opt Soc Am (A), 1994, 11(8): 2265~ 2270

5 Bridges R E, Boyd R W, Agrawal G P1Effect of beam ellipticity on self2node locking in lasers1Opt Lett, 1993, 18 (23): 2026~ 2028

6 Huang X G, Lee W K, Wong S P, et al1Effects of thermal lensing on stability and astigmatic compensation of a Z2fo ld laser cavity1J Opt Soc Am (B), 1996, 13(12): 2863~ 2868

OPTIMUM DESIGN AND EXPERIMENTAL STUDY OF HIGH EFFICIENCY OF CONTINUOUS-WAVE Ti : SAPPHIRE LASER

Wang Yishan, Chen Guofu, Yu Lianjun, Zhao Shanghong, Wang Xianhua

Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, and State Key Laboratory of Transient Optical Technology,

The Academy of Sciences of China, Xi'an 710068, P.R. China

Received date: 1997- 05- 07

Abstract The folded angle of Ti : sapphire linear cavity is optimized with the ABCD law and the self-maintaining condition. The coupling efficiency of beam waist in the Ti : sapphire crystal is raised remarkably. At the same time, the continuous-wave Ti : sapphire laser is studied experimentally. A high slope efficiency of continuous-wave Ti : sapphire laser pumped by an Ar⁺ laser is obtained, with 20mm Ti : sapphire crystal and 10% output coupling mirror, also using the optimized folded angle. With pumping power of 71W, the output power of continuous-wave Ti : sapphire laser is 1189W.

Keywords Continuous-wave; Ti : sapphire laser; Slope efficiency; Sagittal tangential plane



Wang Yishan born in 1970 in Gansu province, graduated from Northwest Normal University in 1993. He got master degree in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics in 1996. Now he is a Ph.D. student of Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics. His research includes the generation, amplification and compression of femtosecond ultrashort optical pulse. He is also interested in femtosecond optical parameter oscillation and amplification.