

Ti : Al₂O₃ 可调谐激光器模式研究

方香云 周寿桓

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要 从高斯光束的理论出发,研究了 Ti : Al₂O₃ 激光器中各参数间的相互关系,引入了 Kerr 非线性透镜效应的影响。根据理论分析的结果,设计可调谐谐振腔,获得了最大可调谐输出能量 77.3 mJ,波长可调谐范围 650~1039 nm,光束发散角约为 1 mrad 的 TEM₀₀ 模激光输出。

关键词 基横模,钛宝石激光器,可调谐

1 引 言

很多应用领域要求掺钛蓝宝石激光器工作在基横模,所以必须进行模式的研究。国际上 100 mJ 低阶模脉冲 Ti : Al₂O₃ 激光器已有产品,国内据已有文献报道近 TEM₀₀ 模输出能量约 20 mJ^[1]。

本文从高斯光束的理论出发,分析激光端面泵浦的 Ti : Al₂O₃ 激光器中各参数间的相互关系,首次考虑 Kerr 非线性透镜效应的影响,并兼顾谐振腔的灵敏度。根据理论分析的结果设计谐振腔,实验中获得最大可调谐输出能量为 77.3 mJ,能量转换效率约为 42%,波长可调谐范围为 650~1039 nm 的 TEM₀₀ 模输出。

2 谐振腔理论的研究

2.1 低功率密度运转

对于低功率运转激光泵浦的脉冲钛宝石激光器,可以不考虑热透镜和其他非线性作用。根据谐振腔理论^[2],图 1(a) 所示的谐振腔,TEM₀₀ 模即高斯光束的腰 ω_0 应满足如下的关系,其中 λ 为激光波长, L 为谐振腔的长度

$$\omega_0^4 = \left(\frac{\lambda}{\pi} \right)^2 \frac{L(R_1 - L)(R_2 - L)(R_1 + R_2 - L)}{(R_1 + R_2 - 2L)^2} \quad (1)$$

离束腰的距离 t 位置的光束半径 ω_t 为

$$\omega_t = \omega_0 \left[1 + \left(\frac{\lambda t}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

对于本文所设计的平凹腔, $R_1 = \infty$, $R_2 = R$, $\omega_0 = \omega_1$ 。任意位置与束腰的距离即为该位置

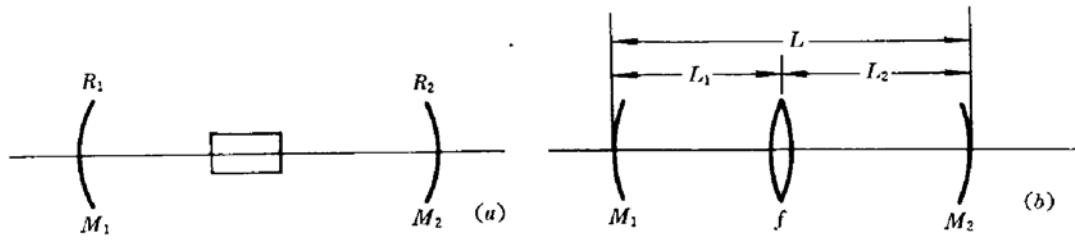


Fig. 1 Schematic diagram of the resonator

与输出镜 M_1 之间的距离。由此可以计算腔内任一位置的模半径和光束发散角随腔条件的变化关系。如图 2 和图 3 所示,图中两条曲线代表两种腔长($L_1 > L_2$)。由此可见模半径随 L 和 R 的增大而增大,发散角随 L 和 R 的增大而减小。为了获得大的基模体积应该选择大曲率和较长的谐振腔。

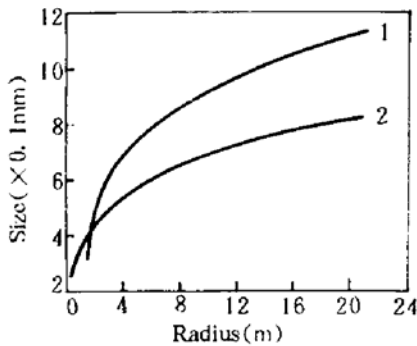


Fig. 2 Beam size vs radius

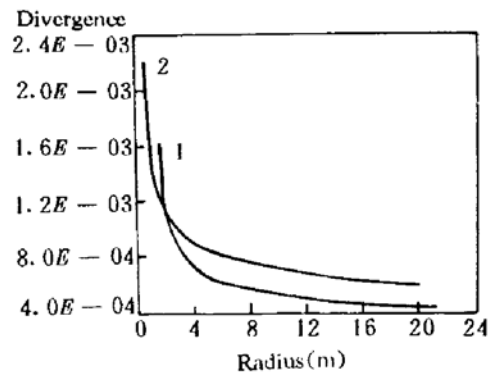


Fig. 3 Divergence vs radius

2.2 高功率密度运转

对于低重复频率激光泵浦的钛宝石激光器,热透镜的影响可以忽略。但实验中发现对于某些参数的谐振腔,当泵浦能量增大时,输出模式变化,有时出现非稳腔的特征。对于激光端面泵浦的钛宝石晶体,在泵浦端附近,功率密度较高,产生非线性效应即 Kerr 效应^[3]。

透明的光学介质,折射率 $n = n_0 + n_2|E|^2$,第二项为折射率的非线性部分, E 为通过该介质的激光的电场强度。对于高斯光束其中心电场强度最大,即 $E = E_0e^{-r/\omega}$,当它通过该光学介质时,在光束中心形成的折射率的变化最大即

$$\Delta n = n_2 E^2 e^{-2r^2/\omega^2}$$

中心部分的光程最长($n_2 > 0$)。这种作用的结果使得介质具有正透镜的效应,使光束产生一定程度的会聚。这种等价的透镜称为 Kerr 透镜,等效焦距为

$$f = \frac{2\pi\omega^2}{\lambda} \left(\frac{P}{P_{cr}} - 1 \right)^{-1/2}$$

其中 P_{cr} 为临界功率,当 $P > P_{cr}$ 时,产生透镜效应。对于钛宝石晶体 n_2 约为 1.4×10^{-13} esu。

考虑 Kerr 透镜的影响,图 1 (a) 所示的谐振腔可粗略等价于图 1 (b) 所示的含薄透镜的谐振腔,用焦距为 f 的薄透镜代替钛宝石晶体。 g 参数表达式为

$$g_1 = 1 - \frac{L_2}{f}, \quad g_2 = 1 - \frac{L_1}{f} - \frac{L_0}{R}$$

其中

$$L_0 = L_1 + L_2 - \frac{L_1 L_2}{f}$$

稳定条件仍为

$$0 < g_1 g_2 < 1$$

所以,当光功率 P 变化时, f 随之变化,原本稳定的谐振腔可能变为非稳腔。

当符合稳定腔条件时, TEM₀₀ 模的半径为

$$\omega_0^2 = \omega_1^2 = \frac{\lambda L}{\pi} \left(\frac{g_2}{g_1(1 - g_1 g_2)} \right)^{1/2}$$

腔内任一位置 t 处的模半径 ω_t 由 ω_0 决定,满足(2)式。

图 4 是 ω_t 随 f 的变化曲线。图中可见,对于特定参数组合的谐振腔,当 f 变化时,若还能满足稳定条件,则模体积随 f 的增大而增大。

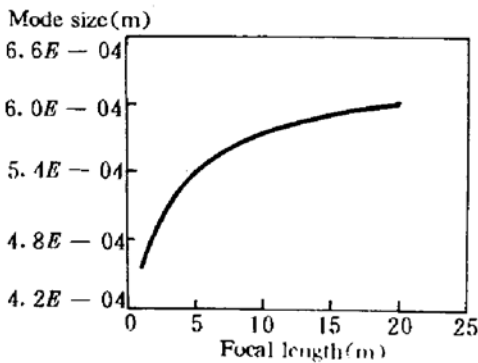


Fig. 4 Beam size vs focal length

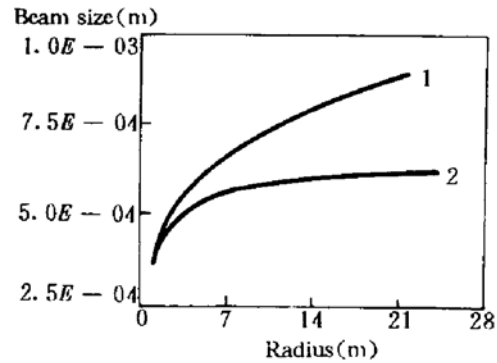


Fig. 5 Beam size vs radius

1, without Kerr lens; 2, with Kerr lens

图 5 示出考虑 Kerr 透镜前后,谐振腔模半径的变化。对于同一谐振腔,若在高功率和低功率运转时都能符合谐振腔稳定条件,那么,高功率时 Kerr 透镜效应的影响使得 TEM₀₀ 模的半径减小。

2.3 谐振腔的灵敏度

对于满足 g 参数稳定条件的谐振腔,腔内 Kerr 透镜焦距 f 的微小变化(或泵浦能量的变化)和谐振腔的微小失调都将影响输出的模式和能量。

(1) 焦距 f 的变化将使得 ω_t 变化。不灵敏的条件为

$$d\omega_t/df = 0$$

$$\text{即} \quad 2g_1 g_2 - 1 + \left(\frac{g_1}{g_2} \right) \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^2 + \frac{2g_1 L_1}{L_2} = 0$$

满足上式的一个特例是 $g_1 g_2 = 0.5$, $L_1 = 0$ 。即内透镜应在输出镜的表面上。

(2) 谐振腔微小失调引起的输出的微小变化可用 M_1 镜的微小转角 α 所导致的光斑在两个腔镜上的位移 x 和 y 来表示^[4]。当 $R_1 = \infty$ 时

$$x = (R - L)\alpha, \quad y = R\alpha$$

即大曲率半径平凹腔的灵敏度比小曲率腔的高,而腔长越短,灵敏度越高。

在实际设计谐振腔时,不仅需要考虑到模体积的匹配,以限制其他横模振荡,提高基横模输出,而且还得兼顾谐振腔的灵敏度,以提高输出的稳定性。

3 实验与结论

根据实际情况,我们选择平凹腔。光路示意图如图 6 所示,图中 M_1 和 M_2 组成谐振腔,通过改变 M_2 的角度调节波长。用棱镜作腔内色散元件,并将钛宝石晶体置于输出镜一端,当泵浦能量为 100 ~ 180 mJ 时,Kerr 透镜 f 约为几米量级。根据谐振腔稳定条件, R 必须大于 0.5 m。从灵敏度考虑,选 $R = 2$ m,则 $g_1g_2 = 0.7$ 。这样晶体处的 TEM_{00} 模半径约为 0.5 mm,发散角约为 0.9 mrad, TEM_{01} 模的半径约为 0.8 mm, TEM_{10} 模半径约为 1 mm。采用近轴端面泵浦方式,用调 Q 倍频 Nd : YAG 激光器作泵浦源。

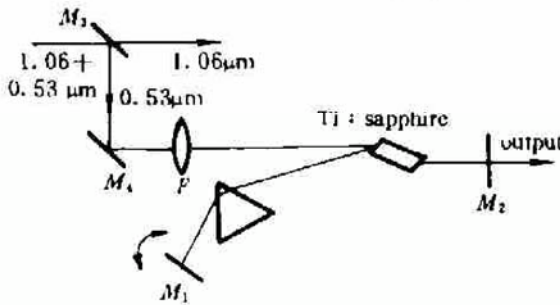


Fig. 6 Schematic diagram of the experiment



Fig. 7 Burn spots of the output laser

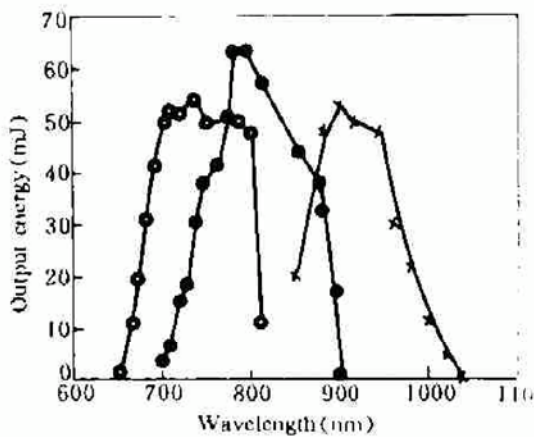


Fig. 8 Tunable range (160 mJ pumped)

当泵浦能量为 180 mJ 时,测得 f 约为 4 m, TEM_{00} 模最大可调谐输出能量 77.3 mJ,能量转换效率约 42%,这时输出波长为 776 nm。在距输出端 4.5 m 处用相纸打出的光斑如图 7 所示。图中可见光斑呈椭圆形,这是由近轴泵浦导致的。测量远场发散角约为 1 mrad,这与理论估算基本一致。实验中换用三套不同波长范围的介质膜片,即 650~750 nm,750~850 nm 和 900~1000 nm。它们的曲率半径相同,测得可调谐曲线波长范围为 650~1039 nm。泵浦能量为 160 mJ 时的调谐如图 8 所示。由于输出镜在不同波长下的透过率不同,在整个波段范围内透过率约为 5~30%,调谐曲线不光滑,最大输出所对应的波长也有所不同。观察中发现,在这个波长调谐范围内,输出模式均为 TEM_{00} 模。

实验中用曲率半径不同的平凹谐振腔进行过比较。如 $R1.0$ m 和 $R15$ m。当泵浦条件不变时,较小曲率半径的谐振腔,由于基模体积小,容易产生低阶模同时振荡, TEM_{00} 模输出能量小。而大曲率半径的谐振腔模体积大,易于获得较高能量的 TEM_{00} 模输出,但灵敏度高,稳定性较差。

致谢 特别感谢王进雄工程师在泵浦源激光器上给予的支持与帮助。

参 考 文 献

- 1 郭承就,韦 丽,周东方等. β -BaB₂O₄ 倍频掺钛宝石可调谐激光. 中国激光, 1992, 19(9): 641~644
- 2 方洪烈著. 光学谐振腔理论. 北京: 科学出版社, 1981

- 3 沈元壤 著, 顾世杰 译. 非线性光学. 北京: 科学出版社, 1987
4 Walter Koechner. Solid State Laser Engineering, Berlin; Springer-Verlag. 1976

Mode Study of a Ti : sapphire Tunable Laser

Fang Xiangyun Zhou Shouhuan

(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015)

Abstract In this paper, the parameters of a Ti : sapphire laser and their correlation have been studied based on the Gaussian theory. The nonlinear effect of Kerr lens has been considered for the first time. According to the theoretical results a laser resonator was designed for our experiment, from which emitting of the fundamental mode with a maximum output energy of 77.3 mJ, tuning range of 650~1039 nm and the divergence of about 1 mrad have been obtained.

Key words fundamental mode, Ti : sapphire laser, tunability

高转换效率连续内腔倍频绿光激光器

我们采用国产输出功率 1 W 的半导体激光器泵浦的 Nd : YVO₄ 内腔倍频激光器, 获得能量转换效率为 12%。Nd : YVO₄ 晶体尺寸为 3 mm × 3 mm × 1 mm, Nd 掺杂浓度 2%, 倍频晶体 KTP 置入腔内。激光二极管输出经准直-聚光光学系统, 其光束椭圆度得到显著改善, 使激光晶体中的激活区与激光谐振腔得到最佳匹配, 从而提高了基波转换效率。泵浦光学系统的损耗约 14%, 注入激光晶体内的最高泵浦功率为 860 mW, 输出绿光功率为 104 mW。

(中国科学院上海光机所激光技术实验室 201800, 何慧娟 廖 严)