

文章编号: 1007-6654(2008)03-0344-04

全固态单频钛宝石激光器

孙 燕, 卢华东, 苏 静*

(量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学光电研究所, 山西 太原 030006)

摘要: 以自制激光二极管(LD)抽运 Nd:YVO₄ 内腔倍频激光器作为钛宝石晶体的抽运源,采用四镜环形谐振腔结构,实现了全固态 780 nm 钛宝石激光器的连续运转。在考虑了钛宝石晶体长度以及环形腔像散补偿情况下,当 532 nm 的抽运光功率为 9 W 时,得到了最大功率为 700 mW 的波长为 780 nm 的单频激光输出。

关键词: 钛宝石激光器; 像散补偿; 单频

中图分类号: O431 **文献标识码:** A

0 引言

钛宝石激光器有较宽的波长调谐范围(600 nm ~ 1200 nm),其中 780 nm 光波恰好对应于铷原子跃迁线 $F_{3/2}-F_{1/2}$,因此可以有效俘获铷原子并将之冷却。同时,利用波长为 780 nm 激光作为泵浦光,通过 OPO 技术还可获得 1560 nm 纠缠源,用于量子保密通讯研究。因此,研制一台满足上诉要求的钛宝石激光器是一件很有意义的工作。

自第一台掺钛宝石激光器于 1982 年问世^[1]以来,因其调谐范围宽、转换效率高、运转方便等突出优点得到了研究者的广泛关注。目前,钛宝石激光器已实现连续、准连续、脉冲、及锁模运转。最早连续钛宝石激光器是 1984 年 P. F. Moulton 在液氮温度下用 Ar⁺ 激光器作为泵浦实现的^[2]。1987 年, P. A. Schulz 等人首次报道了连续波单频环形腔钛宝石激光器的运转^[3]。国内对钛宝石激光器也有一定研究。1993 年,天津大学精密仪器学院采用 10.45W 的 Ar⁺ 激光泵浦,得到平均功率在 1W 以上的准连续输出。

1995 年,山西大学光电所采用四镜环形腔,得到了 183mW、频率稳定性优于 610kHz 的连续稳频输出^[4]。长春光机所用 Ar⁺ 激光泵浦连续掺钛宝石激光器获得 0.5 W 的单频输出,线宽小于 20MHz^[5]。从 1991 年开始, James Harrison 等人用 2 W 全固态绿光激光器泵浦钛宝石得到了 120 mW 的 800 nm 输出,首次实现了钛宝石激光器的全固化运转^[6]。在接下来的十几年间,全固化的钛宝石激光器得到了飞速的发展,coherent 公司已经可以生产出功率达到 1.25 W,线宽小于 100 kHz 的连续单频钛宝石激光器产品(泵浦源为 10 W 全固态绿光激光器)。而在国内,对全固态连续单频钛宝石激光器的研究还未见报道。为了满足冷原子和量子保密通信的研究需要,为其提供稳定的高质量的激光光源,我们课题组在保证钛宝石激光器能够在窄范围调谐下,对其腔型结构等方面开展了深入的研究,以期得到高光束质量,高稳频精度的钛宝石激光器。

本文通过计算选取合适参数,以高功率、高效率激光二极管抽运 LBO 内腔倍频 Nd:YVO₄ 激光

收稿日期: 2008-01-15; 修回日期: 2008-05-19

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(批准号:60608012); 国家基金仪器专项(批准号:60527003)

作者简介: 孙燕(1982-),女,山西省静乐县人,山西大学光电研究所光学专业硕士。

* 苏静 E-mail: jsu_nk@163.com

器作为钛宝石晶体的抽运源,采用“8”字型谐振腔,最终实现单频连续运转,在波长 780 nm 处,获得最高输出功率为 700 mW。

1 腔型设计

1.1 晶体的选择

在钛宝石晶体的生长过程中 Ti_2O_3 中的 Ti^{3+} 在高温熔融的条件下逐步替代 Al_2O_3 中的 Al^{3+} 从而形成六配位的八面体结构。如果钛宝石晶体中 Ti^{3+} 的掺杂浓度过高,会使得 Ti^{3+} 转换为 Ti^{4+} , 从而造成晶体的红外吸收增强, FOM 值降低。另外过高的掺杂浓度还会使得晶体的荧光寿命下降, 即发生荧光淬灭效应, 降低晶体对泵浦光的吸收效率。因此, 实验中我们选用的 Ti^{3+} 掺杂质量浓度为 0.05 %。通过下式的计算可以得到钛宝石晶体对 532 nm 的泵浦光的吸收系数^[7]:

$$\alpha_p = N_A \sigma_{abs} = \frac{N_a d \rho}{M} \sigma_{abs} = 1.05 \text{ cm}^{-1} \quad (1)$$

其中, N_A 为阿佛加德罗常数, d 为 Ti^{3+} 掺杂浓度, ρ 为钛宝石晶体的密度 (3.98 g/cm^3), M 为钛宝石晶体的分子量, σ_{abs} 为 532 nm 处的吸收截面 ($6 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$)

在纵向激光泵浦的情况下, 泵浦光在介质中呈指数衰减, 在某一点上将会出现增益低于损耗, 因此存在介质的最佳长度。在小增益情况下, 钛宝石晶体的最佳长度为:

$$l_{opt} = \frac{2}{\alpha_p} \left(1 - \frac{\pi \omega^2 h c}{\gamma \sigma \lambda p \beta} \right) \quad (2)$$

其中, $\alpha_p = 1.05 \text{ cm}^{-1}$ 为(1)式计算得到的激光晶体对泵浦光的吸收系数, $\omega = 30 \text{ } \mu\text{m}$ 为泵浦光束半径, $\tau = 3.2 \text{ } \mu\text{s}$ 为激光晶体上能级寿命, $\sigma = 3.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ 为激光晶体受激发射截面^[8], $P = 9 \text{ W}$ 为入射泵浦功率, $\beta = 500$ 为激光晶体的品质因子, 将以上参数代入可得晶体最佳长度为:

$$l_{opt} \approx 2 \text{ cm} \quad (3)$$

通过上述分析计算, 我们在实验中选取了掺杂浓度为 0.05 %, 长度为 20 mm 的钛宝石作为激光晶体, 经实验测得它对泵浦光的吸收达到 90% 以上。

1.2 像散补偿

由于实验中采用的泵浦光为线偏光, 偏振度

大于 100: 1, 因此将钛宝石晶体以布儒斯特角切割, 即使不镀 532 nm 增透膜也可以有效的吸收泵浦光的能量。但是, 不可避免的, 布儒斯特角也引入了像散问题。

与晶体表面成布儒斯特角入射的光束, 在晶体中子午面与弧矢面的实际光程分别为:

$$l_{子午} = l/n^3 \quad (4)$$

$$l_{弧矢} = l/n \quad (5)$$

其中, l 为晶体透光长度, $n = 1.76$ 为晶体折射率。

同时, 实验中采用的“8”字型谐振腔中离轴放置的腔镜在子午面和弧矢面的焦距不一样也会带来像散, 若光束与凹面镜光轴夹角为 θ 是, 光束子午面与弧矢面的焦距分别为:

$$f_{子午} = R \cos \theta \quad (6)$$

$$f_{弧矢} = R / \cos \theta \quad (7)$$

其中, R 为凹面镜曲率半径。

由于晶体和腔镜都会产生像散, 因此可以通过合理设计腔型, 计算光束与凹面镜光轴之间的夹角, 使得光束在整个腔中往返一次后, 子午面和弧矢面的光程差趋于零, 从而达到像散补偿的目的, 即满足:

$$R \sin \theta \tan \theta = \frac{(n^2 - 1)L}{n^3} \quad (8)$$

实验中, 我们选用的两凹面腔镜曲率半径均为 $R = 100 \text{ mm}$, 晶体长度为 $l = 20 \text{ mm}$, 易得到光束与凹面镜光轴所成角度 θ 为:

$$\theta \approx 15.8^\circ \quad (9)$$

由图 1 可知, 当 $\theta = 15.8^\circ$ 、总腔长为 1 m、钛宝石谐振腔两凹面镜距晶体两端面距离 d 取 46.3 mm ~ 52 mm 时, 在弧矢面和子午面腰斑几乎重合。

2 实验装置及结果

实验装置如图 2 所示, 抽运源为激光二极管泵浦的内腔倍频 Nd:YVO₄ 单横模绿光激光器, 采用三镜“V”字型折叠腔结构。激光二极管中心波长位于 808 nm, 最大输出功率为 30 W。激光二极管输出的光经两个凸透镜组成的整形聚焦系统后直接入射到 Nd:YVO₄ 晶体, Nd:YVO₄ 晶体前表面镀 1064 nm 高反膜和 808 nm 增透膜, 除起

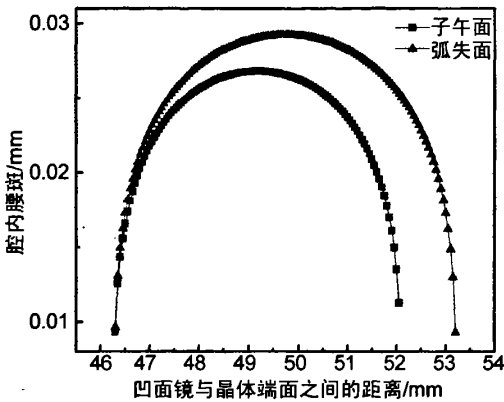


图1 总腔长 $L = 1 \text{ m}$, $\theta = 15.8^\circ$ 时,子午面和弧矢面的腰斑随两凹面镜之间距离变化的示意图

Fig.1 Waist of the sagittal and the tangential planes of the cavity when $L = 1 \text{ m}$ $\theta = 15.8^\circ$

到增益介质的作用外,还充当谐振腔的输入镜,后表面镀 1064 nm 减反膜。Nd:YVO₄ 晶体尺寸为 3 mm × 3 mm × 8 mm,掺杂浓度为 0.3 %。输出耦合镜 M₂ 的曲率半径为 100 mm,凹面镀 532 nm 增透膜、1064 nm 高反膜,平面镀 532 nm 增透膜,折叠角约 6°。腔镜 M₁ 的曲率半径为 50 mm,凹面镀 532 nm、1064 nm 双色高反膜。采用 I 类非临界相位匹配的 LBO 作为倍频晶体,尺寸为 3 mm × 3 mm × 25 mm,两端均镀 1064 nm 和 532 nm 双色减反膜,放置在两凹面镜之间。实验中,在 LD 功率为 30 W 时,532 nm 最大输出功率为 10 W。输出的 532 nm 激光经导光镜、λ/2 波片以及耦合系统后进入钛宝石激光器谐振腔,此时 532 nm 激光功率为 9 W。钛宝石激光器采用“8”字形环形腔结构,输入镜 M₃ 曲率半径 $R = 100 \text{ mm}$,平面镀 532 nm 减反膜,凹面镀 780 nm 高反和 532 nm 增透膜;腔镜 M₄ 曲率半径为 100 mm,凹面镀 780 nm 高反膜;腔镜输 M₅ 为平面镜,镀 780 nm 高反膜;输出镜 M₆ 是平面镜,在 780 nm 处的透射率为 2.6%。钛宝石晶体(由美国 Crystal System 公司提供)位于两凹面镜之间,尺寸为 φ4 mm × 20 mm,布儒斯特角切割,工作温度为 15℃,由自制温控仪实现控温,控温精度为 1%。并在腔内放置由 TGG 晶体和 λ/2 波片构成的光学单向器以实现激光器的单向运转。从激光器输出的光束被一个对 780 nm 高反的平面镜 M₁₁ 分成两束,透射出的激光只有几毫瓦,被耦合进一个 F-P

腔,用来监视激光器的纵模模式;反射的绝大部分 780 nm 激光被送入探头监视输出的功率。

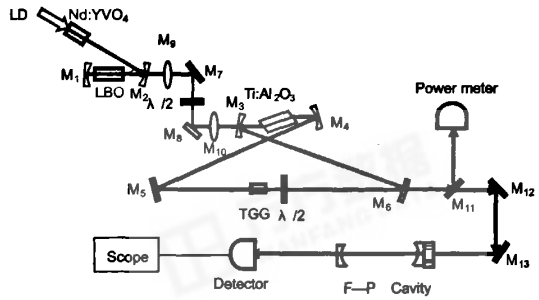


图2 实验装置图

Fig.2 Design of the Ti:sapphire laser cavity

图3为钛宝石激光器的输出功率随 532 nm 抽运功率的变化关系图,钛宝石激光的阈值抽运功率为 5.48 W,在 9 W 绿光泵浦时,780 nm 激光最大输出达到 700 mW,斜效率为 17.5%。当输出功率为 615 mW 时,测得了自由运转 20 min 的功率稳定性曲线(如图 4 所示),其功率波动小于 ±0.5%。同时我们还通过扫描共焦 F-P 腔得到了钛宝石激光器的透射峰曲线,由图 5 可以看出,钛宝石激光器处于单频运转(780 nm)。

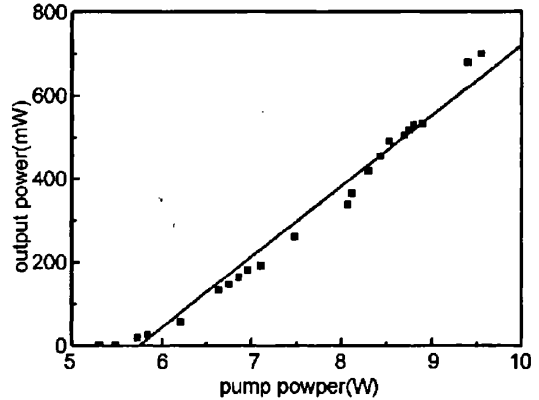


图3 钛宝石激光器输出功率随 532 nm 抽运功率的变化关系图

Fig.3 Variation of output power with 532 nm pump power

3 结论

本文首先通过计算对钛宝石晶体的最佳长度进行了详细讨论,并利用传输矩阵计算得到了像散补偿角度,较好的解决了钛宝石晶体和离轴放置的腔镜带来的像散问题。通过设计“8”字形

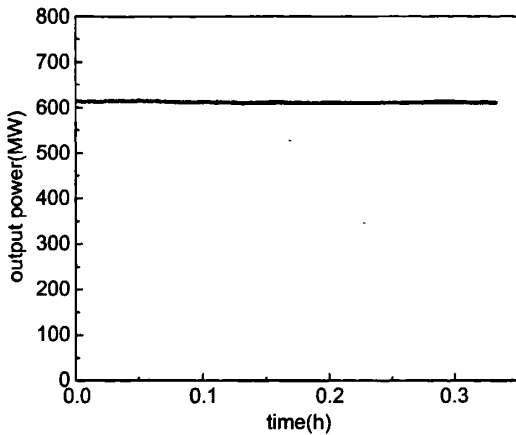


图4 功率稳定性曲线

Fig. 4 the output power stability curve in 20 minutes

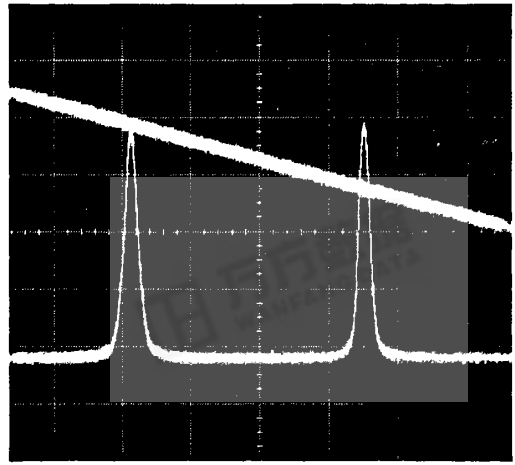


图5 780 nm 激光的单频曲线图

Fig. 5 sing - frequency at 780 nm

谐振腔的腔型结构,自行研制的 LD 泵浦 Nd:YVO₄/LBO 内腔倍频激光器作为抽运源实现了连

续稳定单频运转,最高输出功率达到 700 mW。

参考文献:

- [1] MOULTON P F. New Development of Titanium Sapphire Laser[J]. *Opt News*, 1982, 8: 9.
- [2] MOULTON P F. 1st Annual Conference on Tunable Solid State Laser [M]. La Jolla Calif, 1984.
- [3] SCHULZ P A. Single-frequency Ti:Al₂O₃ ring laser [J]. *IEEE J of QuantElectr*, 1988, QE-24(6): 1039.
- [4] 王军民, 梁晓燕, 李瑞宁, 等. 四镜环形腔连续稳频钛宝石激光器 [J]. *中国激光*, 1994, A21(10): 773-777.
- [5] 绍中兴, 许凤明, 叶子青, 等. 高效率连续波单频环形钛宝石激光器 [J]. *中国激光*, 1997, A24(1): 9-12.
- [6] HARRISON J, et al. Low-threshold, cw, All-solid-state Ti:Al₂O₃ Laser [J]. *Opt lett*, 16(8): 581 1991.
- [7] YUMASHEV K V, et al. Nonlinear Absorption Properties of Co²⁺: MgAl₂O₄ Crystal [J]. *Appl Phys*, B70(179): 2000.
- [8] LACOVARA P, ESTEROWITZ L, et al. Growth, Spectroscopy, and Lasing of Titanium-doped Sapphire [J]. *IEEE J Electron*, QE-21: 1614-1985.

Continuous-wave, Single-frequency, All-solid-state Ti:Al₂O₃ Laser

SUN Yang, LU Dong-hua, SU Jing

(State Key Eaboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi, 030006, China)

Abstract: We designed a continuous wave, sing-frequency, all-solid-state Ti:Al₂O₃ laser system pumped by frequency-doubled Nd:YVO₄ laser with diode pumped laser. In the light of the doping content and the length of the Ti:sapphire, we chose a crystal which is 20mm long and the doping content is d = 0.05wt.%, then considered the compensation astigmatism of the cavity. Then a sing-frequency wave at 780nm with the highest output of 700mW was obtained through a ring resonator when the 532nm pump power is 9W.

Key words: Ti:sapphire laser; compensation astigmatism; single-frequency