

文章编号 1004-924X(2007)05-0674-04

全固态连续波 555 nm 黄-绿光激光器

吕彦飞¹, 张喜和¹, 檀慧明²

(1. 长春理工大学 吉林 长春 130022;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:报道了全固态连续波 555 nm 黄-绿光激光器,黄-绿激光分别由 Nd:YAG 和 Nd:YVO₄ 晶体的 946 nm 和 1342 nm 谱线非线性和频产生,两条谱线各自晶体对应的能级跃迁分别为 $^4F_{3/2}-^4I_{9/2}$ 和 $^4F_{3/2}-^4I_{13/2}$ 。实验中采用复合折叠腔结构,利用 LBO 类临界位相匹配进行腔内和频,当注入到 Nd:YAG 和 Nd:YVO₄ 晶体的泵浦功率分别为 12 W 和 8 W 时,获得 542 mW 的 TEM₀₀ 连续波 555 nm 黄-绿激光输出,4 h 功率稳定度优于 $\pm 3.7\%$ 。实验结果表明,采用 Nd:YAG 和 Nd:YVO₄ 两种激光晶体进行腔内和频是获得黄-绿激光的高效方法,并可以应用到其它两种激光晶体进行腔内非线性

和频,获得更多不同波长的激光输出。

关键词:全固态激光器;黄-绿光激光器;复合腔;和频

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

555 nm all solid-state continuous-wave yellow-green laser

LU Yan-fei¹, ZHANG Xi-he¹, TAN Hui-ming²

(1. Changchun University of Sciences and Technology, Changchun 130022, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: A 555 nm all solid-state continuous-wave yellow-green laser with 946 nm wavelength from $^4F_{3/2}-^4I_{9/2}$ transition in Nd:YAG and 1342 nm wavelength from $^4F_{3/2}-^4I_{13/2}$ transition in Nd:YVO₄ is reported. 555 nm yellow-green laser is obtained using a doubly folded-cavity and type-I critical phase matching LBO crystal intracavity sum frequency mixing by 946 nm and 1342 nm. When the incident pumped powers of Nd:YAG and Nd:YVO₄ crystals are 12 W and 8 W, respectively, the output power of 555 nm yellow-green laser in TEM₀₀ mode is 542 mW, also its power stability in 4 h is better than $\pm 3.7\%$. The experimental results show that the intracavity sum-frequency mixing is an effective method for 555 nm laser and it can be applied to other two laser crystals to obtain more all-solid-state lasers with different wavelengths.

Key words: all-solid-state laser; yellow-green laser; doubly resonant; sum-frequency

收稿日期:2006-12-22;修订日期:2007-02-28.

基金项目:国防科工委基础科研项目(No. A3620060122);国家“863”高科技计划资助项目

1 引言

通过对激光二极管泵浦的掺钕离子激光器腔内倍频,已获得了红、绿、蓝三色激光输出^[1-3],并且在很多领域得到应用,但在 550~650 nm 波段范围内的激光辐射由于缺少相应的基频光输出,还不能通过倍频的方式获得,而处于这一波段的光源在医疗、生物、天文以及显示技术等方面均有广泛的用途,所以寻求这一波段的激光相干辐射,研制 555 nm 黄-绿激光一直是人们研究的热点。由于大多数激光增益介质具有多条跃迁谱线,如果通过谐振腔参数的控制,激光谐振腔内可以获得两个或两个以上的不同波长激光谱线振荡,选择确定切割的非线性晶体,在腔内进行混频,可以获得与激光发射谱线不同的和频或差频波长输出,而腔内和频恰能够产生该波段激光。

激光二极管泵浦腔内和频激光器的理论基础是腔内双波长的产生,从 90 年代初开始,已有人对各种掺钕离子激光增益介质双波长振荡和输出的可能性进行了研究^[4-6],并从理论上给出了双波长振荡条件。Y. F. Chen 首次利用激光二极管泵浦 Nd:YVO₄ 实现双波长运转^[7],目前利用腔内或腔外产生双波长在非线性晶体内和频已经有一些文章报道^[8-11]。本文以 Nd:YVO₄ 和 Nd:YAG 晶体作为增益介质,利用非线性晶体 LBO,通过复合腔在腔内非线性混频获得 555 nm 黄-绿激光。

2 实验方案

全固态连续波 555 nm 黄-绿光激光器实验装置如图 1 所示,采用的是复合折叠腔结构。

泵浦源是最大输出功率为 12 W 和 8 W 的光纤耦合激光二极管阵列,通过温度调解,使泵浦光中心波长与 Nd:YAG 和 Nd:YVO₄ 的中心吸收波长重合,经过准直聚焦系统(传输耦合效率约为 82%)会聚成半径均为 200 μm 的泵浦光斑注入到 Nd:YAG 和 Nd:YVO₄ 晶体中。Nd:YAG 晶体钕离子掺杂原子数分数为 1.0%,尺寸为 4 mm × 3 mm,左端面镀 1 342 nm HR(高反),右端面镀 1 342/808 nm AR(减反);Nd:YVO₄ 晶体钕离子掺杂原子数分数为 0.5%,尺

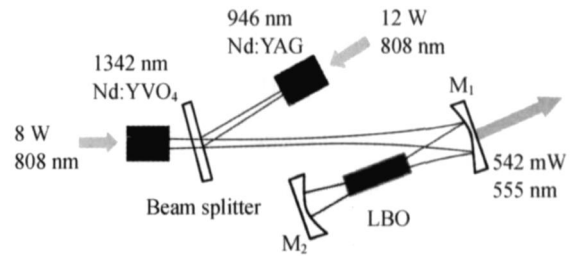


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

寸为 3 mm × 3 mm × 5 mm,右端面镀 946 nm HR,左端面镀 946 nm/808 nm AR;Nd:YAG 晶体中 1 064 nm 发射截面 ($4.6 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$) 是 946 nm 的 ($0.43 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$)^[16] 10.7 倍,因此在制备高反膜时应对 1 064 nm 的反射率小于 5%;在 Nd:YVO₄ 晶体中 1 064 nm 的发射截面 ($25 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$) 是 1 342 nm 发射截面 ($7.6 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$) 的 3.3 倍^[15],在制备高反膜时应对 1 064 nm 的反射率小于 10%;在两激光晶体的侧面裹上一层铝箔安装在紫铜热沉上,通过半导体制冷器进行温度控制。曲率半径为 50 mm 的平凹镜作为输入镜(M1),凹面镀 1 342/946/555 nm AR,平面镀 555 nm AR;曲率半径为 200 mm 的平凹镜作为反射镜(M2),凹面镀 1 342/946/555 nm HR,分束器是由 2 mm 厚的 K9 玻璃制成,一面对 1 342 nm 15° 入射水平偏振入射 AR,另一面对 946 nm 15° 入射水平偏振入射 HR,同时对 1 342 nm 15° 入射水平偏振入射 AR;非线性和频晶体采用 I 类临界位相匹配 LBO,由 SNLO^[14] 软件计算,尺寸为 2 mm × 2 mm × 10 mm 的 LBO 晶体沿 x-y 轴的切割角度为 $\theta = 90^\circ$, $\phi = 7.8^\circ$,由 1 342 nm (o) 和 946 nm (o) 和频产生 555 nm (e)。LBO 晶体的有效非线性系数 $d_{\text{eff}} = 0.837 \text{ pm/V}$,走离角 $\text{walk-off} = 4.81 \text{ mrad}$,LBO 的两端面镀 1 342/946/555 nm 三色增透膜。利用 ABCD 矩阵和稳定腔条件,考虑到 Nd:YAG 和 Nd:YVO₄ 的热效应以及谐振腔的基横模与激光晶体有效增益体积之间的空间匹配,通过数值计算,实验中含 Nd:YAG 和 Nd:YVO₄ 的谐振腔的腔长分别取 89 mm 和 95 mm。

3 实验结果

采用 LBO 晶体进行腔内和频,测量了

555 nm 黄-绿激光输出功率随泵浦功率的变化, 图 2 为 555 nm 黄-绿激光输出功率随注入到 Nd YAG 和 Nd YVO₄ 晶体 808 nm 泵浦功率的变化情况。

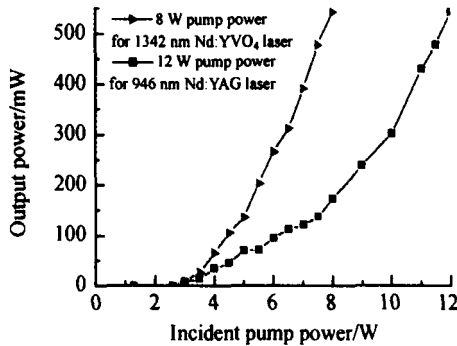


图 2 555 nm 和频激光输出功率随入射泵浦功率变换关系

Fig. 2 SFM 555 nm output power vs incident pump power

从图 2 可看出, 激光器的阈值功率约为 3 W。当注入到 Nd YAG 和 Nd YVO₄ 晶体的泵浦功率分别为 12 W 和 8 W 时, 获得的 555 nm 黄-绿激光输出功率为 542 mW, 并且可以看出在该泵浦功率下, 激光输出功率并未达到饱和, 这就说明如果泵浦功率进一步加大, 激光的输出功率仍会增加。同时可以看出采用 LBO 作为和频晶体, 输出功率随泵浦功率的起伏很小, 这是因为在 LBOI 类和频过程中, 两基频光的偏振态是同一个偏振态方向, 不会发生由于不同偏振模之间耦合引起的模式竞争。

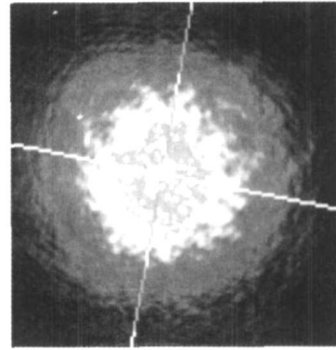


图 3 555 nm 黄-绿激光光束质量

Fig. 3 Beam quality of 555 nm yellow-green laser

在输出功率为 542 mW 时, 采用光束质量分析仪测量激光输出光斑质量如图 3 所示, 该光束的椭圆率为 0.94。

4 结 论

利用 LBOI 类临界位相匹配腔内和频获得了全固态 555 nm 激光器, 以 Nd YVO₄ 和 Nd YAG 晶体作为增益介质, 通过复合腔结构获得 542 mW 连续波基横模黄-绿激光, 其输出功率稳定, 光束质量好。实验结果表明, 采用两种激光晶体 Nd YVO₄ 和 Nd YAG 进行腔内和频是获得 555 nm 黄-绿激光的高效方法, 将该技术推广到其它两种激光晶体进行腔内非线性性和频, 还可以获得更多不同波长和频激光。因此, 本文所利用的腔内和频技术为新波长全固态激光器的发展提供了一个方向。

参考文献:

- [1] SUN Z P, LI R N, BI Y, *et al.*. Generation of 11.5 W coherent red-light by intra-cavity frequency-doubling of a side pumped Nd:YAG laser in a 4 Cm LBO[J]. *Opt. Commun.*, 2004, 241:16-172.
- [2] BAI J T, CHEN G F. Continuous-wave diode-laser end-pumped Nd YVO₄/KTP high-power solid-state green laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2002, 34:333-336.
- [3] PIERROU M, KELLER T. Generation of 740 mW of blue light by intra-cavity frequency doubling with a first-order quasi-phase-matched KTiOPO₄ crystal [J]. *Opt. Lett.*, 1999, 24(4):205-207.
- [4] NADTOCHEEV V E, NANIL O E. Two-wave emission from a CW solid-state YAG:Nd³⁺ laser[J]. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1989, 19(4):444-446.
- [5] SHEN H Y, ZENG R R, ZHOU Y P, *et al.*. Comparison of simultaneous multiple wavelength lasing in various neodymium host crystals at transitions from 4F_{3/2}-4I_{11/2} and 4F_{3/2}-4I_{13/2}[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, 56(20):1937-1938.

- [6] SHEN H Y. Oscillation condition of simultaneous multiple wavelength lasing[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 1990, 7(4): 174-176.
- [7] CHEN Y F. CW dual-wavelength operation of a diode-end-pumped Nd:YVO₄ laser[J]. *Appl. Phys.*, 2000, B70: 475-478.
- [8] HE J L, DU J, SUN J, *et al.*. High efficiency single- and dual-wavelength Nd:GdVO₄ lasers pumped by a fiber-coupled diode[J]. *Appl. Phys.*, 2004, B79: 301-304.
- [9] LI P X, LI D H, ZHANG Z G. Simultaneous dual-wavelength continuous wave laser operation at 1.064 μm and 0.946 μm in Nd:YAG and their frequency doubling[J]. *Opt. Commun.*, 2004, 235: 169-174.
- [10] 毕勇,孙志培,张瑛,等. 全固态和频 589 nm Nd:YAG激光器[J]. 中国激光, 2003, 30(5): 440-440.
BI Y, SUN ZH P, ZHANG Y, *et al.*. All-solid state intra-cavity sum-frequency mixing 589 nm Laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, 30(5): 440-440.
- [11] 吕彦飞,檀慧明,钱龙生. 全固态 589 nm 复合腔连续波和频激光器[J]. 光学精密工程, 2005, 13(3): 260-264.
LU Y F, TAN H M, QIAN L SH. All-solid-state continuous-wave doubly resonant all intracavity sum-frequency laser at 589 nm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(3): 260-264.
- [12] 檀慧明,高兰兰,吕彦飞. 激光二极管泵浦 KTP 腔内和频激光器及其噪声的分析[J]. 光学精密工程, 2004, 12(5): 459-464.
TAN H M, GAO L L, LU Y F. Noise characteristics of laser diode pumped solid-state laser by intra-cavity sum-frequency of KTP phase matching[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(5): 459-464.
- [13] LU Y F, ZHANG X H, YAO Z H. 1.1 W continuous-wave orange-yellow light Nd:YVO₄ laser with intracavity sum-frequency generation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 408-411.
- [14] AULL B F, JENSSEN H P. Vibronic interactions Nd:YAG resulting in Nonreciprocity of absorption and stimulated emission cross[J]. *IEEE J. of Quantum Electron*, 1982, 18(5): 925-930.
- [15] CHEN Y F. CW dual-wavelength operation of a diode-end-pumped Nd:YVO₄ laser[J]. *Appl. Phys.*, 2000, B(70): 475-478.
- [16] SNLO. Free software for modeling nonlinear frequency conversion processes in nonlinear crystals[OL/EB]. <http://www.sandia.gov/imrl/X1118/xtal.htm>.

作者简介:吕彦飞(1976-),男,博士,硕士生导师,主要从事光学设计、大功率固态激光器、热容激光器、激光毁伤机理及非线性光学频率变换技术等方面的研究。E-mail:custlaser@163.com