

激光器件与元件 ·

KTP 类临界相位匹配腔内和频 593.5nm 激光器

吕彦飞, 檀慧明, 任旭升, 钱龙生

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130022)

提要:报道了一种光纤耦合激光二极管阵列(LDA)泵浦 Nd:YVO₄ 晶体、类临界相位匹配 KTP、腔内和频连续波输出的全固态黄光激光器, 输出波长为 593.5nm 的黄激光是由 Nd:YVO₄ 晶体的 1064nm 和 1342nm 谱线和频产生。采用一个线性平坦腔结构, 在 8W 泵浦功率下, 获得了最大功率为 210mW 连续波 TEM₀₀ 的低噪声黄激光输出, 光光转换效率为 2.6%, 光束质量因子 $M^2 < 1.2$ 。

关键词: LDA 泵浦; KTP 晶体; 和频; 黄光激光器

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 0253-2743(2005)02-0003-02

KTP type - critical phase - matched intracavity sum - frequency mixing 593.5nm laser

LU Yan - fei, TAN Hui - ming, REN Xu - sheng, QIAN Long - sheng

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

Abstract: A fiber - coupled laser diode array pumped Nd:YVO₄ crystal, type - critical phase matching KTP crystal, intra - cavity sum frequency mixing by 1064nm and 1342nm, yellow laser at 593.5nm is reported in this paper. Using one plan - curved cavity, with the injection pumped power of 8W, TEM₀₀ mode, yellow, low noise, continuous wave laser at 593.5nm of 210mW is obtained at last, the optical conversion efficiency is 2.6%, and its M^2 factor is less than 1.2.

Key words: LDA pumped; PTP; sum - frequency mixing; yellow laser

1 引言

LDA 泵浦全固体激光器通过腔内倍频技术可以得到红、绿和蓝激光, 此类激光器具有体积小、重量轻、寿命长、效率高等优点。然而, 在 550 - 650nm 波段目前尚无相应的基频光, 因而无法利用上述倍频技术, 不过非线性光学和频技术是获得这个波段的有效方法。Nd:YVO₄ 晶体作为激光增益介质除了可以产生⁴F_{3/2} - ⁴I_{11/2} 的 1064nm 波长的发射谱线, 还可获得⁴F_{3/2} - ⁴I_{13/2} 的 1342nm 波长发射谱线^[1,2], 其中 1064nm 与 1342nm 的发射截面分别是 $25 \times 10^{-19} \text{cm}^2$ 和 $7.6 \times 10^{-19} \text{cm}^2$, 比值约为 3^[3], 由于 Nd:YVO₄ 晶体中宽的吸收带和在⁴F_{3/2} - ⁴I_{11/2} 及⁴F_{3/2} - ⁴I_{13/2} 大的受激发射截面两方面的原因, 因而 Nd:YVO₄ 晶体成为双波长激发的理想材料。

从 90 年代初开始, 有些作者已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^[4-5], 并从理论上给出了双波长振荡条件。目前利用双波长在非线性晶体内和频产生不同波长的研究主要有腔内和频^[6-7]和腔外和频^[8-9]两种方法, 而腔内和频的研究主要有 H. M. Kretschman 等采用复合腔结构对 Nd:YAP 的 1080nm 谱线和 Nd:YAG 的 1444nm 谱线腔内和频, 获得了 212mW 的 618nm 连续波激光输出^[10], Yung - Fu Chen 等采用三镜谐振腔结构, 研究了激光二极管抽运 Nd:YVO₄ 晶体的 Q 开关脉冲激光器^[11], 获得了 340mW 的 593.5nm 脉冲激光输出, 中国科学院物理研究所的毕勇等采取复合腔结构对 Nd:YAG 的 1319nm 和 1064nm 谱线腔内和频, 获得了 510mW 的 589nm 连续波激光输出^[12]。腔外和频的研究主要有 Joseph D. Vance 等采用复合腔结构对 Nd:YAG 的 1319nm 和 1064nm 谱线腔外和频, 获得了 400mW 的 589nm 连续波激光输出^[13], Y. F. Chen 等采用复合腔结构对 Nd:YVO₄ 的 1342nm 和 1064nm 谱线腔外和频, 获得了 78mW 的 593.5nm 连续波激光^[8]。

以上和频激光器结构复杂, 调节困难, 我们利用一个线性平坦腔结构, 在 8W 泵浦功率时获得了 210mW 波长为 593.5nm 的连续黄激光输出, 该和频激光器可在较宽的温度范围内稳定工作, 且光束质量好。

2 和频晶体的选择

选择和频晶体时, 晶体的匹配类型、匹配角度、有效非线性系数、走离角、接受角和接受带宽等参数是必须要考虑的, 它们一方面决定着对和频晶体的切割角度的选取, 另一方面也关联着激光谐振腔的设计。在 LDA 泵浦的 593.5nm 固体激光器中对 KTP、LBO 和 BBO 的角度匹配和频参数进行了计算。表 1 列出了典型的和频参数值。

表 1 不同非线性晶体 1064nm 和 1342nm 临界相位匹配和频的典型参数

和频晶体参数	KTP	LBO	BBO
匹配类型	Type -	Type -	Type -
转换方式	1064(o) + 1342(e) - 593.5(o)	1064(o) + 1342(o) - 593.5(e)	1064(o) + 1342(o) - 593.5(e)
走离角 ρ (mrad)	20.8	1.58	52.6
有效非线性系数 d_{eff} (pm/V)	3.41	0.84	2.01
最大作用长度 L_{max} (mm)	11.2	146.8	4.41
接受角 (mrad/cm)	3.55	52.94	1.55
接受带宽 $(\text{cm}^{-1}/\text{cm})$	58.56	182.94	66.19

从表 1 中可以看出 KTP 的有效非线性系数 d_{eff} 最大; LBO 的走离角 ρ 最小, 最大作用长度 L_{max} 最长。

由文献 [14] 可知 593.5nm 黄光的光功率密度可用下式表示

$$I_3 = \frac{2\pi^2 L^2 \chi_{\text{eff}}^2}{n_1 n_2 n_3 \lambda_3^2 c \epsilon_0} I_1 I_2 \frac{\sin^2(\Delta k \cdot L/2)}{(\Delta k \cdot L/2)^2} \quad (1)$$

其中 L 为和频晶体长度; χ_{eff} 为二阶有效非线性极化系数; I_1 、 I_2 和 I_3 分别为对应波长 1064nm、1342nm 和 593.5nm 的光功率密度; n_1 、 n_2 和 n_3 分别为晶体中相应波长的折射率; Δk 为相位匹配系数且 $\Delta k = k_3 - k_2 - k_1$ 。

和频情况下, 有效非线性系数 d_{eff} 可以代替二阶有效非线性极化系数 χ_{eff} , 可见激光器的和频光功率密度与有效非线性系数 d_{eff} 与晶体长度 L 的乘积的平方 $(d_{\text{eff}} \times L)^2$ 成正比。KTP、LBO 和 BBO 的长度分别取 5mm、10mm 和 3mm, 经计算得到 KTP 的 $(d_{\text{eff}} \times L)^2$ 值是 LBO 的 4 倍、BBO 的 22 倍, 所以选择 KTP 更有利于提高输出功率, 当 KTP 长度取 5mm (小于最大作用长度 1/2) 时输出光束质量仍然很好, 并且 KTP 容许温度

收稿日期: 2004 - 05 - 29

基金项目: 国家“863”高科技计划资助项目 (No. 2002AA311140)

作者简介: 吕彦飞, (1976 -), 男, 黑龙江人, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士生, 研究方向为大功率高性能全固态和频激光器及非线性频率变换技术。

范围宽,不潮解,热抗冲击性能好,机械强度适中。虽然增加 LBO 的长度也能够补偿相对于 KTP 有效非线性系数 d_{eff} 小的缺点,但是考虑到腔型设计及非线性晶体吸收等原因,和频晶体不可能取得很长。

由于 KTP 的走离角很大,在腔内光斑尺寸很小的情况下,由走离角决定非线性晶体最大作用长度 L_{max} 的公式^[15]

$$L_{\text{max}} = 1.16\omega/\rho \quad (2)$$

其中 ω 为基频光束腰半径, ρ 非线性晶体的走离角。

式(2)表明当 ω 减小时 L_{max} 就会随之减小,这时与 LBO 相比就没有任何优点可言,因为 LBO 的走离角很小使其最大作用长度 L_{max} 的值很大,所以只有在腔内束腰较大时用 KTP 作为和频晶体才优于 LBO,反之,腔内束腰较小时(如三镜折叠腔)LBO 作为和频晶体要优于 KTP。

3 实验装置与结果

实验装置如图 1 所示。泵浦源为最大输出功率为 8W 的光纤耦合半导体激光器阵列,通过温度调节,使泵浦光中心波长与 Nd:YVO₄ 中心吸收峰 808.9nm 重合,经准直聚焦系统(传输耦合效率约为 82%)会聚成半径为 200 μ m 的泵浦光斑注入到 Nd:YVO₄ 中,Nd:YVO₄ 晶体的掺杂浓度为 0.5atm%,通过长度为 5mm。

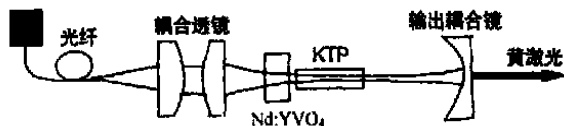


图 1 593.5nm 内腔和频激光器结构示意图

Nd:YVO₄ 的左端面镀 808nm 增透膜和 1064nm 及 1342nm 高反膜作为一个腔镜,右端面镀 1064nm 及 1342nm 增透膜,侧面裹上一层铝箔安装在紫铜热沉上通过半导体制冷进行温控。输出耦合镜的凹面曲率半径为 200mm,镀 1342nm 和 1064nm 高反膜和 593.5nm 增透膜(1342nm 高反膜优先考虑),平面镀 593.5nm 增透膜。和频晶体 KTP 采用类临界相位匹配,尺寸为 2 × 2 × 5mm³,两端面均镀 1342/1064/593.5nm 增透膜,谐振腔长约 50mm。

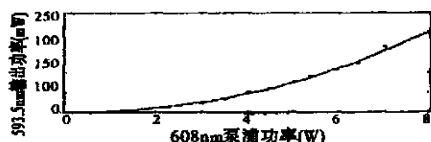


图 2 593.5nm 和频激光输出功率随入射泵浦功率变换关系

采用一个平凹镜谐振腔结构时 1342nm 基频光比 1064nm 基频光在增益介质中的光腰半径大一些,因此仅从光腰一个因素考虑,1342nm 基频光的增益要比 1064nm 基频光的增益要大,如果在设计平凹镜的双波长高反膜时,选择 1342nm 优先,1064nm 其次,控制 1342nm 的反射率高于 1064nm 的反射率,则又可以增强 1342nm 基频光的增益。综合以上两个方面考虑,完全可以在一个平凹镜的情况下弥补 1342nm 基频光相对 1064nm 基频光发射截面小的缺点,从而使 1064nm 和 1342nm 的增益达到相近。这样不仅缩小了谐振腔的体积,同时增加了激光器的稳定性,也降低了激光器的调节难度,因此在和频激光器结构中具有一定的实用性。

图 2 是 593.5nm 黄激光输出功率随入射到 Nd:YVO₄ 内 808nm 泵浦功率的变化情况。从图中可以看出,当入射至 Nd:YVO₄ 上的泵浦功率为 8W 时,获得的输出功率为 210mW,且没有任何的饱和现象发生。图 3 是当输出功率为 210mW 时用示波器检测 593.5nm 激光的噪声特性,表明 593.5nm 激光输出噪声低。图 4 是用照相机拍摄 5 米处激光光斑的照片。

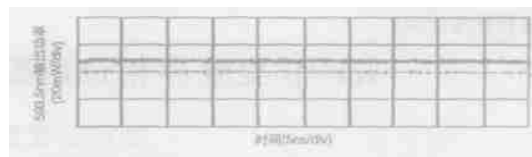


图 3 当泵浦功率为 8W 时 593.5nm 噪声输出情况



图 4 5 米处黄激光光斑照片

4 结论

从对适合产品化角度,采用类临界相位匹配腔内和频方式研究了在一个线性平凹腔 Nd:YVO₄/KTP 结构的优化设计,初步取得了 593.5nm 黄激光 210mW 输出。目前,为了进一步提高黄激光的输出功率,我们正采用三镜折叠腔结构、类临界相位匹配 LBO 进行腔内和频的研究。

参考文献

- [1] A. Agnesi, G. C. Reali, P. G. Gobbi. 430 - mW Single - Transverse - Mode Diode - pumped Nd:YVO₄ laser at 671nm [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1998, 34(7): 1297 - 1300.
- [2] A. W. Tucker, M. Birnbaum, C. L. Fincher. Stimulated emission cross section at 1064 and 1342nm in Nd:YVO₄ [J]. J. Appl. Phys., 1977, 48(12): 4907 - 4911.
- [3] Y. F. Chen. CW dual - wavelength operation of a diode - end - pumped Nd:YVO₄ laser [J]. J. Appl. Phys., 2000, B70(2): 475 - 478.
- [4] V. E. Nadocheev, O. E. Nanil. Two - wave emission from a cw solid - state AG:Nd³⁺ laser [J]. Sov. J. Quantum Electron, 1989, 19(4): 444 - 446.
- [5] H. Y. Shen, R. R. Zeng, Y. P. Zhou 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 Hongyuan. Oscillation condition of simultaneous multiple wavelength lasing [J]. Chinese Physics Letters, 1990, 7(4): 174 - 176.
- [7] George A. Henderson. A computational model of a dual - wavelength solid - state laser [J]. J. Appl. Phys., 1990, 68(11): 5451 - 5455.
- [8] Y. F. Chen. Efficient generation of continuous - wave yellow light by single - pass sum - frequency mixing of a diode - pumped Nd:YVO₄ dual - wavelength laser with periodically poled lithium niobate [J]. Opt. Lett., 2002, 27(20): 1809 - 1811.
- [9] D. Vance, C. Y. She, H. Moosmuller. Continuous - wave, all - solid - state, single - frequency 400 - mW source at 589nm based on doubly resonant sum - frequency mixing in a monolithic lithiumniobate resonator [J]. Appl. Opt., 1998, 37(21): 4891 - 4896.
- [10] H. M. Kretschmann, F. Heine et al. All solid - state continuous - wave doubly resonant all - intracavity sum - frequency mixer [J]. Opt. Lett., 1997, 22(19): 1661 - 1663.
- [11] Yung - Fu Chen. Diode - pumped Q - switched Nd:YVO₄ yellow laser with intracavity sum - frequency mixing [J]. Opt. Lett., 2002, 27(6): 397 - 399.
- [12] 毕勇, 孙志培, 张瑛等. 全固态和频 589nm Nd:YAG 激光器 [J]. 中国激光, 2003, 30(5): 440 - 440.
- [13] Joseph D. Vance, Chiao - yao Sen, Hans Moosmuller. Continuous - wave all - solid - state, single - frequency 400 - mW source at 589nm based on doubly - resonant sum - frequency mixing in a monolithic lithium [J]. Appl. Opt., 1998, 37(21): 4891 - 4896.
- [14] 姚建铨. 非线性光学频率变换及激光调谐技术 [M]. 北京: 科学出版社, 1995, 72.
- [15] Zondy J J, Abed M. Khodja S. Twin - crystal walk - off - compensated type - second - harmonic generation: single - pass and cavity - enhanced experiment in KTP [J]. J. Opt. Soc. Am., 1994, 11(12): 2368 - 2370.