

文章编号: 0258-7025(2005)06-0729-05

全固态 593 nm 复合腔连续波和频激光器

吕彦飞, 檀慧明, 缪同群, 钱龙生

(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 报道了一种新型复合腔结构和频(SFM)激光器,用两个激光二极管阵列(LDA)经过光纤耦合分别单独端面抽运 Nd:YVO₄晶体,其中两激光晶体所选择的能级跃迁分别为⁴F_{3/2}→⁴I_{11/2}和⁴F_{3/2}→⁴I_{13/2},其对应激光跃迁波长分别为1064 nm和1342 nm,两基频激光束分别在两个子谐振腔中振荡,在其交叠区利用KTP II类临界相位匹配(CPM)进行腔内和频,获得了593 nm的和频激光。通过对激光晶体热效应的分析,设计了热不敏感腔,获得了520 mW连续波(CW)TEM₀₀黄激光输出。光束质量因子M²<1.2,激光输出为低噪声输出,24 h功率不稳定性小于±2%。

关键词 激光技术; 黄光激光器; 激光二极管抽运; 和频; KTP晶体; Nd:YVO₄晶体
中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

All-Solid-State CW Doubly Resonant All-Intracavity Sum-Frequency Mixing 593 nm Laser

LÜ Yan-fei, TAN Hui-ming, MIAO Tong-qun, QIAN Long-sheng

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract A new resonator which designed for doubly resonant continuous-wave intracavity sum-frequency mixing (SFM) laser is reported. Two Nd:YVO₄ were pumped by two laser diode array (LDA) which coupled by optical fiber respectively, ⁴F_{3/2}→⁴I_{11/2} transition is chosen in one Nd:YVO₄ and ⁴F_{3/2}→⁴I_{13/2} transition is chosen in another one, 1064 nm wavelength is gotten from ⁴F_{3/2}→⁴I_{11/2} transition and 1342 nm wavelength is gotten from ⁴F_{3/2}→⁴I_{13/2} transition, two laser beam oscillated in two sub-cavity. Considering thermal effect of laser crystal, a thermal insensitive cavity is designed, and type II critical phase match (CPM) KTiOPO₄ (KTP) is used to generate 593 nm SFM. 520 mW continuous-wave TEM₀₀ yellow laser was obtained. The output beam is low noise, its M² factor is less than 1.2, and the power instability is less than ±2% in 24 hours.

Key words laser technique; yellow laser; LD pumped; sum-frequency mixing; KTP crystal; Nd:YVO₄ crystal

1 引 言

激光二极管阵列(LDA)抽运的全固态激光器具有体积小、寿命长、结构紧凑、效率高、光束质量好和性能稳定等优点,有广泛的应用前景。目前,激光二极管阵列抽运的腔内混频激光器主要应用是腔内倍频激光器,已经有大量文章对激光二极管阵列抽运腔内倍频红、绿和蓝激光器进行研究^[1~6],并且在很多领域得到了广泛的应用。但是在590~620 nm

的激光束由于没有相应基频光,而无法通过倍频技术得到。由于该波段激光在显示、医疗和各种野外作业中,特别是有雾气情况下的大地测量及各种准直场合,有特殊的用途,因此对该波段激光器的研究也越来越受到重视。如果在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,在腔内混频,可以获得与激光发射谱线不同的和频(SFM)或差频波长输出,而腔

收稿日期: 2004-04-28; 收到修改稿日期: 2004-06-28

基金项目: 国家 863 计划(2002AA311140)资助项目。

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研究生,主要从事大功率高性能全固态和频激光器及非线性频率变换技术的研究。E-mail: lvyanfei1976@163.com

内和频恰能够产生 590~620 nm 波段激光,因此具有较高的实用价值。

从 20 世纪 90 年代初开始,有些作者已对各种掺钕离子激光增益介质多波长振荡和输出的可能性进行了研究^[7,8],并从理论上给出了多波长振荡条件。目前利用多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^[9,10]和外腔和频^[11,12]方法,但腔内和频的研究很少^[13,14]。作为激光增益介质的 Nd:YVO₄ 晶体,除了可以产生⁴F_{3/2}→⁴I_{11/2}能级跃迁外,还可以产生⁴F_{3/2}→⁴I_{13/2}能级跃迁,其对应激光跃迁波长分别为 1064 nm 和 1342 nm,它们的发射截面分别是 25×10⁻¹⁹ cm²和 7.6×10⁻¹⁹ cm²^[15]。

本文报道了采用两独立的抽运源分别单独抽运

Nd:YVO₄,通过复合腔结构,使两基频光获得独立增益,通过优化谐振腔使两基频光交叠充分,可以分别调节两激光二极管阵列的电流使复合腔的两个子谐振腔中的基频光增益达到相近,在激光束的交叠区通过非线性晶体 KTP II 类临界相位匹配(CPM)进行内腔和频,从而获得更高的和频效率。在两抽运源输出功率分别为 10 W 和 12 W 的条件下,获得了 520 mW,593 nm 连续波激光输出。

2 和频晶体的选择

当腔内基频光斑半径取 200 μm 时,在激光二极管阵列抽运 593 nm 固体激光器中可以选用的和频晶体及临界相位匹配的主要参量如表 1 所示。

表 1 不同非线性晶体 1064 nm 和 1342 nm 临界相位匹配和频的主要参量

Table 1 Parameters of 1064 nm and 1342 nm critical phase-matching sum-frequency mixing for different nonlinear crystals

Parameters	KTP	LBO	BBO
Critical phase-matching	Type-II	Type-I	Type-I
Convert mode /mm	1064(o)+1342(e)-593(o)	1064(o)+1342(o)-593(e)	1064(o)+1342(o)-593(e)
Walk-off angle ρ /mrad	20.8	1.58	52.6
Nonlinear-coefficient d _{eff} /(pm/V)	3.41	0.84	2.01
Maximum working length L _{max} /mm	11.2	146.8	4.41
Crystal length l /mm	5	10	3
(d _{eff} ×L) ² /[pm/(V·mm)] ²	291	71	13.2
Phase matching angle (θ,φ) / (°)	78, 0	90, 2.6	21.3

从表 1 中可以看出 KTP 的有效非线性系数 d_{eff} 最大;BBO 的最大作用长度 L_{max} 最短,走离角 ρ 最大;LBO 的走离角 ρ 最小,最大作用长度 L_{max} 最长。由式^[16]

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

可以得出激光器的和频光功率密度与有效非线性系数 d_{eff} 和非线性和频晶体长度 L 的乘积(d_{eff}×L)的平方成正比。其中 L 为和频晶体长度;χ_{eff} 为二阶有效非线性极化系数;I₁, I₂ 和 I₃ 是波长分别为 1064 nm, 1342 nm 和 593 nm 光束的功率密度;n₁, n₂ 和 n₃ 分别为对应光束在晶体中的折射率;Δk 为相位匹配系数且 Δk=k₃-k₂-k₁。

把表 1 的(d_{eff}×L)² 值进行比较,在最大作用长度内 KTP, LBO 和 BBO 分别取 5 mm, 10 mm 和 3 mm,从表中可以看出 KTP 的(d_{eff}×L)² 值是 LBO 的 4 倍,BBO 的 22 倍,所以选择 KTP 更有利于提高功率,虽然 KTP 的走离角很大,但在取 5 mm(小于最大作用长度 1/2)时,输出光斑质量仍然

很好,并且 KTP 容许温度大,不潮解,热抗冲击性能好,机械强度适中。若使用 LBO 和频来提高功率有两种途径:一是增加 LBO 的长度,但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;二是减小基频光束腰,因为减小基频光束腰会增加腔内经过 LBO 的基频光功率密度,从而提高和频效率,但在大功率抽运条件下热效应明显,为减小热效应,一般抽运光斑要取得大一些,考虑到模式匹配,腔内束腰也会很大。由于 BBO 的走离角 ρ 很大,导致最大作用长度 L_{max} 很小,并且 BBO 容易潮解,所以作为 593 nm 激光器的非线性和频晶体 BBO 相对于 KTP 和 LBO 没有任何优势而言。

3 激光晶体的热透镜效应及其对腔参量的影响

在高功率激光二极管阵列端面抽运固体激光器中,激光晶体的热效应是不能获得高效率、高功率输出的一个重要因素,即使在中低功率情况下,

Nd:YVO₄的热透镜效应仍很明显。热效应的影响主要为热透镜效应和热致衍射损耗。本文仅考虑热透镜效应的影响,因为热透镜效应会极大地改变腔内模式,甚至使激光器偏离出稳定工作状态。在较大的抽运功率变化范围内,设计腔内模式对热透镜效应不敏感的谐振腔型,是获得稳定高功率激光输出的必要条件。

对于连续端面抽运的情况,在激光振荡束腰远小于晶体尺寸的情况下,可将方块晶体等效成圆柱状。由于激光晶体侧面由铜箔包裹,外面有紫铜夹具,并由半导体散热,可以看作侧面导热且表面温度稳定在某一温度。在这些近似下同时忽略热应力和变形,可由稳态热传导方程,解出近似的等效热致屈光度 D ^[17]

$$D = \frac{1}{f_{th}} = \frac{\xi P_{abs}}{4\pi K_c \omega_p^2} \left[\frac{dn_0}{dT} + (n_0 - 1)\alpha_T \right], \quad (2)$$

其中 f_{th} 为热透镜焦距, ξ 为热负荷比, P_{abs} 为吸收的抽运功率, K_c 为热导率, ω_p 为平均抽运光斑半径, n_0 为环境温度下的折射率, dn_0/dT 为折射率温度系数, α_T 为热膨胀系数。实验中所用 Nd:YVO₄ 的有关参量是: $\xi = 0.4$, $K_c = 0.0523 \text{ W}/(\text{K} \cdot \text{cm})$, $\omega_p = 200 \mu\text{m}$, $n_0 = 2.165$, $\alpha_T = 4.43 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $dn_0/dT = 3.0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。

由于忽略热应力和形变的影响,实际的热焦距比(2)式求的短一些,也即热致屈光度 D 要更大一些。从(2)式可以看出抽运光斑尺寸对热焦距的影响很大。图1为在其他条件相同,抽运光斑尺寸不同时,热致屈光度随吸收抽运功率的变化关系。从图1可以看出同样在吸收抽运功率为 10 W,抽运光斑半径 $\omega_p = 150 \mu\text{m}$ 时, $D = 20 \text{ m}^{-1}$;而在抽运光斑半径 $\omega_p = 250 \mu\text{m}$ 时, $D = 7 \text{ m}^{-1}$ 。所以适当加大抽运光斑尺寸,可以有效地减小热透镜效应的影响。

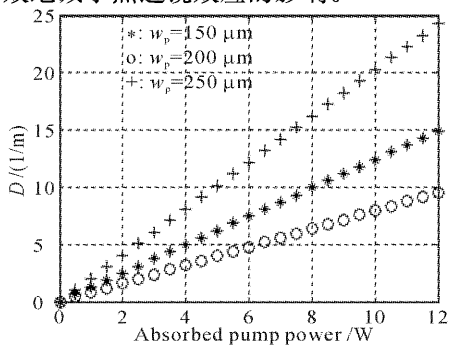


图1 抽运光斑尺寸不同时,热致屈光度随吸收抽运功率的变换关系

Fig.1 Thermally induced dioptr versus absorbed pump power under different pump side

由于在实验中激光增益介质前表面直接镀膜作为谐振腔的一面端镜,在一定的抽运功率下,可根据(2)式求出其热焦距,所以可将激光晶体等效成一薄透镜。由 $ABCD$ 矩阵可以计算出激光增益介质处的光斑半径

$$\omega_1^2 = \frac{\lambda}{\pi} \left[\frac{4L(\rho_2 - L)}{(2 - DL)(2 + D\rho_2 - DL)} \right]^{1/2}, \quad (3)$$

λ 为基频光波长, L 为腔长, ρ_2 为输出镜曲率半径。

图2为 λ 取 1064 nm 时,在不同的腔长和热致屈光度下,激光增益介质处的光斑半径的变化情况。从图中可以看出,在 L 取 64 mm 时,激光增益介质处的光斑大小随热致屈光度的增加变化最小。用同样的方法可以得出取 1342 nm 时,在 L 为 42 mm 时,激光增益介质处的光斑大小随热致屈光度的增加变化最小。这为通过合理的选择腔长以得到热不灵敏腔提供了理论依据。

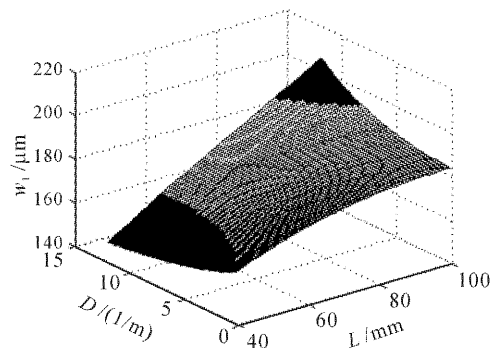


图2 不同腔长时,激光晶体光斑随热致屈光度的变化关系

Fig.2 Spot in the laser material as a function of cavity length and thermally induced dioptr

4 实验装置

通过计算机辅助优化设计,实验装置如图3所示。抽运源为光纤耦合输出激光二极管阵列,在室温下输出中心波长为 806.6 nm;经准直聚焦系统(传输耦合效率约为 80%)会聚成半径 200 μm 的抽

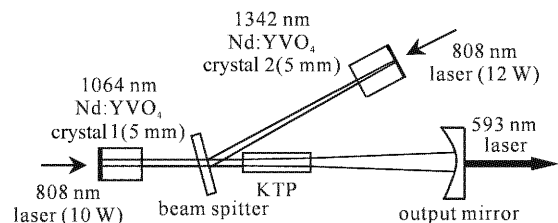


图3 全固态 593 nm 黄光激光器的实验装置

Fig.3 Setup of 593 nm diode pumped all-solid-state yellow laser

运光斑,注入到 Nd:YVO₄ 工作物质中,Nd:YVO₄ 晶体 1 与 Nd:YVO₄ 晶体 2 均采用 a 轴切割,掺杂原子数分数为 0.5%,尺寸为 3 mm×3 mm×5 mm,其中 Nd:YVO₄ 晶体 1 左端镀 1064 nm 高反膜、808 nm 增透双色膜作为一个腔镜,右端镀 1064 nm 增透膜;Nd:YVO₄ 晶体 2 右端镀 1342 nm 高反膜,808 nm 增透双色膜作为另一个腔的腔镜,左端镀 1342 nm 增透膜;曲率半径为 200 mm 的平凹镜作为两谐振腔的共用输出镜,凹面镀 1342 nm/1064 nm 高反膜和 593 nm 增透膜,平面镀 593 nm 增透膜;分束镜左端镀 1064 nm 增透膜,右端镀 1342 nm 高反膜和 1064 nm 增透膜;非线性和频晶体 KTP 采用 II 类临界相位匹配角度切割,尺寸为 2 mm×2 mm×5 mm,两端面均镀 1342 nm/1064 nm/593 nm 增透膜。

考虑热透镜情况,根据 ABCD 矩阵可以计算出含 Nd:YVO₄ 晶体 1 及 Nd:YVO₄ 晶体 2 的腔长分别为 64 mm 和 42 mm,这时模式匹配以及两光束交叠最佳,并且激光晶体内基频光斑半径变化对热效应不敏感。

对激光二极管阵列,Nd:YVO₄ 和 KTP 用半导体致冷器进行严格的温控。调节致冷器电流,使激光二极管阵列的发光波长与 Nd:YVO₄ 的中心吸收波长重合,可最大限度地吸收利用抽运光。Nd:YVO₄ 晶体 1,Nd:YVO₄ 晶体 2 和 KTP 共用一个致冷器,减小 Nd:YVO₄ 的热效应。

5 实验结果

图 4 是 593 nm 黄激光输出功率随入射到 Nd:YVO₄ 晶体 1 和 Nd:YVO₄ 晶体 2 的 808 nm 抽运功率变化情况。从图 4 可以看出,激光器的阈值功率约为 0.7 W。当入射至 Nd:YVO₄ 晶体 1 和 Nd:YVO₄

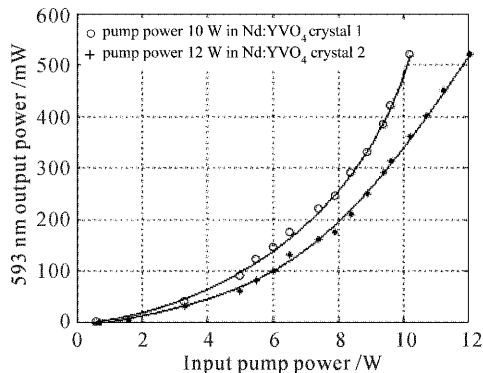


图 4 593 nm 和频光输出功率随入射抽运光功率变化关系
Fig. 4 Sum-frequency mixing 593 nm output power versus input pump power

晶体 2 上的抽运功率分别为 10 W 和 12 W 时,获得的 593 nm 黄激光输出功率为 520 mW,图 4 还表明此时和频光输出功率未有任何的饱和现象发生。

图 5 是用示波器检测 593 nm 输出功率为 520 mW 时的噪声特性,可以看到 593 nm 激光输出为低噪声输出。图 6 是用美国 Photon 公司生产的光束轮廓仪记录激光远场光斑的照片,可以看出激光光斑的椭圆度接近 1。

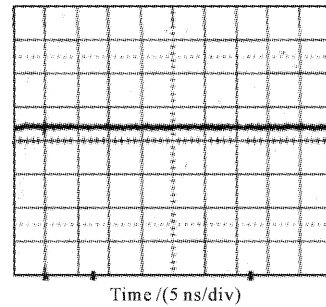


图 5 593 nm 低噪声输出功率情况

Fig. 5 593 nm output power under low-noise operation

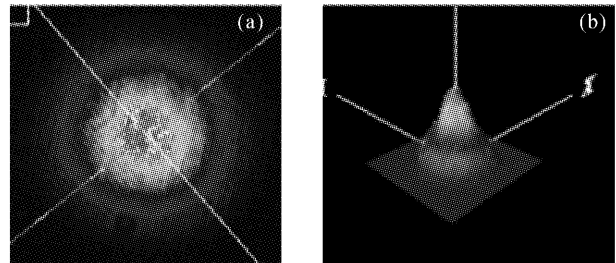


图 6 593 nm 黄激光光斑质量
(a) 平面图;(b) 立体图

Fig. 6 Spot quality of 593 nm yellow laser
(a) Ichnography; (b) stereograph

6 结 论

采用输出功率分别为 10 W 和 12 W 的两个激光二极管阵列抽运 Nd:YVO₄ 晶体,KTP II 类临界相位匹配内腔和频,获得了高光束质量 520 mW 的 593 nm 连续黄激光输出,且激光器的稳定性好,噪声低。采用复合腔结构是实现激光二极管阵列抽运 593 nm 全固态黄光激光器的一种高效和频方法。

参 考 文 献

- Xu Degang, Yao Jianquan, Zhou Rui *et al.*. 104 W all-solid-state 532 nm Nd:YAG laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30** (9): 864
徐德刚,姚建铨,周睿等. 104 W 全固态 532 nm Nd:YAG 激光器[J]. *中国激光*, 2003, **30**(9): 864
- Quan Zheng, Ling Zhao, Longsheng Qian. Single-frequency operation of a diode-pumped green laser using multi-Brewster

- plates[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(8):480~481
- 3 Tan Huiming, Zheng Quan, Chen Yingxin *et al.*. Double-frequency 671 nm laser with type-I critical phase-matching LBO [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(4): 289~292
檀慧明, 郑权, 陈颖新等. LBO I 类临界相位匹配倍频 671 nm 激光器[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(4): 289~292
 - 4 Zhang Hengli, Zhu Naiyi, Yang Qiansuo *et al.*. Study of an efficient Nd:YVO₄ red light laser pumped by laser diode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(3): 274~277
张恒利, 竺乃宜, 杨乾锁等. 激光二极管抽运 Nd:YVO₄/LBO 红光激光器研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(3): 274~277
 - 5 Aiyun Yao, Wei Hou, Xuechun Lin *et al.*. High power red laser at 671 nm by intracavity-doubled Nd:YVO₄ laser using LiB₃O₅ [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **231**: 413~416
 - 6 M. Pierrou, F. Laurell, T. Karlsson *et al.*. Generation of 740 mW of blue light by intracavity frequency doubling with a first-order quasi-phase-matched KTiOPO₄ crystal [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(4): 205~207
 - 7 V. E. Nadocheev, O. E. Nanil. Two-wave emission from a cw solid-state YAG:Nd³⁺ laser [J]. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1989, **19**(4): 444~446
 - 8 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
 - 9 Shen Hongyuan. Oscillation condition of simultaneous multiple wavelength lasing [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 1990, **7**(4): 174~176
 - 10 George A. Henderson. A computational model of a dual-wavelength solid-state laser [J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(11): 5451~5455
 - 11 Y. F. Chen, S. W. Tsai, S. C. Wang *et al.*. 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
 - 12 J. D. Vance, C. Y. She, H. Moosmiller. Continuous-wave, all-solid-state, single-frequency 400-mW source at 589 nm based on doubly resonant sum-frequency mixing in a monolithic lithiumniobate resonator [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(21): 4891~4896
 - 13 H. M. Kretschmann, F. Heine, G. Huber *et al.*. All solid-state continuous-wave doubly resonant all-intracavity sum-frequency mixer [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(19): 1461~1463
 - 14 Y. F. Chen. CW dual-wavelength operation of a diode-end-pumped Nd:YVO₄ laser [J]. *Appl. Phys. B*, 2000, **70**(4): 475~478
 - 15 M. Oka, S. Kubota. Stable intra-cavity doubling of orthogonal linearly polarized mode in diode-pumped Nd:YAG lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(10): 805~807
 - 16 Yao Jianquan. Non-Linear Optical Frequency Changing and Laser Tuning Technology [M]. Beijing: Science Press, 1995. 72
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
 - 17 Yung-fu Chen, S. W. Tsai. Diode-pumped Q-switched Nd:YVO₄ yellow laser with intracavity sum-frequency mixing [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(6): 397~399