

LDA 抽运 Nd : YAG/KTP 腔内和频 589 nm 连续波激光器*

吕彦飞 檀慧明 钱龙生

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘 要 报道了一种激光二极管阵列(LDA)抽运 Nd : YAG 双波长和频黄光激光器. 黄激光是由 Nd : YAG 晶体的 1064 nm 和 1319 nm 谱线腔内和频产生. 以 KTP 为和频晶体, 采用 II 类临界相位匹配, 在 12 W 的 808 nm 抽运功率下, 获得了最大功率为 430 mW 连续波基横模的 589 nm 黄激光输出, 光光转换效率为 3.6%, 光束质量因子 $M^2 < 1.2$. 实验结果表明采用激光二极管阵列抽运 Nd : YAG/KTP 腔内和频技术是获得黄激光的高效方法, 并可以应用到其它激光增益介质的两条谱线进行腔内和频, 获得更多不同颜色的单谱线激光输出.

关键词 激光二极管阵列抽运; 腔内和频; 全固态; 黄激光

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

0 引言

目前, LDA 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 LDA 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. LDA 抽运腔内和频激光器的理论基础是腔内多波长的产生, 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^[9~12]和腔外和频^[13,14]方法, 而国内尚未有这方面的报道. 作为激光增益介质的 Nd : YAG 晶体, 可以同时产 1064 nm 和 1319 nm 双波长振荡, 本文研究了采用三镜折叠腔结构, 并首次实现 LDA 抽运 Nd : YAG 晶体、KTP II 类临界相位匹配的腔内和频连续波输出激光器, 获得了最大功率为 430 mW 的 589 nm 连续波激光输出.

1 实验方案

LDA 抽运腔内和频黄激光器的实验装置如图 1. 采用三镜折叠腔结构, 将基频光与和频光分开, 避免了 Nd : YAG 晶体对和频光的吸收, 同时可产生两个束腰, 将激光增益介质与和频晶体分别放在两个束腰处, 从而获得较大的抽运光功率密度和较大的和频转换效率, 另外, 对端镜 M_2 镀上三色高反膜, 从而实现双通和频, 单向输出. 抽运源是最大输

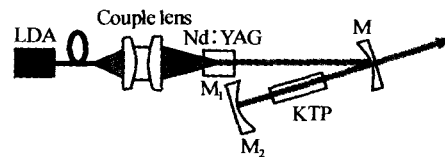


图 1 589 nm 激光器实验装置
Fig. 1 Experimental setup of 589 nm laser

出功率为 12 W 的光纤耦合激光二极管阵列, 通过温度调解, 使抽运光中心波长与 Nd : YAG 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%)会聚成半径为 200 μm 的抽运光斑注入到 Nd : YAG 晶体中. Nd : YAG 晶体钕离子掺杂原子分子数为 1.0%, Nd : YAG 晶体的通光长度为 3 mm, 其左端镀 808 nm 增透膜和 1319/1064 nm 双色高反膜作为一个腔镜(M_1), 右端对 1319/1064 nm 增透, 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 的平凹镜作为折叠输出镜(M), 凹面镀 1319/1064 nm 高反, 589 nm 增透膜, 平面对 589 nm 增透; 第二分臂(L_3)的端镜为曲率半径为 200 mm 的平凹镜(M_2), 凹面镀 1319/1064/589 nm 三色高反膜. 和频晶体采用 II 类临界相位匹配 KTP, 尺寸为 $2 \times 2 \times 5 \text{ mm}^3$, 两端面镀 1319/1064/589 nm 三色增透膜. 第一分臂($L_1 + L_2$)长 64 mm, 第二分臂长 26 mm.

2 谐振腔设计及热透镜分析

即使在中功率条件下, 激光增益介质的热透镜效应仍然很明显, 因此, 在设计腔型前, 对 Nd : YAG 晶体的热透镜焦距进行估算是必要的, 在此, 将受热的激光增益介质等效为一个薄透镜, 式(1)为端面抽运情况下热透镜焦距公式^[15]

* 国家“863”高科技计划资助项目(No. 2002AA311140)
Tel: 0431-6176512 Email: lvyanfei1976@163.com
收稿日期: 2004-12-27

$$f_{th} = \frac{\pi K_c \omega_p^2}{P_{th} (dn/dT)} \left[\frac{1}{1 - \exp(-\alpha l)} \right] \quad (1)$$

式中 α 为吸收系数; l 激光增益介质的通光长度; P_{th} 为抽运功率中作为热沉积在晶体内的一部分功率 (约为总功率的 20%); ω_p 为抽运光斑尺寸; K_c 为热传导系数; dn/dT 为晶体折射率的温度变化系数. 对掺杂浓度为 1.0% 的 Nd:YAG 晶体, $K_c = 0.14 \text{ W/cm} \cdot \text{K}$, $\alpha = 3.55 \text{ cm}^{-1}$, $dn/dT = 7.3 \times 10^{-6} \text{ K}$, $l = 3 \text{ mm}$. 把有关参数代入式(1)中计算, 并考虑实际的散热环境, 在 12 W 的抽运功率下, Nd:YAG 晶体的热焦距 f_{th} 约为 120 mm.

当抽运光功率太大或抽运光斑太小都将使热焦距变短, 所以采用大功率 LDA 抽运时, 在基本满足腔模相位匹配条件下, 抽运光的束腰半径应尽量大一些以减小热效应. 为了充分利用抽运能量和提高 KTP 的和频效率, 采用图 2 折叠腔结构, 其中 M_1

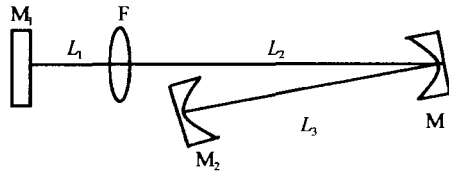


图 2 折叠腔设计示意图

Fig. 2 The sketch map of folded cavity

和 M_2 分别为臂 1 和臂 2 的端镜, 曲率半径分别为 R_1 和 R_2 , 折叠镜 M 的曲率半径为 R , F 为激光增益介质的等效热透镜, 在此, 假设热透镜中心在激光增益介质的中心, 设 M_1 和 M 之间的距离为 $L_1 + L_2$, M_2 和 M 之间的距离为 L_3 . 采用 G 参量等价腔分析法, M_1, M_2 之间的单程传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$G_1 = a - b/R_1 \quad G_2 = d - b/R_2$$

腔内光束参量分别是

$$\omega_{01}^2 = \frac{\pm \lambda b}{\pi} \frac{\sqrt{G_1 G_2 (1 - G_1 G_2)}}{G_1 + a^2 G_2 - 2a G_1 G_2}$$

$$\omega_{02}^2 = \frac{\pm \lambda b}{\pi} \frac{\sqrt{G_1 G_2 (1 - G_1 G_2)}}{G_2 + d^2 G_1 - 2d G_1 G_2}$$

式中, ω_{01}, ω_{02} 为分臂一和分臂二上的高斯光束光腰半径.

采用 ABCD 传输矩阵理论, 通过计算机辅助优化设计, 选取第一分臂长为 64 mm, 第二分臂长为 26 mm. 该腔型为热稳定腔, 第一分臂、第二分臂光腰尺寸随热焦距的变化曲线如图 3. 从图 3 中可以看出, 当热焦距 $f_{th} < 100 \text{ mm}$ 时, 腔内基频光腰尺寸随热焦距的变化较剧烈, 即热焦距越短, 稳区越

窄; 当热焦距 $f_{th} > 100 \text{ mm}$ 时, 腔内基频光腰尺寸随热焦距的变化趋于平缓, 即热焦越长, 稳区越宽.

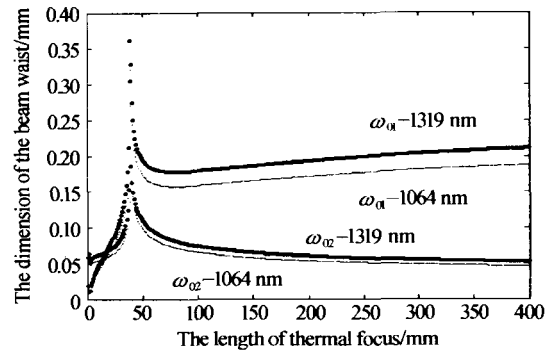


图 3 各分臂光腰随热焦距的变化

Fig. 3 The curve of the dimension the beam waist versus the length of thermal focus

抽运光在 Nd:YAG 晶体内的光斑半径取 $200 \mu\text{m}$, 由于 Nd:YAG 晶体的 1319 nm 要比 1064 nm 谱线的发射截面小, 并且在同样条件下, 1319 nm 与 1064 nm 光斑半径比为 $\sqrt{1319/1064} = 1.12$, 即腔内 1319 nm 基频光要比 1064 nm 基频光的光斑半径要大一些, 所以, 两基频光束在空间并不重合, 这就需要在制备激光输出镜 M 及反射镜 M_2 时, 均优先考虑 1319 nm 基频光, 使波长为 1319 nm 的反射率大于 1064 nm 的反射率. 这样可以弥补 1319 nm 相对于 1064 nm 基频光发射截面小的缺点, 使两基频光在腔内的光子密度的尽量达到相等, 才能得到较高的和频效率.

3 实验结果

采用 KTP 晶体进行腔内和频, 测量了 589 nm 黄激光输出功率随抽运功率的变化, 图 4 是 589 nm 黄激光输出功率随入射到 Nd:YAG 晶体 808 nm 抽运功率变化情况. 图 4 中可以看出, 激光器的阈值功率约为 0.7 W. 当注入到 Nd:YAG 晶体 12 W 时, 获得的 589 nm 黄激光输出功率为 430 mW, 并且可以看出在该抽运功率下, 激光输出功率并为达

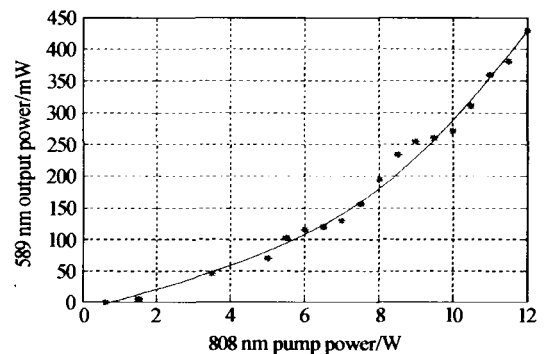


图 4 589 nm 和频光输出功率随入射抽运光功率变换关系

Fig. 4 SFM 589 nm output power via input pump power

到饱和,这就说明如果抽运功率进一步加大,激光的输出功率仍会增加.在输出功率为 430 mW 时,采用 Photon Inc. 公司生产的椭圆光束轮廓仪测量激光输出光斑质量如图 5,该光束的椭圆度为 0.98.

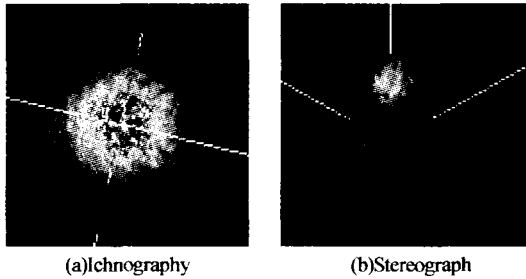


图 5 589 nm 黄激光的光斑质量

Fig. 5 The beam quality of 589 nm yellow laser

4 结论

研究了采用 12 W 的 LDA 抽运 Nd:YAG 晶体,采用 KTP II 类临界相位匹配腔内和频,获得了 430 mW 的 589 nm 连续波黄激光输出,光光转换效率为 3.6%. 实验和分析表明采用 LDA 抽运腔内和频是获得 589 nm 黄激光一种高效的和频方法,并可以应用到其它激光增益介质的两条谱线进行腔内和频,获得更多不同颜色的单谱线激光输出因此, LDA 抽运的腔内和频技术,为实现新波长全固态连续波激光器的发展提供了方向.

参考文献

- 李隆,田丰,赵致民,等. LD 端面泵浦折叠腔 Nd:YVO₄/LBO 激光器. 光子学报, 2004, **33**(4): 396~399
Li L, Tian F, Zhao Z M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4): 396~399
- 侯学元,李宇飞,孙渝明,等. LD 泵浦的 Nd:GdVO₄/KTP 腔内倍频激光器. 光子学报, 2004, **33**(1): 11~14
Hou X Y, Li Y F, Sun Y M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1): 11~14
- 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. 中国激光, 2002, **29**(4): 289~292
Tan H M, Zheng Q, Chen Y X, et al. *Chinese J of Lasers*, 2002, **29**(4): 289~292
- 陈振强,张戈,沈鸿元,等. Nd:YAP 腔内倍频高功率红光激光器. 中国激光, 2003, **30**(10): 873~876
Chen Z Q, Zhang G, Shen H G, et al. *Chinese J of Lasers*, 2003, **30**(10): 873~876
- 郑权,赵岭,钱龙生. LD 泵浦 Nd:YAG/LBO 蓝光激光器的低噪声运转. 光子学报, 2003, **32**(11): 1291~1293
Zheng Q, Zhao L, Qian L S. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(11): 1291~1293
- Pierrou M, Kellner T. Generation of 740 mW of blue light by intracavity frequency doubling with a first-order quasi-phase-matched KTiOPO₄ crystal. *Opt Lett*, 1999, **24**(4): 205~207
- Nadtocheev V E, Nanil O E. Two-wave emission from a CW solid-state YAG: Nd³⁺ laser. *Sov J Quantum Electron*, 1989, **19**(4): 444~446
- 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}. *Appl Phys Lett*, 1990, **56**(20): 1937~1938
- Shen H Y. Oscillation condition of simultaneous multiple wavelength lasing. *Chinese Physics Letters*, 1990, **7**(4): 174~176
- Henderson G A. A computational model of a dual-wavelength solid-state laser. *J Appl Phys*, 1990, **68**(11): 5451~5455
- 毕勇,孙志培,张瑛,等. 全固态和频 589 nm Nd:YAG 激光器. 中国激光, 2003, **30**(5): 440~440
Bi Y, Sun Z P, Zhang Y, et al. *Chinese J of Lasers*, 2003, **30**(5): 440~440
- Kretschmann H M, Heine F. All solid-state continuous wave doubly resonant all intra-cavity sum-frequency mixer. *Opt Lett*, 1997, **22**(19): 1661~1663
- Chen Y F. Efficient generation of CW yellow light by single-pass sum-frequency mixing of a diode-pumped Nd:YVO₄ dual wavelength laser with periodically poled-lithium niobate. *Opt Lett*, 2002, **27**(20): 1809~1811
- Vance J D, She C Y, Moosmuller H. CW, all-solid-state, single frequency 400 mW source at 589 nm based on doubly resonant sum-frequency mixing in a monolithic lithium niobate resonator. *Appl Opt*, 1998, **37**(21): 4891~4896
- 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. 光学学报, 2001, **21**(3): 274~277
Zhang H L, Zhu N Y, Yang Q S, et al. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(3): 274~277

Laser-diode Array Pumped Nd : YAG/KTP Continuous Wave 589 nm Laser with Intracavity Sum-frequency Mixing

Lü Yanfei, Tan Huiming, Qian Longsheng

Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS, Changchun 130033

Received date: 2004-12-27

Abstract A laser diode array pumped Nd : YAG laser that generates simultaneous laser action at wavelength 1064 nm and 1319 nm was reported. Nonlinear optical crystal KTP was used as intracavity sum frequency crystal. Using type II critical phase-match, a yellow laser at 589 nm was obtained by 1064 nm and 1319 nm intracavity sum-frequency mixing. With an incident pump laser of 12 W, the maximum output power of 430 mW was obtained. The optical-to-optical conversion was up to 3.6%. The M^2 beam quality factor of the sum-frequency mixed yellow laser was less than 1.2. Experimental results show that the intracavity sum-frequency mixing is an effective method for obtaining 589 nm laser. Also it can be applied to other transition wavelengths in other laser crystals to obtain more all-solid-state lasers with different wavelengths.

Keywords LDA-pumped; Intra-cavity sum-frequency; All-solid state; Yellow laser



Lü Yanfei was born in Heilongjian Province, in Feb. 1976. He received the B. S. degree in 2001 from Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics. He is presently pursuing the Doctor's Degree in optics at Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS. He is interested in all solid-state laser and nonlinear frequency conversion.