

V 型腔腔内和频产生 3 W 连续波 589 nm 黄光激光器^{*}

耿爱丛^{1)†} 薄 勇¹⁾ 毕 勇³⁾ 孙志培¹⁾ 杨晓冬^{1)‡} 鲁远甫^{1)‡}
陈亚辉^{1)‡} 郭 林^{1)‡} 王桂玲¹⁾ 崔大复¹⁾ 许祖彦¹⁾

1) (中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100080)

2) (中国科学院研究生院, 北京 100080)

3) (中国科学院光电研究院, 北京 100080)

(2006 年 3 月 28 日收到 2006 年 4 月 6 日收到修改稿)

报道了双 Nd:YAG 棒串接 V 型折叠腔腔内 KTP 和频全固态黄光激光器, 得到了 3 W 连续波 589 nm 黄光输出. 为了提高黄光输出功率, 采用了两种手段: 一是通过优化腔型设计使得两束基频在腔内达到了最佳的空间重合, 二是通过选择合适大小的二极管激光器的抽运功率使得两束基频在腔内达到了最佳的功率配比.

关键词: 全固态激光器, Nd:YAG 激光器, 黄光, 腔内和频

PACC: 4255R, 4260B, 4260D, 4265M

1. 引 言

黄光波段的激光在生物医学(由于与人体血红蛋白的吸收谱线重合)^[1]、玻色-爱因斯坦凝聚体^[2]、大气测量等领域^[3], 都有着广泛而迫切的需要. Nd:YAG 晶体的 1064 nm 和 1319 nm 谱线通过和频能够产生 589 nm 黄光, 而且, 二极管抽运的 Nd:YAG 全固态激光器与染料激光器相比, 具有高效率、高平均功率、长寿命等优点, 因此成为国际上黄光激光器技术研究的热点之一. 目前国际上已经开展了大量的研究, 使得全固态黄光激光技术进入实验研究阶段^[4,5], 并逐步向应用靠近. 例如, MIT Lincoln 实验室采用两台分别产生 1064 nm 和 1319 nm 的 Nd:YAG 调 Q+ 锁模激光器和频的方法, 在实验室获得平均功率 8—10 W 589 nm 激光输出^[6,7], 美国芝加哥大学用该激光器做了实验, 使用的功率为 1.1 W, 产生的激光导引星亮度是 9.5 等星^[8]. Air Force Research 实验室采用种子注入锁定+外腔和频的方法, 得到了 20 W 589 nm 的激光输出^[9]. 但是, 这些激光器的

结构都很复杂. 在我国, 目前输出功率最高的 589 nm 激光器, 是由本实验组以简报形势报道的 510 mW 的 Nd:YAG 全固态激光器, 该激光器只对复合腔腔内和频进行了初步尝试, 没有考虑 1064 激光和 1319 nm 激光在腔内的空间重合和功率配比问题, 因此, 黄光输出功率依然很低^[10].

本文采用双 Nd:YAG 棒串接 V 型复合折叠腔腔内 KTP 和频方案, 得到了 3 W 连续波 589 nm 黄光输出, 该激光器的优点在于结构简单, 容易调节. 为了进一步提高黄光输出功率, 我们采用了以下两种优化手段: 一是通过优化腔型设计使得两束基频在腔内达到了最佳的空间重合, 二是通过优化二极管激光器(LD)的抽运功率大小使得两束基频在腔内达到了最佳的功率配比.

2. 实验装置

589 nm 黄光激光器光路如图 1 所示, 谐振腔采用 V 型复合折叠腔结构. M_1 , M_4 和 M_5 是 1064 nm 激光器的腔镜, M_2 , M_3 , M_4 和 M_5 是 1319 nm 激光器的

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60508013)资助的课题.

[†] E-mail: aicong_77@126.com

腔镜,其中 M_4 和 M_5 形成了公共折叠臂。 M_1 和 M_2 都是平面镜,分别镀有 1064 nm 和 1319 nm 全反射膜。 M_3 也是平面镜,镀有 45° 1319 nm 垂直偏振高反和 1064 nm 水平偏振高透膜。 M_4 、 M_5 是曲率半径为 190 mm 的平凹镜, M_4 凹面镀有 1319 nm 垂直偏振高反和 1064 nm 水平偏振高反以及 589 nm 高透膜,平面镀有 589 nm 高透膜; M_5 凹面镀有 1319 nm、1064 nm 和 589 nm 高反膜。系统有四个相同的激光头,每个激光头包括 9 个最大输出功率为 20 W 的激光二极管阵列和一个 Nd:YAG 圆棒,激光棒长 65 mm,直径为 3 mm,Nd 掺杂浓度为 1.0%,二极管阵列从侧面三向对称抽运 Nd:YAG 棒,激光头 1 和激光头 2 中的 Nd:YAG 棒双面镀 1064 nm 高透膜,而激光头 3 和激光头 4 中的 Nd:YAG 棒双面镀 1319 nm 高透膜。每两个完全相同的激光头间插入一块 90° 石英旋光片,用来补偿热致双折射效应,使得振荡光角向偏振位相延迟与切向偏振的位相延迟相互交换,实时补偿由热致双折射效应带来的退偏效应,保证高光束质量稳定的激光输出^[11,12]。

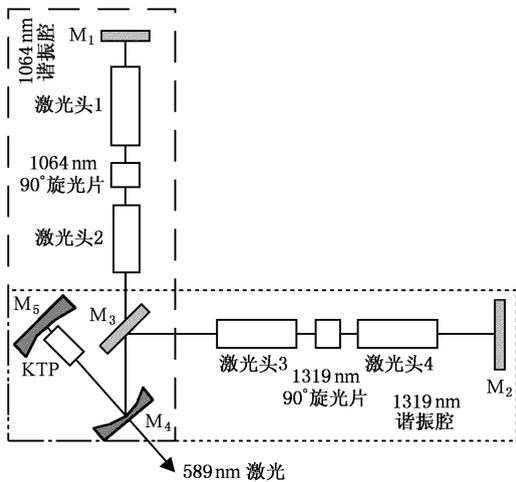


图 1 连续波 589 nm Nd:YAG 和频激光器光路图

选用一块 II 类临界相位匹配的 KTP 晶体作为和频晶体^[13],放置在共用的折叠臂内,1064 nm 和 1319 nm 激光在 KTP 晶体内进行腔内和频,从而产生 589 nm 黄光,然后由 M_4 镜输出。KTP 晶体尺寸为 $3 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$,切割角为 $\theta = 78.5^\circ$, $\phi = 0^\circ$,有效非线性系数为 $d_{\text{eff}} = 3.42 \text{ pm/V}$ 。晶体置于自行设计研制的高精度控温炉中,控温炉设置温度为晶体的相位匹配温度 37°C ,控温精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。

3. 优化理论

为了提高和频输出功率,首先对激光腔型进行了优化设计,腔型设计实现了 1064 nm 和 1319 nm 激光光束在空间上高度重合,即两光束产生的光腰大小和光腰位置一致。为此,采用非稳腔法测量了 1064 nm 和 1319 nm 激光头在不同抽运功率下的热透镜焦距^[14],利用 ABCD 传播矩阵和稳定腔谐振条件^[15],同时考虑 Nd:YAG 晶体的热透镜效应、谐振腔基模与激光晶体内有效增益体积之间的空间匹配,通过计算机数值模拟优化了 V 型折叠腔的参数。

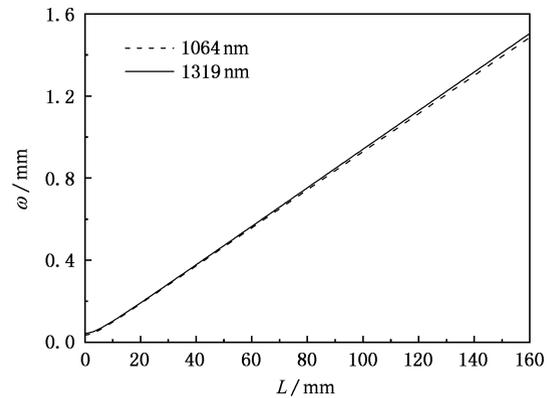


图 2 热近非稳腔运行时,折叠臂内两基频光基模光斑尺寸的分布,其中 L 表示测量点与镜 M_5 的距离

计算机数值模拟结果显示:当 1064 和 1319 nm 激光的抽运功率同时升到最大时,即两个激光腔都工作在热近非稳模式下^[16], M_1 距离 M_3 的几何长度取 667 mm, M_2 距离 M_3 的几何长度取 554 mm, M_3 距离 M_4 的几何长度取 66 mm, M_4 距离 M_5 的几何长度取 160 mm,此时激光腔的折叠臂内可以产生一个很小的光腰。图 2 给出了热近非稳腔运行时折叠臂内两基频光基模光斑尺寸 ω 分布的模拟结果,可以看出,此时腔内两束基频激光的光腰都位于 M_5 镜面处,并且两束激光的基模光腰半径都是 $40 \mu\text{m}$,保证了两束激光空间上的高度重合,其中 L 表示测量点与镜 M_5 的距离。实验时将 KTP 晶体尽量靠近镜 M_5 放置,即尽量靠近光腰位置放置。

为了得到较高的和频效率,两束基频光的功率需要满足一定的配比,但是采用腔内和频时,非线性晶体处的入射基频功率很难从实验上直接测量,为此我们采用巧妙的方法解决了这一问题。频率为 ω_1

$= 2\pi c(\lambda_1 = 1064 \text{ nm})$ 和 $\omega_2 = 2\pi c(\lambda_2 = 1319 \text{ nm})$ 的激光束在非线性晶体中相互作用(c 表示光速),从而产生非线性极化强度 $P^{(2)}(\omega_3 = \omega_1 + \omega_2)$,其中 $\omega_1 = 2\pi c/\lambda_1$ (589 nm)^[17]. 该极化强度是一个振动偶极矩的集合,它起着频率为 $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$ 的辐射源作用. 为了使能量有效地从频率为 ω_1 和 ω_2 的抽运波转移到频率为 ω_3 的生成波,在和频产生中必须满足能量守恒和动量守恒. 其中能量守恒要求 $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$,也可以表示为

$$\frac{hc}{1064 \text{ nm}} + \frac{hc}{1319 \text{ nm}} = \frac{hc}{589 \text{ nm}}, \quad (1)$$

其中 h 为普朗克常量.(1)式即一个波长为 1064 nm 的光子和一个波长为 1319 nm 的光子生成一个波长为 589 nm 的光子. 因此,腔内 1064 nm 激光和 1319 nm 激光功率理论上的最佳配比应该是

$$\frac{P_{in_{1064 \text{ nm}}}}{P_{in_{1319 \text{ nm}}}} = \frac{\frac{hc}{1064 \text{ nm}}}{\frac{hc}{1319 \text{ nm}}} = 1.24, \quad (2)$$

又已知腔内功率可以由下式计算得出^[18]:

$$P_{in_i} = P_{out_i} \cdot \frac{1 + R_i}{1 - R_i}, \quad (3)$$

其中 P_{out} 和 R 分别代表激光输出功率和耦合输出镜的反射率,角标 $i = 1064 \text{ nm}$ 或 1319 nm ,分别对应着 1064 nm 和 1319 nm 激光器的参量. 当 1064 nm 和 1319 nm 激光器耦合输出镜的反射率相同时,下式成立:

$$\frac{P_{in_{1064 \text{ nm}}}}{P_{in_{1319 \text{ nm}}}} = \frac{P_{out_{1064 \text{ nm}}}}{P_{out_{1319 \text{ nm}}}}. \quad (4)$$

因为 1064 nm 和 1319 nm 激光的输出功率又对应着相应的 LD 抽运功率,通过选择两束激光合适的 LD 抽运功率配比,就可以保证腔内两束基频光在非线性晶体上达到最佳的功率配比,从而提高和频效率.

4. 实验结果与讨论

根据以上模拟结果摆放实验光路,在实验中,首先将 M_1 换作透过率为 10% 的 1064 nm 耦合输出镜,只运行 1064 nm 激光腔内的两个激光头,得到了不同 LD 抽运功率下 1064 nm 激光的输出功率. 同样地,将 M_2 换作透过率为 10% 的 1319 nm 耦合输出镜,只运行 1319 nm 激光腔内的两个激光头,从而得到了 1319 nm 激光的输出功率,实验结果如图 3 所

示. 从图 3 中可以看出:一定的 1064 nm 和 1319 nm 激光输出功率对应着相应的 LD 抽运功率,因此通过调节两个基频激光器的 LD 抽运功率,就可以使两束基频光的腔内功率达到最佳配比.

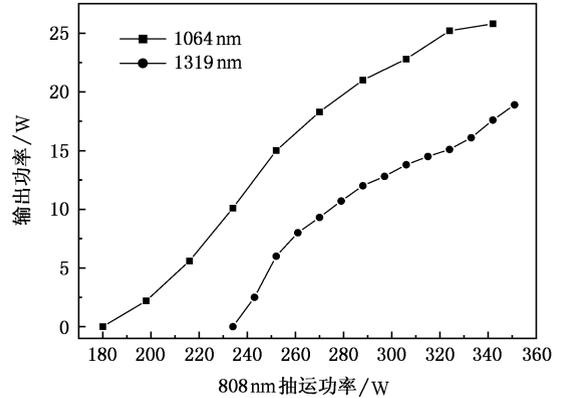


图 3 在不同抽运功率下两束基频光的输出功率

然后将 1064 nm 输出耦合镜换成 1064 nm 全反镜,并且将 1319 nm 输出耦合镜换成 1319 nm 全反镜,同时运行四个激光头,通过调节两基频激光器 LD 抽运功率的配比,就可以从 M_4 处得到 589 nm 黄光输出. 图 4 显示了不同 LD 抽运功率(四个激光头的总抽运功率)下,黄光的输出功率曲线. 从图中可以看到,随着抽运功率的增加,黄光输出功率线性增加,其斜效率为 2%,当 LD 总抽运功率为 570 W 时,输出了 3 W 的 589 nm 黄光.

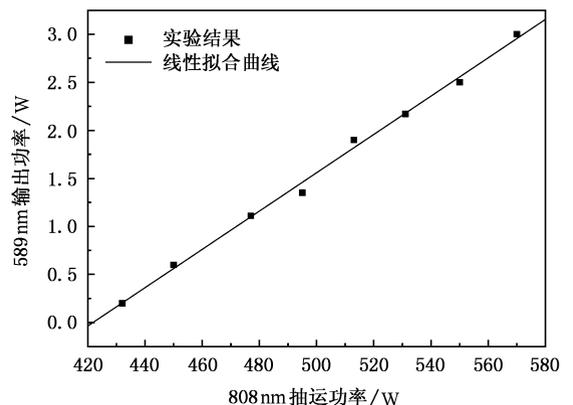


图 4 在不同抽运功率下 589 nm 黄光的输出功率

最后我们将实验结果和理论结果进行了对比,如图 5 所示. 理论上可知:1064 nm 激光和 1319 nm 激光的最佳功率配比是 1.24,因此对应图 4 的实验点可以画出一条理论曲线. 在实验中,固定 1319 nm 激光腔内功率即固定其 LD 抽运功率,调节 1064 nm

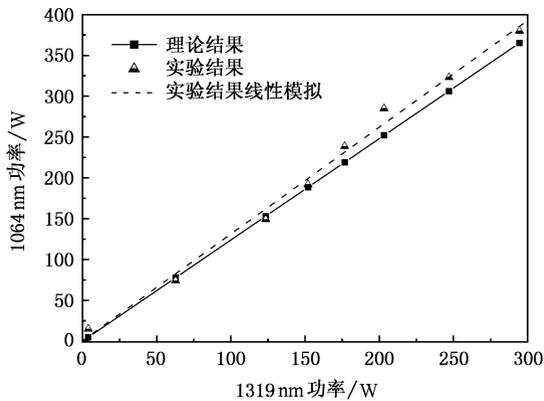


图5 两束基频腔内功率的最佳配比

激光腔内功率即其 LD 抽运功率, 保证黄光输出功率最大, 从而得到了图 5 所示的实验结果. 从图中可以看出实验结果与理论结果基本符合, 但实验中 1064 nm 激光与 1319 nm 激光功率的最佳配比略大

于理论值, 线性拟合可以求出是 1.3, 可能的原因是在 II 类匹配 KTP 晶体中, 需要一个水平偏振 1064 nm 光子与一个垂直偏振 1319 nm 光子和频从而产生一个水平偏振 589 nm 光子, 但是由于 M_5 镜起偏效果不好, 导致 1064 nm 激光偏振度不高, 则实际需要的 1064 nm 激光功率要比理论值略高.

5. 结 论

采用双 Nd:YAG 棒串接 V 型复合折叠腔腔内 KTP 和频方案, 通过腔型设计优化了 1064 nm 和 1319 nm 激光模式的空间重合, 通过调节 LD 抽运功率优化了腔内 1064 nm 和 1319 nm 激光的功率配比, 从而在两束基频光光斑空间分布高度重合、腔内的功率配比达到最佳时, 保证了高效率的和频产生, 并在实验上得到了 3 W 连续波 589 nm 黄光输出.

- [1] Kreschmann H M *et al* 1997 *Opt. Lett.* **22** 1461
- [2] Davis K B *et al* 1995 *Phys. Rev. Lett.* **75** 3969
- [3] Davis J 1993 *Laser Focus World* **29** 111
- [4] Chiu P H, Magana A, Davis J 1994 *Opt. Lett.* **19** 2116
- [5] Farley R W, Dao P D 1995 *Appl. Opt.* **34** 4269
- [6] Jeys T H, Brailove A A, Mooradian A 1989 *Appl. Opt.* **28** 2588
- [7] Jian G *et al* 1998 *Proc. SPIE* **3353** 242
- [8] Kibblewhite E J, Shi F 1998 *Proc. SPIE* **3353** 300
- [9] Joshua C B 2003 *Opt. Lett.* **28** 2219
- [10] Bi Y *et al* 2003 *Chinese J. Lasers* **30** 440 (in Chinese) [毕 勇等 2003 中国激光 **30** 440]
- [11] Sun Z P *et al* 2004 *Opt. Commun.* **241** 167
- [12] Geng A C *et al* 2004 *Chin. Phys. Lett.* **22** 125
- [13] Li R N, Lai Y J 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1736 (in Chinese) [李瑞宁、来引娟 2002 物理学报 **51** 1736]
- [14] Lancaster D G, Dawes J M 1998 *Opt. Laser Technol.* **30** 103
- [15] Lü B D 1992 *Laser optics-laser beam propagation and beam quality control* (Chengdu: Sichuan University Press) (in Chinese) [吕百达 1992 激光光学-激光光束的传输变换和光束质量控制 (成都: 四川大学出版社)]
- [16] Feng Y, Bi Y, Xu Z Y 2003 *Proc. SPIE* **4946** 227
- [17] Shi S X *et al* 2003 *Nonlinear Optics* (Xi'an: Xidian University Press) P96 (in Chinese) [石顺祥等 2003 非线性光学 (西安: 西安电子科技大学出版社) 第 96 页]
- [18] Koechner W, Bass M 2003 *Solid-State Laser* (New York: Springer-Verlag) p88



A 3 W continuous-wave 589 nm yellow laser based on the intracavity sum frequency generation in a V-shaped cavity^{*}

Geng Ai-Cong^{1,2)†} Bo Yong¹⁾ Bi Yong³⁾ Sun Zhi-Pei¹⁾ Yang Xiao-Dong^{1,2)}

Lu Yuan-Fu^{1,2)} Chen Ya-Hui^{1,2)} Guo Lin^{1,2)} Wang Gui-Ling¹⁾ Cui Da-Fu¹⁾ Xu Zu-Yan¹⁾

¹ *Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*

² *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*

³ *Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*

(Received 28 March 2006 ; revised manuscript received 6 April 2006)

Abstract

This paper reports an all-solid-state yellow laser, which is based on two Nd :YAG rods connected in series and the intracavity sum frequency generation in a KTP crystal by use of a V-shaped folding configuration, and continuous-wave 589 nm light with the output power of 3 W is obtained. In order to improve the output power of the yellow light, two means are introduced. One means is optimizing the space overlapping of two fundamental beams by optimized designing of the oscillators, and the other is optimizing the intracavity power ratio of two fundamental beams by choosing proper pump powers of the two beams.

Keywords : all-solid-state laser, Nd :YAG laser, yellow light, intracavity sum frequency

PACC : 4255R, 4260B, 4260D, 4265M

^{*} Project supported by National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60508013).

[†] E-mail : aicong_77@126.com