

激光二极管抽运共轴双晶体黄光激光器*

李斌[†] 姚建铨 丁欣 王鹏 张帆

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 激光与光电子研究所,
光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)
(2010年1月11日收到; 2010年4月13日收到修改稿)

提出一种全新的单抽运源、共轴双晶体实现黄光激光的方法, 并对其进行了理论分析和实验研究. 利用该方法在抽运功率为 1.5 W 时, 获得了 54 mW 的黄光激光输出, 激光不稳定性为 5%, 光-光转换率为 3.6%, 而利用对 1064 nm 损耗的方法在相同条件下只获得 15 mW 的黄光输出. 该方法结构简单、灵活多样, 可以应用到很多弱增益谱线与强增益谱线和频的结构当中, 实现诸如 491, 488, 593.5, 555 和 500.8 nm 的激光输出.

关键词: 黄光激光器, 单抽运源, 双晶体, 和频

PACS: 42.55.Xi, 42.60.-v, 42.65.-k

1. 引言

黄光波段的激光在生物医学(与人体血红素的吸收谱线重合)^[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 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, 麻省理工学院 Lincoln 实验室采用两台分别产生 1064 和 1319 nm 的 Nd:YAG 调 Q 加锁模激光器和频的方法, 在实验室获得平均功率为 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]. 本文报道了一种全新的单抽运共轴双晶体实现黄光激光的新方法, 并对该方法进行了理论分析和实验研究, 在抽运功率为 1.5 W 时获得了 54 mW 的黄光激光

输出, 实验表明, 该方法结构简单、灵活多样, 可以应用到很多弱增益谱线与强增益谱线和频的结构当中, 实现诸如 491, 488, 555 和 500.8 nm 等波长的激光输出.

2. 理论分析及实验

589 nm 黄光激光器主要通过 Nd:YAG 中的 1064 和 1319 nm 谱线进行和频得到, 但 1319 nm 谱线的受激截面很小, 只有 1064 nm 的五分之一, 这种强谱线和弱谱线的和频方式获得黄光激光主要有两种方式, 一种是利用单个增益介质同时双波长振荡, 然后利用非线性晶体进行和频^[10,11], 另一种是利用两个增益介质两个抽运源构成两个具有交叠区的谐振装置, 然后将非线性晶体放在交叠区内进行和频获得黄光激光输出^[12]. 但这两种方法都存在一定的弊端, 第一种方法要实现双波长在同一个谐振腔同时振荡就要对增益较强的 1064 nm 谱线进行适当的损耗, 通常的做法是将输出镜镀对 1064 nm 具有一定透射率的膜系, 而对 1342 或 1319 nm 全反, 这样通过对强增益谱线的损耗来使两谱线的腔内光子数之比达到 1:1. 这种方式的效率比较低, 如利用 25 W 的抽运功率抽运 Nd:YVO₄ 晶体可得到

* 高等学校博士学科点专项科研基金(批准号:20070056086)、中国博士后科学基金(批准号:20090450760)、国家自然科学基金(批准号:60978021)和国家高技术研究发展计划(批准号:2007AA06Z420)资助的课题.

[†] E-mail: Einstein@163.com

800 mW 左右的黄光,但 1064 nm 激光的输出高达 2.5 W 左右,这部分能量没有参与和频而白白浪费掉了,影响了和频效率.而第二种方法要求两套抽运源,谐振腔的结构也相对复杂,光路难于调整,稳定性差,不利于产品化和实用化.针对以上装置的缺点,我们提出一种单抽运源抽运共轴双晶体的新方法产生黄光激光,该方法结构简单、稳定可靠,并且此方法灵活多样,可以应用到各种和频装置中(实验装置如图 1 所示).

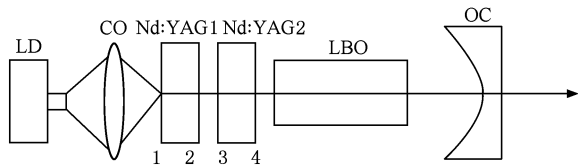


图 1 黄光激光器构造

激光二极管(LD)为 Nlight 公司生产,输出功率为 1.5 W,中心波长为 808.7 nm;Nd:YAG1 的 1 面镀有 1064 nm 高透,808 nm 高透,1319 nm 高反;2 面镀 1319 nm 增透,808 nm 增透;Nd:YAG2 的 3 面镀 808 nm 增透,1319 nm 增透,1064 nm 高反;4 面镀 1064 nm 增透和 1319 nm 增透.这样镀膜的目的是使 1319 nm 的激光晶体长度为 Nd:YAG1 + Nd:YAG2,而 1064 nm 激光晶体长度为 Nd:YAG2,这里我们是通过调整激光晶体的长度来达到两谱线的阈值相等,从而不需要对 1064 nm 进行损耗就可以使 1064 和 1319 nm 同时起振,这种方式有利于效率的提高,并且很容易实现,应用上也极其灵活.选用三硼酸锂(LBO)作为 589 nm 和频晶体,双面镀 1064,1319 和 589 nm 增透膜,OC 为平凹镜曲率半径为 50 mm,镀 1064 和 1319 nm 高反,589 nm 高透.整个系统采用热电制冷器(TEC)精确控温,温度设定为 20 °C,由双波长运转的阈值条件

$$P_{th1064} = P_{th1319}, \quad (1)$$

$$P_{th1064} = \frac{\pi h \nu_{1064} (\omega_{1064}^2 + \omega_{p1064}^2) L_{1064}}{4 \sigma_{1064} \tau \eta_{p1064} \eta_{a1064}}, \quad (2)$$

$$P_{th1319} = \frac{\pi h \nu_{1319} (\omega_{1319}^2 + \omega_{p1319}^2) L_{1319}}{4 \sigma_{1319} \tau \eta_{p1319} \eta_{a1319}}, \quad (3)$$

其中 σ_{1064} 为 1064 nm 谱线的受激截面, σ_{1319} 为 1319 nm 谱线的受激截面, η_{p1064} 为 1064 nm 的量子效率, η_{p1319} 为 1319 nm 的量子效率, η_{a1064} 和 η_{a1319} 分别为产生 1064 nm 激光和 1319 nm 激光的 Nd:YAG 对 808 nm 的吸收率. τ 为 Nd:YAG 激光上能级寿命.

L_{1064} 和 L_{1319} 分别为 1064 和 1319 nm 的腔损耗, ω_1 和 ω_p 分别为 Nd:YAG 晶体上的光斑半径.以上参数分别取 $\sigma_{1064} = 2.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$, $\sigma_{1319} = 0.56 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\eta_{a1319} = 1 - \exp[-\alpha \times (l_{Nd:YAG1} + l_{Nd:YAG2})]$, $\eta_{a1064} = \exp[-\alpha \times l_{Nd:YAG1}] - \exp[-\alpha \times (l_{Nd:YAG1} + l_{Nd:YAG2})]$, 其中 α 为 Nd:YAG 的吸收系数,掺杂 1% 的 Nd:YAG,一般取 $\alpha = 5$,当 $P_{th1064} = P_{th1319}$ 时分别取 $L_{1064} = 0.01$ 和 $L_{1319} = 0.01, 0.02, 0.03, 0.04$. $l_{Nd:YAG1}$ 和 $l_{Nd:YAG2}$ 的关系如图 2 所示.

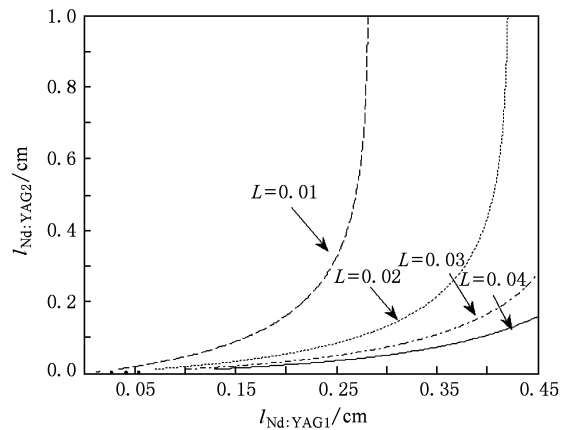


图 2 Nd:YAG1 与 Nd:YAG2 的长度关系

由图 2 可以看出,在 1064 nm 腔损耗一定的情况下,1319 nm 的损耗越大则 Nd:YAG2 的长度就要求越短, Nd:YAG1 的长度就要求越长,这是因为 1319 nm 损耗比较大时就要提高 Nd:YAG1 对抽运光的吸收来降低 1319 nm 的阈值,而对于 1064 nm 就要减小其吸收长度从而使 1064 与 1319 nm 的阈值相等,达到同时起振的目的,我们用阈值法测量了 1064 和 1319 nm 的损耗分别为 0.012 和 0.02 左右,由图 2 可得到当 $l_{Nd:YAG1}$ 为 3 mm 时 $l_{Nd:YAG2}$ 的长度为 1.318 mm,此时 1064 与 1319 nm 的阈值相等,在实验中我们取 $l_{Nd:YAG1}$ 为 3 mm, $l_{Nd:YAG2}$ 为 1.5 mm,晶体规格为 3 mm × 3 mm × 3 mm 和 3 mm × 3 mm × 1.5 mm,用铝箔包裹放在紫铜热沉中并且使两块晶体尽量靠近,热沉用 TEC 严格控温, LBO 为 3 mm × 3 mm × 10 mm,采用非临界相位匹配方式,切割角为 $\theta = 90$ 度, $\phi = 3^\circ$,腔长为 25 mm,仔细调整光路得到抽运功率与输出功率的关系如图 3 所示.

当取不同的 $l_{Nd:YAG1}$ 的长度时,激光器的输出功率特性差别比较大,其中 $l_{Nd:YAG1} = 3$ mm 时获得了最高的功率,当抽运功率为 1.5 W 时获得了 54 mW 的黄光激光输出,用二倍扩束镜扩束后发散角为

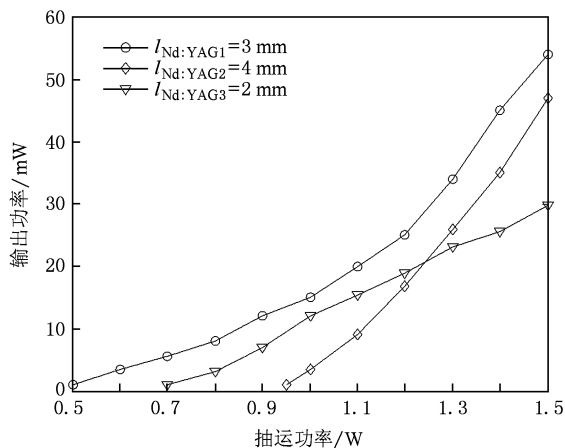


图3 输出功率与抽运功率的关系

1.5 m·rad. 当 $l_{\text{Nd:YAG1}}=4\text{ mm}$ 时获得最高的斜率效率,但阈值较高,如果进一步提高抽运功率会得到更高的黄光输出,这是由于我们以上的计算结果是从双波长运转的阈值条件出发,而不是从等光子数密度的条件出发的,所以在实际的实验当中可以看到在较小的抽运功率下可以从阈值的角度考虑双波长运转会得到好的实验结果,但在大抽运功率下应该从等光子数条件出发会得到更好的效果.

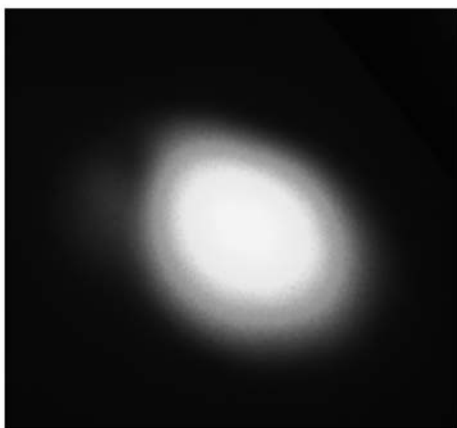


图4 黄光激光远场光斑

图4为黄光激光输出的远场光斑,激光器的长期不稳定性小于5%,激光器的稳定性对温度变化很敏感,这是由于Nd:YAG的吸收峰较窄,并且双波长运

转会出现模式竞争,所以影响了激光器的稳定性.

我们又采用了传统方法进行了实验,实验采用晶体为Nd:YAG,规格为3 mm×3 mm×3 mm,输出镜采用平凹镜,曲率半径 $R=50\text{ mm}$,镀1064 nm反射率为98%的膜系,1319 nm高反,采用相同的抽运源和LBO晶体,得到的输出功率与抽运功率的关系如图5所示.

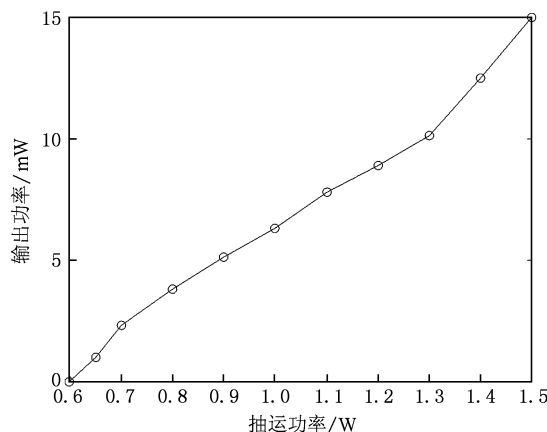


图5 黄光激光输出功率

在抽运功率为1.5 W时最高获得15 mW的589 nm黄光激光输出,而未参与和频由输出镜输出的1064 nm的功率达61 mW,由此可以看出采用共轴双晶体的方法比采用传统的方法会得到更高的转换率.

3. 结 论

提出了一种单抽运源、共轴双晶体和频的新方法,并对其进行了理论分析和实验研究.实验结果表明,该方法可以实现较高的和频效率,在抽运功率为1.5 W时最高获得54 mW的589 nm黄光激光输出,激光不稳定性为5%,而传统方法在相同的抽运功率相同的结构时只获得15 mW的激光输出,该方法亦可广泛用于如593.5,491,500.8和488 nm,等等一系列弱增益谱线与强增益谱线的和频当中,具有结构简单、灵活多样,易于实现的优点.

[1] Hanno M K, Frank H, Günter H, Thörsteinn H 1997 *Opt. Lett.* **22** 1461
 [2] Davis K B, Mewes O M, Andrews R M, Druten N J, Durfee S D, Kurn D M, Ketterle W 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 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] Chen Y F 2000 *Appl. Phys. B* **70** 475
[11] Chen Y F, Tsai W S, Wang C S, Huang C Y, Lin C T, Wong B C 2002 *Opt. Lett.* **27** 20 1809
[12] Geng A C, Bo Y, Bi Y, Sun Z P, Yang X D, Lu Y F, Chen Y H, Guo L, Wang G L, Cui D F, Xu Z Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5227 (in Chinese) [耿爱丛、薄 勇、毕 勇、孙志培、杨晓冬、鲁远甫、陈亚辉、郭 林、王桂玲、崔大复、许祖彦 2006 物理学报 **55** 5227]

Laser diode-pumped coaxial double crystals yellow laser*

Li Bin[†] Yao Jian-Quan Ding Xin Wang Peng Zhang Fan

(Key Laboratory of Optoelectric Information Science and Technology of Ministry of Education, Institute of Laser and Optoelectronics, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 11 January 2010; revised manuscript received 13 April 2010)

Abstract

A new configuration of 589 nm yellow laser with a single LD pump source and coaxial double crystal was proposed. When the incidence pump power was 1.5 W, 54 mW yellow laser at 589 nm was obtained, the optical to optical conversion efficiency was 3.6%, and the laser instability was about 5%. A conventional method for 589 nm laser was also tested under the same conditions, only 15 mW yellow laser was obtain. The configuration of single pump source and coaxial double crystals is compact and flexible, which can be used in many sum frequency lasers, such as the 491, 488, 593.5, 555 and 500.8 nm laser, and so on.

Keywords: yellow laser, single pump source, double crystals, sum frequency

PACS: 42.55.Xi, 42.60.-v, 42.65.-k

* Project supported by the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20070056086), China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 20090450760), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60978021), and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2007AA06Z420).

[†] E-mail: Einsteindirac@163.com