

LD 泵浦 Nd : YVO₄/LBO 腔内和频连续黄光激光器 *

卜轶坤^{1,2} 郑 权¹ 薛庆华^{1,2} 陈颖新¹ 钱龙生¹

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130022)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要 用国产半导体激光二极管泵浦 Nd : YVO₄ 晶体, 通过优化膜系, 调节 1064 nm 谱线的线性损耗以达到与弱谱线 1342 nm 增益匹配, 在室温下实现 1064 nm 和 1342 nm 双波长连续运转, 并通过 I 类临界相位匹配 LBO 晶体腔内和频在国内首次实现 593.5 nm 黄色激光连续输出, 当泵浦注入功率为 1.8 W 时和频黄激光最大输出达 85 mW, 光光转换效率为 4.7%, 功率稳定性 24 h 内优于 ±2.8%.

关键词 LD 泵浦; 双波长运转; 腔内和频; 黄光激光器

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

0 引言

近年来, LD 泵浦的全固态红、绿、蓝三色激光器, 因其具有效率高、结构紧凑、热效应小、输出光束质量高等优点, 已成为国际上较为热门的研究课题^[1~3]. 但对波长范围从 550 nm 到 650 nm 的橙黄色激光辐射, 由于缺乏能产生相应高效振荡基频光的激光晶体, 而无法通过二次谐波转换来实现. 该波段的激光辐射在一些领域有着极其重要的应用: 如医学领域利用高重复频率的脉冲黄光辐射进行无损伤治疗; 某些波长如 Nd : YAG 晶体产生的 588.9 nm 黄色激光与钠原子的特征谱线 589.0 nm 相当接近, 在很多场合可作为钠黄灯的理想取代光源; 此外在多光子分子分离方面, 激光彩色显示方面也有着广泛的应用前景.

目前在固体激光器方面产生橙黄色激光的途径主要有两种: 多数是利用双波长激光器进行和频, 得到橙黄色激光辐射, 文献[4~6]先后报道了利用 Nd : YAG、Nd : YVO₄ 脉冲双波长激光器通过 KDP、KD*P、LBO 晶体进行和频输出脉冲方式的黄色激光; 文献[7]报道了利用 Nd : YAP 连续运转的双波长激光器通过 KTP 晶体和频得到连续 598.1 nm 橙色激光辐射; 另一种方式是 H. M. pash^[8] 报道的利用 LBO 晶体对 Nd : YAG 的 1064 nm 谱线通过 LiIO₃ 晶体产生的受激拉曼频移 1155 nm 进行腔内倍频而产生 578 nm 的黄光辐射. 但上述报道多为脉冲方式的和频输出, 且多采用腔外和频, 非线性转换效率较低, 对连续运转的黄色激光辐射报道较少.

本文通过优化设计, 采用简单的线性直腔结构, 合理选取晶体长度、掺杂浓度, 合理分配和镀制谐振

腔内各单元部件的光学薄膜, 在国内首次成功实现了 LD 泵浦 Nd : YVO₄ 晶体的 1064 nm 和 1342 nm 激光的双波长连续运转, 并通过 I 类临界相位匹配 LBO 腔内和频获得 593.5 nm 的黄色激光连续输出.

1 理论分析

在增益介质中建立两条谱线的运转是实现和频输出的基本前提. 在一块激光晶体中由于基质晶格的作用, 掺杂离子的激光谱线也有所不同, 一般来说由于各谱线的受激发射截面、荧光寿命、量子效率各不相同, 这些参量直接与激光振荡密切相关, 所以激光运转通常发生在某一特定波长, 在一些特定情况下通过人为地对振荡较强谱线引入线性或非线性损耗来降低其竞争能力来调制较弱谱线的空间和幅变特性, 从而实现在同一增益介质中的双波长运转.

Nd : YVO₄ 晶体是一种高效的激光晶体, 具有较宽的吸收带宽, 较大的受激发射截面, 而且是各向异性的双折射晶体, 发射是线偏振的, 容易满足非线性频率转换时要求的相位匹配条件. 其能级结构如图 1. 处于 ⁴F_{3/2} 能级的 Nd³⁺ 离子可以向多个终端能级跃迁并产生辐射. 其中几率最大的是 ⁴F_{3/2} 至 ⁴I_{11/2} 的跃迁(波长为 1064 nm), 其受激发射截面积为 25 × 10⁻¹⁹ cm², 其次是 ⁴F_{3/2} 至 ⁴I_{13/2} 的跃迁(波长为 1342 nm), 其受激发射截面仍然较大, 约为 6 × 10⁻¹⁹ cm², 与

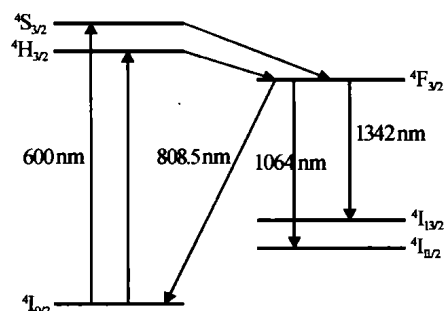


图 1 Nd : YVO₄ 晶体能级结构

Fig. 1 The energy level of Nd : YVO₄ crystal

* 国家高技术研究发展计划(2002AA311141)资助项目
Tel: 0431-5530043 Email: buyikun139@sohu.com
收稿日期: 2004-04-23

1064 nm 的分支比为 0.24, 同属于四能级系统的 1064 nm 和 1342 nm 两条谱线有着共同的激光上能级, 因此在实现双波长运转时对泵浦能量的积累必然会出现竞争。

根据激光二极管端面泵浦固体激光器的阈值公式^[9]可知

$$P_{th} = \frac{\pi hc(\omega_c^2 + \omega_p^2)\delta}{4\sigma\tau\lambda_p\eta_p}$$

其中 h 为普郎克常数, c 为光速, λ_p 为泵浦光波长, ω_c 和 ω_p 分别为泵浦光和激光的束腰半径, δ 为腔的损耗包括输出镜的透过率 T , σ 为受激发射截面积, τ 为晶体上能级寿命, η_p 为量子效率。由于束腰半径 $\omega_{1064} < \omega_{1342}$, 而且 $\sigma_{1064} > \sigma_{1342}$, 所以 $P_{th1064} < P_{th1342}$, 在相同的条件下, 1064 nm 谱线优先振荡。

这里直接给出稳态小信号下的和频光功率表达式, 即

$$P_3 = (\text{const})P_1P_2$$

式中 P_3 是和频辐射所获得的光功率, P_1 和 P_2 是两基频光的光功率, 根据和频理论, 为达到最佳的和频输出, 不仅要求两基频光的功率密度要高, 而且参与和频作用的两基频光 ν_1 和 ν_2 的腔内光子数要相等, 即 $N_1 = N_2$, 因为 $P_{1064} \propto h\nu_{1064} N_{1064}$, $P_{1342} \propto h\nu_{1342} N_{1342}$, h 为普郎克常数, ν_{1064} 和 ν_{1342} 为基频光频率, 所以要满足光子数平衡, 则有 $P_{1064}/P_{1342} = \nu_{1064}/\nu_{1342} = \lambda_{1342}/\lambda_{1064} = 1342/1064 = 1.26$, 也就是说 1064 nm 和 1342 nm 的腔内光功率要满足分支比为 1.26 这一条件。

根据上述分析可以看出, 由于 1064 nm 和 1342 nm 谱线增益不同, 双波长运转存在严重的谱线竞争, 要想实现最优化的和频输出, 必须对两基频光的损耗进行调谐, 以达到较好的增益匹配。这里我们采用增加谐振腔对 1064 nm 透射损耗的方法来实现。这就对膜系设计提出了相当严格的要求, 除了要尽量减少对弱谱线 1342 nm 的透射和反射损耗外, 降低其振荡阈值, 还要严格控制对 1064 nm 的透过率, 既不能太大也不能太小, 对 1064 的透过率太大, 造成 1064 nm 谱线输出损耗过大, 腔内光功率过低, 不利于和频; 对 1064 的透过率太小, 就会对其抑制不够, 与 1342 nm 谱线产生强烈的竞争, 严重时会将 1342 nm 的振荡完全抑制掉。实际中精确控制 1064 nm 输出镜的透射率值是非常困难的, 只有通过反复实验, 结合实际工艺, 找到对 1064 nm 的最佳透射率值。同时为有效的注入泵浦光并形成高质量的泵浦光斑, 应尽可能提高 Nd:YVO₄ 对 808 nm 的透过率。谐振腔采用单一增益介质的线性直腔, 设计简单, 结构紧凑, 且容易校准, 腔长尽可能短以

保证足够高的腔内功率, 采用 I 类临界相位匹配 LBO 腔内和频, 效率较高。

2 实验装置

实验装置如图 2, 该实验装置由三部分组成: 耦合光学系统, 谐振腔系统和温度调节系统。谐振腔采用通常的平凹腔结构, 泵浦源采用国产 LD, 18℃ 下中心发射波长为 807.5 nm, 发散角为 $8.2^\circ \times 34.5^\circ$, 最大输出功率为 2 W。温控系统采用半导体制冷器 TEC1 和 TEC2 分别对 LD, 激光晶体和和频晶体进行双路制冷, 通过精确调整制冷器 TEC1 的温控电流, 使 LD 发射谱中心处于 Nd:YVO₄ 晶体的吸收峰 808.9 nm 处, 泵浦光经耦合光学系统进行准直、扩束、聚焦后在 Nd:YVO₄ 晶体内形成束腰半径为 80 μm、椭圆度为 0.90 的泵浦光斑。Nd:YVO₄ 晶体尺寸为 3 mm×3 mm×2 mm, 沿 a 向切割, 钕离子掺杂浓度为 1.0atm%, 晶体入射面直接镀上介质高反膜作为谐振腔的一个端面, 输出镜为平凹镜, 凹面曲率半径为 50 mm, 作为谐振腔的另一端面。通过优化计算, 谐振腔长约 20 mm, 非线性晶体 LBO, 尺寸为 2 mm×2 mm×10 mm, 采用 I 类临界位相匹配。根据双波长运转的机制, 当基频光 1064 nm 和 1342 nm 同时运转时, 放入不同相位匹配角的 LBO 晶体, 可分别实现 1064 nm 的倍频(532 nm), 1342 nm 的倍频(671 nm)以及 1064 nm 和 1342 nm 的和频(593.5 nm)的红、绿、黄三色激光输出, 表 1 给出不同 LBO 晶体参数。

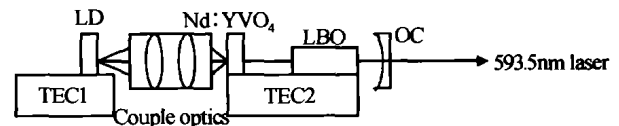


图 2 LD 泵浦的黄色激光器装置

Fig. 2 The setup of LD-pumped yellow laser

表 1 LBO 晶体非线性频率转换相应参数

LBO 晶体/ nm	相位匹配角 $\theta_m / (^\circ)$	方位角 $\varphi / (^\circ)$	有效非线性 系数 d_{eff}
532	90	11.3	0.832
671	86.1	0	0.817
593.5	90	2.5	0.837

为实现基频光 1064 nm 和 1342 nm 的同时运转, 并达到最优化和频输出, 必须合理分配谐振腔内各元件对 808 nm、1064 nm、1342 nm 以及和频后产生波长 593.5 nm 的透射和反射特性, 最主要的是合理搭配基频光 1064 nm 和 1342 nm 的透射能量比率, 实现其激光运转的增益匹配, 达到腔内光子数的平衡。在这里我们采用将谐振腔左端面即 Nd:YVO₄ 晶体的人射面反射率固定不变, 通过调整输出镜凹面对

1064 nm 的透过率来达到优化配比.

具体膜系要求: 1) Nd: YVO₄ 晶体入射面镀 808 nmAR, $T > 95\%$, 1064 nm 和 1342 nmHR, $R > 99.9\%$; Nd: YVO₄ 晶体出射面镀 1064 nm 和 1342 nmAR, $T > 99\%$; 2) 晶体 LBO 两端面均镀 1064 nm/1342 nm/593.5 nmAR; $T > 98\%$; 3) 平凹镜凹面镀 1342 nmHR, $R > 99.9\%$, 593.5 nmAR, $T > 95\%$, 1064 nm 部分透射, 通过反复实验得到输出镜凹面对 1064 nm $T = 2.7\%$ 时达到和频输出功率最大, 这样既从总体上降低了膜系设计的难度, 同时有效抑制了强谱线 1064 nm 的振荡, 使其与 1342 nm 的振荡达到合理匹配.

3 实验结果

在室温下先不放入晶体 LBO, 调节 LD 的工作电流, 在泵浦功率为 350 mW 时在和频光输出方向上观察到红外光输出, 加入和频晶体 LBO 后, 通过仔细调节, 在 LD 工作电流为 400 mA 时获得 593.5 nm 黄色激光输出, 通过调节制冷器 TEC1 和 TEC2, 加大制冷电流, 在泵浦功率为 1.8 W 时豁达 593.5 nm 黄光的最大输出, 测量时先用滤光片滤去红外光 808 nm、1064 nm、1342 nm 的干扰并用功率计接收测得 593.5 nm 黄光输出功率最大为 85 mW, 图 3 给出了 593.5 nm 黄光输出功率随泵浦注入功率的函数曲线图, 可以发现在由阈值到最大输出功率的过程中, 黄光输出出现两次小的波动, 分析原因可能是由于基频光 1064 nm 和 1342 nm 的增益竞争所导致的和频输出的不稳定. 通过放入另外两块 LBO 晶体进行腔内倍频, 先后得到 532 nm 绿光输出 102 mW, 671 nm 红光输出 78 mW, 从和频光、倍频光的输出特性上我们可以初步判断 1064 nm 和 1342 nm 的激光具有较好的空间重叠性和增益匹配特性, 光-光转换效率达 4.7%, 功率稳定性 24h

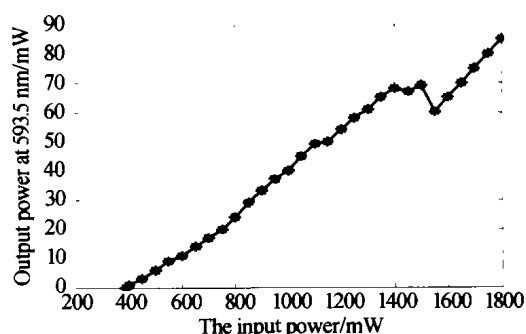


图 3 593.5 nm 黄光输出功率随注入泵浦功率的变化

Fig. 3 The output power of 593.5nm laser as a function of pump power

内为 $\pm 2.8\%$.

4 结论

从双波长激光运转及和频理论出发, 分析了影响实现双波长运转以及最优化和频输出的主要因素, 通过采用优化膜系设计减小 1064 nm 的反射率来增加其线性损耗的办法对其进行调制使腔内运转光子数达到基本平衡, 以达到与弱谱线 1342 nm 的增益匹配. 国内实现了 LD 泵浦 Nd: YVO₄ 晶体中 1064 nm 和 1342 nm 谱线双波长连续运转, 并通过 LBO 晶体腔内和频获得 85 mW 的 593.5 nm 黄色激光的连续输出. 目前该实验正在进一步进行中, 通过优化膜系, 有望进一步提高黄光的输出功率.

参考文献

- 田丰, 解慧明, 陈浩伟, 等. 半导体激光端泵腔内倍频 Nd: YVO₄/LBO 连续波 8 W 绿光激光器. 光子学报, 2004, **33**(6): 651~653
Tian F, Xie H M, Chen H W, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 651~653
- 郑权, 陈颖新, 钱龙生. LD 泵浦 Nd: YAG/LBO 结构 660nm 红光激光器. 光子学报, 2003, **32**(10): 1153~1155
Zhen Q, Chen Y X, Qian L S. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(10): 1153~1155
- 高兰兰, 檀慧明. 利用复合 Nd: YAG 实现 600 mW 高效紧凑型蓝光激光器. 光子学报, 2004, **33**(1): 8~10
Gao L L, Tan H M. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1): 8~10
- Bethea C G. Megawatt power at 1.318 μm in Nd: YAG and simultaneous oscillation at both 1.06 μm and 1.318 μm . *IEEE Quantum Electron*, 1973, **QE-9**(2): 254~258
- Volmar W, Knights M G, Rines G A, et al. Conference on laser and electro-optics. *Digest of Technical Papers*, 1983, **17**(2): 188~189
- Chen Y F, Tsai S W. Diode-pumped Q-switch Nd: YVO₄ yellow laser with intracavity sum-frequency mixing. *Optics Letter*, 2002, **27**(6): 397-399
- Shen Hongyuan, Zhou Yuping, Lin Wenxiong, et al. 0.5981 μm sum frequency mixing in KTP crystals. *Chinese Physics Letter*, 1991, **8**(4): 215~217
- Pask H M, Piper J A. Efficient all-solid-state yellow laser source producing 1.2 W average power. *Optics Letter*, 1999, **24**(21): 1490~1492
- Fan T Y, Kokta M R. End-pumped Nd: LaF₃ and Nd: LaMgAl₁₁O₁₉ laser. *IEEE J Quantum Electron*, 1989, **25**(8): 1845~1849

Diode-pumped Nd : YVO₄ CW 593.5 nm Yellow Laser with LBO Intracavity Sum-frequency Mixing

Bu Yikun^{1,2}, Zheng Quan¹, Xue Qinghua^{1,2}, Cheng Yingxin¹, Qian Longsheng¹

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130022

² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Received date: 2004-04-23

Abstract A design of LD-pumped Nd : YVO₄ laser that generates simultaneous laser action at the wavelengths 1064 nm and 1342 nm by optimizing film design is presented. An optimized CW 593.5 nm yellow laser at room temperature is obtained for the first time. Using type-I critical phase-matching LBO crystal, 593.5 nm yellow laser is obtained by 1064 nm and 1342 nm intracavity sum-frequency mixing. The maximum laser output power of 85 mW is obtained when a incident pump laser of 1.8 W is used. The optical-to-optical conversion up to 4.7%, the power instability in 24 h better than $\pm 2.8\%$.

Keywords LD-pumped; Dual-wavelength operation; Intracavity sum-frequency mixing; Yellow laser



Bu Yikun was born in 1979, in Hebei Province, China. He graduated from Changchun Science and Technology University in 1998, majored in fine mechanical engineering. Since then he has studied in Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences for Ph. D. degree, mainly in LD pumped all solid-state laser and designing fabricating on high-damage induced threshold optical thin film.