

LD 泵浦 Nd:YVO₄ 晶体 LBO 倍频 457 nm 蓝色激光器*

卜轶坤^{1,2} 陈颖新¹ 郑 权¹ 薛庆华^{1,2} 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, 在室温下获得 914 nm 激光连续输出, 用 I 类临界位相匹配 LBO 腔内倍频获得 457 nm 蓝色激光输出. 当泵浦注入功率为 1.7 W 时倍频蓝光最大输出达 20 mW, 光光转换效率为 1.2%, 功率稳定性 24 h 内优于 ±3%.

关键词 LD 泵浦; 准三能级; LBO 倍频; 蓝色激光器

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

0 引言

在近几年, 随着半导体激光器功率的不断提高, LD 泵浦的全固态全色激光器已取得了长足的进步, 尤其是利用倍频技术产生蓝色激光器, 一直是国际上的热点课题. 实现 LD 泵浦全固态蓝色激光器主要是采用 LD 泵浦 Nd:YAG/Nd:YVO₄ 晶体实现 946 nm 或 914 nm 波长的室温运转, 再通过倍频晶体输出 473 nm 或 457 nm 的蓝光. 目前在该领域的研究主要集中在 LD 泵浦 Nd:YAG 输出 473 nm 的蓝光, 已有大量文献报道^[1-3]. 457 nm 深蓝光同 473 nm 蓝光相比具有颜色更饱满、波长更短、光子能量大、光点面积小的优点, 使其在高密度数据存储、激光彩色显示、水下通讯、海洋资源探测和光量子学分析上有着更为广阔的应用前景. 但由于同属于准三能级系统的 Nd:YVO₄ (914 nm) 和 Nd:YAG (946 nm), 在室温下运转 Nd:YVO₄ 激光下能级粒子数比 Nd:YAG 占能级粒子总数比例更大, 导致激光阈值更高, 使 Nd:YVO₄ 的准三能级系统实现起来更为困难, 因而关于 457 nm 蓝色激光器的进展比较缓慢, 对 LD 泵浦 Nd:YVO₄ 实现 457 nm 蓝光报道较少^[4].

本文通过优化设计, 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, 成功的实现了 Nd:YVO₄ 的 914 nm 激光振荡, 并通过 I 类临界位相匹配 LBO 腔内倍频获得 457 nm 蓝光输出.

1 理论分析

1.1 Nd:YVO₄ 晶体能级结构及 914 nm 的高效振荡条件

914 nm 谱线属于准三能级系统的 ⁴F_{3/2} → ⁴I_{9/2} 之

间的跃迁, 产生 914 nm 的激光下能级是基态的 Stark 分裂子能级, 晶格分裂数值为 433 cm⁻¹^[5], 这一能级数比较小. 因此在室温下激光下能级仍有粒子数, 增加了激光的阈值. 同 Nd:YAG 相比, 该能级占有粒子总数比例更大, 而且 Nd:YVO₄ 晶体的热性能要比 Nd:YAG 差, 因此 Nd:YVO₄ 准三能级系统实现更为困难. Nd:YVO₄ 晶体的能级结构如图 1.

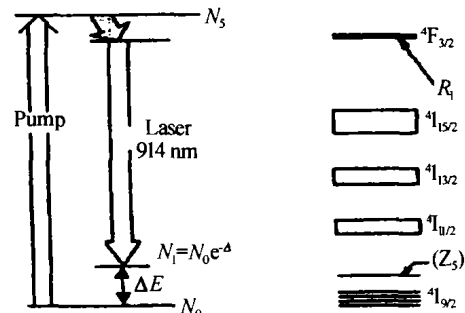


图 1 Nd:YVO₄ 晶体在 914 nm 处的能级结构
Fig. 1 Structure of energy level for Nd:YVO₄ at 914 nm

作为激活介质, Nd:YVO₄ 有 914 nm、1064 nm、1342 nm 三条激光谱线. 当选取不同谱线形成激光振荡时, 经过倍频可以得到包括蓝色 (457 nm)、绿色 (532 nm) 和红色 (671 nm) 的三基色激光输出, 其中 1064 nm 和 1342 nm 的发射截面都比 914 nm 要大, 产生 914 nm 跃迁的受激辐射截面比 1064 nm 跃迁小近一个数量级, 腔内存在严重的寄生振荡. Nd:YVO₄ 晶体的发射光谱如图 2.

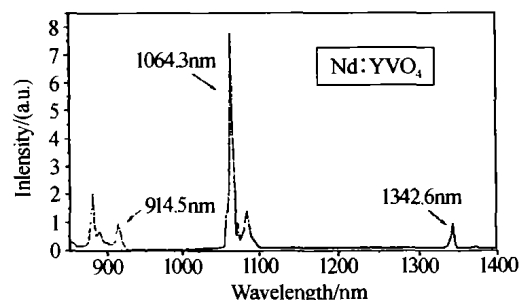


图 2 Nd:YVO₄ 晶体的发射光谱
Fig. 2 The emission spectra of Nd:YVO₄ crystal

因此要想实现 914 nm 的激光振荡, 必须首先抑

* 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: 2003-12-29

制 1064 nm 和 1342 nm 起振,尤其是对 1064 nm 必须严格抑制. 一般采用增加谐振腔对 1064 nm 和 1342 nm 的透射损耗的方法来实现. 另外对基频光 914 nm 的镀膜要求非常严格. 除了要尽量减少对基频光 914 nm 的透射和反射损耗外,还要尽量提高对 1064 nm 和 1342 nm 的透射率,最大限度降低 1064 nm 和 1342 nm 与 914 nm 的谱线竞争. 通过优化计算,综合考虑,在系统对 1064 nm 和 1342 nm 的透射率大于 90%、914 nm 反射率大于 99.9% 时可使 914 nm 在较大泵浦功率时形成激光振荡. 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.

1.2 激光阈值和晶体的最佳长度

这里直接给出激光阈值的表达式^[6,7]

$$P_{p,th} = \frac{\pi h \nu_p (\omega_i^2 + \omega_p^2) (L + T + 2f_1 \sigma N_0 l)}{4\sigma \tau [1 - \exp(-\alpha l)] f} \quad (1)$$

式(1)中 $h\nu_p$ 为泵浦光能量, L 为腔的内部损耗, T 为输出镜的透过率, ω_i 为激光的束腰半径, ω_p 为泵浦光的束腰半径, f_1 为激光下能级占总粒子数的比例, N_0 为晶体的掺杂浓度, σ 为受激发射发射截面, τ 为能级寿命, f 为 914 nm 能级上室温下激光下能级和上能级粒子数占多重态上总粒子数的比例之和. 由式(1)可以看出激光阈值与 $(\omega_i^2 + \omega_p^2)$ 成正比,即要求泵浦光和激光束腰半径尽可能小,以降低阈值. 由于分子/分母同时存在晶体长度 l , 显然存在一个最佳长度使阈值最低,通过激光阈值对长度求微分,得到晶体最佳长度 l_0 .

$$\alpha \exp(-\alpha l_0) \left(\frac{2\sigma N_0^0}{\alpha} + L + T + 2\sigma N_0^0 l_0 \right) - 2\alpha N_0^0 = 0 \quad (2)$$

在 Nd:YVO₄ 晶体中, Nd³⁺ 离子的荧光寿命与其掺杂浓度密切相关. 掺杂浓度越高 Nd³⁺ 离子的荧光寿命 τ 就越低,表 1 给出了不同掺杂浓度下 Nd³⁺ 荧光寿命. 由式(1)可知,激光阈值 $P_{p,th}$ 与 τ 成反比,与掺杂浓度 N_0 成正比;同时掺杂浓度越高,晶体的吸收系数会随之增大,导致激光下能级再吸收严重,同样会增加 914 nm 振荡的激光阈值. 为此我们选用低掺杂浓度的 Nd:YVO₄ 晶体,综合考虑晶体长度选取 1 mm,略大于晶体的最佳长度,以提高对泵

表 1 不同 Nd³⁺ 浓度的 Nd:YVO₄ 晶体中 Nd³⁺ 离子的荧光寿命

Nd concentration in melt/atm%	Nd concentration in Crystal/atm%	Fluorescence lifetime / μ s
1.0	0.64	105
2.0	1.22	95
3.0	1.89	85

浦光的吸收效率.

2 实验装置

实验装置如图 3. 该实验由耦合光学系统、温控系统和谐振腔系统. 泵浦源采用中科院半导体所生产的 LD, 18℃ 下中心发射波长为 807.5 nm, 发散角为 8.2° × 34.5°, 标称最大输出功率为 2 W, 发光结尺寸为 1 × 100 μ m². 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 吸收峰 808.5 nm 处. LD 发出的光经耦合光学系统进行准直、扩束、聚焦,在 Nd:YVO₄ 晶体内形成束腰半径为 80 μ m、椭圆度为 0.90 的高质量泵浦光. Nd:YVO₄ 晶体左端面作为谐振腔的一个镜面,平凹输出镜曲率半径为 50 mm,其耦合输出率为 15%. 谐振腔的另一镜面,腔长约 20 mm, Nd:YVO₄ 晶体尺寸为 3 mm × 3 mm × 1 mm, α 切割,掺杂浓度 N_0 为 1.0atm%,倍频晶体 LBO 的尺寸为 2 mm × 2 mm × 10 mm,采用 I 类临界相位匹配. Nd:YVO₄ 晶体和倍频晶体 LBO 放置在制冷器 TEC2 上. 取输出镜 $R_2 = 50$ mm, $R_1 = \infty$, 根据 ABCD 定律,通过计算机编程对激光束腰半径进行计算求得 $\omega_i = 85.4$ μ m, LD 泵浦光斑半径为 80 μ m 基本满足模式匹配条件,有利于基频光 914 nm 的高效振荡. 由于 Nd:YVO₄ 晶体热性能差,当温度升高时使下能级粒子数更多,转换效率更差;晶体温度过高时各种作用的综合使激光腔损耗增加,导致激光器阈值升高,因此必须对其进行严格的致冷. 这里通过精确调整半导体致冷器 TEC1 和 TEC2 对 LD 以及 Nd:YVO₄/LBO 进行双路致冷,温控精度为 0.02℃.

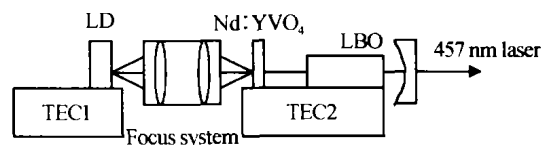


图 3 LD 泵浦的蓝光激光器装置
Fig. 3 The setup of LD-pumped blue laser

为实现基频光 914 nm 的高效振荡,必须合理分配谐振腔内各元件对 808 nm、1064 nm、1342 nm、914 nm 以及倍频后产生的 457 nm 的透射和反射特性. 图 3 中激光谐振腔由 Nd:YVO₄ 的入射面和平凹镜的凹面构成. 具体膜系要求为: Nd:YVO₄ 的入射面镀 808 nmHT, 914 nmHR, 1064 nm/1342 nmHT; Nd:YVO₄ 的出射面镀 914 nm&457 nm HT; LBO 两端面均镀 914 nm&457 nmHT, 平凹镜左端面镀 914 nmHR, 457 nmHT, 1064 nm&1342 nmHT, 在同一元件各镀膜要求出现不能避免的矛盾时应优先满足 914 nm 的要求. 同时对 1064 nm 的抑制要充分考

虑. 在这里我们将膜系进行了优化设计;对Nd:YVO₄晶体入射面的1064 nm和1342 nm提出了较高的透射率要求. 因为该入射面作为谐振腔的一个端面, 当它对1064 nm和1342 nm透过率足够高时, 谐振腔的其他几个面可对1064和1342降低要求, 这样既从总体上降低了膜系设计的难度, 同时也有效地抑制了1064 nm和1342 nm的激光振荡. 这里我们给出设计难度较大的激光谐振腔两端面R₁和R₂的膜系设计结构和设计曲线: YVO₄晶体入射面R₁的膜系结构: YVO₄/1.54L17 [HL] H0.685L/air; 设计曲线如图4; 平凹输出镜左端面R₂膜系结构: glass/0.925H0.547L14 [HL] 0.7H0.92L1.15H1.595L/air; 设计曲线如图5, 其中H为Ta₂O₅, L为SiO₂, 设计中心波长: 914 nm.

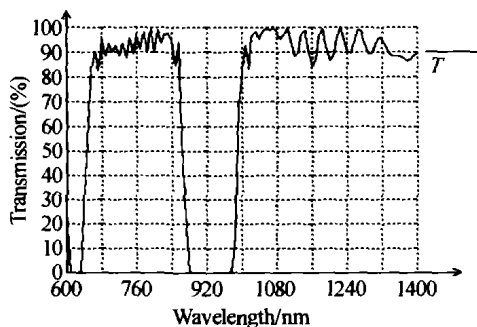


图4 Nd:YVO₄晶体入射面膜系曲线

Fig. 4 Transmission curve of incident face on Nd:YVO₄ crystal

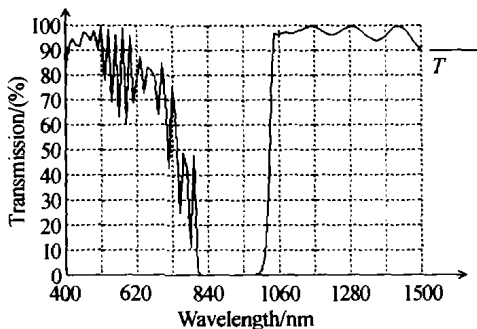


图5 平凹输出镜左端面膜系曲线

Fig. 5 Transmission curve of left face on output mirror

3 实验结果

在LD工作电流为2.0 A时测的实际入射到Nd:YVO₄上的泵浦功率为1.7 W, 加入蓝光输出镜后有红外光输出, 用滤光片滤去泵浦光808 nm的干扰用功率计测得16 mW的914 nm基频光输出, 将倍频晶体LBO插入谐振腔得到457 nm深蓝激光输出. 测量时先用滤光片滤去红外光808 nm和914 nm的干扰并用功率计接收, 探测到457 nm蓝激光输出功率最大为20 mW. 图6给出了457 nm蓝色激光输出功率随泵浦注入功率的函数曲线图, 光光转换效率达1.2%, 功率稳定性24 h内优于±3%.

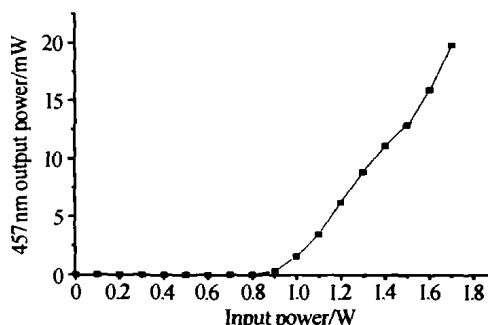


图6 457 nm 蓝光输出功率随注入泵浦功率的变化

Fig. 6 The output power of 457 nm laser as a function of pump power

4 结论

本文从准三能级系统激光产生和倍频理论出发, 分析了影响基频光振荡的主要因素, 通过采取减小泵浦光和激光的束腰半径, 合理选取晶体长度和掺杂浓度, 优化膜系设计, 在室温条件下实现了Nd:YVO₄晶体的914 nm波长激光运转, 并利用LBO晶体腔内倍频获得20 mW的457 nm连续蓝光输出, 目前, 该实验正在进一步进行中, 通过优化膜系设计, 有望进一步提高蓝光的输出功率.

参考文献

- 1 Pruneri V, Koch R, Kazansky P G, et al. 49 mW of CW blue light generated by first-order quasia-phase-matched frequency doubling of a diode-pumped 946 nm Nd:YAG. *Opt Lett*, 1995, **20**(23): 2375 ~ 2377
- 2 杜戈果, 朱鹤元, 朱九皋, 等. 用于准相位匹配的LD泵浦Nd:YAG 946 nm连续激光光源. *光子学报*, 2001, **30**(8): 973 ~ 975
Du G G, Zhu H Y, Zhu J G, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(8): 973 ~ 975
- 3 Du Geguo, Ruan Shuangchen, Zhu Qin, et al. Ld-pumped Nd:YAG laser at 946 nm and frequency doubling. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(11): 1392 ~ 1395
- 4 刘伟仁, 霍玉晶, 何淑芳. 激光二极管抽运的全固体457 nm深蓝激光器. *光学学报*, 2002, **22**(8): 980 ~ 982
Liu W R, Huo Y J, He S F. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 980 ~ 982
- 5 Zeller P, Peuser P. Efficient, multi-watt, continuous-waves laser operation on the ⁴F_{3/2}-⁴I_{9/2} transition of Nd:YVO₄ and Nd:YAG. *Opt Lett*, 2000, **25**(1): 34 ~ 36
- 6 Freitag I, Henking R, Tunnermann A, et al. Quasi-three-level room-temperature Nd:YAG ring laser with high single-frequency output power at 946 nm. *Opt Lett*, 1995, **20**(24): 2499 ~ 2501
- 7 Hanson H. Efficient operation of a room-temperature Nd:YAG 946 nm laser pumped with multiple diode arrays. *Opt Lett*, 1995, **20**(2): 148 ~ 150

LD-pumped Nd:YVO₄ Crystal LBO Frequency-doubling 457nm Blue Laser

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

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

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

Received date: 2003-12-29

Abstract A design of LD-pumped Nd:YVO₄/LBO blue laser at 457 nm is presented in the paper. An optimized-designed CW 914 nm laser at room temperature is obtained. Using type-I critical phase-matching LBO crystal, 457 nm blue laser is obtained by 914 nm intracavity frequency doubling. The maximum laser output power of 20 mW is obtained when a incident pump laser of 1.7 W is used. The optical-to-optical conversion is up to 1.2%, the power instability in 24 h is better than $\pm 3\%$.

Keywords LD-pumped; Quasia-three-level; LBO frequency-doubling; Blue 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 research in LD pumped all solid-state blue laser and designing, fabricating on high-damage threshold optical thin film.

