

文章编号: 1001-4322(2005)S0-0019-05

LD 泵浦 Nd:YAG 946 nm/1 064 nm 双波长运转及腔内和频

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(LD)端面泵浦 Nd:YAG 晶体, 通过优化激光谐振腔反射膜系, 调节 1 064 nm 谱线的线性损耗以达到与弱谱线 946 nm 的增益匹配, 在室温下实现 1 064 nm 和 946 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 500.8 nm 青色激光连续输出。当泵浦注入功率为 1.4W 时和频青色激光最大输出达 20 mW, 光-光转换效率为 1.4%, 功率稳定性 24 h 内优于 $\pm 3\%$ 。

关键词: LD 泵浦; 双波长运转; 腔内和频; Nd:YAG

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

双波长的同时运转在非线性和频率转换、激光医学上引起人们的广泛兴趣^[1], 是一种非常有用的光源, 采用脉冲方式的双波长激光器已经有许多报道: Nd:YAG 中的 1 064 nm 和 1 319 nm^[2]; Nd:YAP 中 1 079 nm 和 1 341 nm^[3], 连续方式的运转在 Nd:YVO₄ 中也已经被报道^[4], 文献[5]对激光晶体 Nd:YAG, Nd:YLF, Nd:YAP 中 $^4F_{3/2} - ^4I_{11/2}$ 和 $^4F_{3/2} - ^4I_{13/2}$ 的双波长同时发射的条件进行了理论分析, 认为掺 Nd 离子激光晶体在脉冲方式下更容易实现双波长乃至多波长的同时运转, 而连续运转较为困难, 但上述双波长激光器多是通过灯泵来实现, 效率较低。近年来, 激光二极管(LD)泵浦的全固体激光器因其结构紧凑、效率高、寿命长等优点获得了广泛的应用。通过对激光二极管泵浦的掺 Nd 离子激光器腔内倍频, 已获得了红、绿、蓝三原色激光输出^[6-8], 而通过 LD 泵浦激光晶体实现双波长输出, 报道很少。Nd:YAG 作为一种性能优良的激光晶体, 人们对其已进行了广泛的研究, 它主要有 1 064, 1 319, 946 nm 三条发射谱线, 由于 946 nm 发射谱线属于准三能级结构, 增益较低, 阈值较高, 不易获得激光输出, 而 1 064 nm 和 1 319 nm 同属于四能级结构, 容易获得激光输出, 故已见报道多为 1 064 nm 和 1 319 nm 的双波长激光器以及其腔外和频获得 588.9 nm 的黄色激光输出。

本文采用一种新的双波长运转方式, 利用简单的线性平凹腔结构, 和单一的增益介质, 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, 在国内首次成功实现了 LD 泵浦 Nd:YAG 晶体的 1 064 nm 和 946 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 500.8 nm 的青色激光输出。

1 理论分析

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的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:YAG 晶体主要有 1 064, 1 319, 946 nm 三条发射谱线, 分别对应的是 $^4F_{3/2} - ^4I_{9/2}$, $^4F_{3/2} - ^4I_{11/2}$, $^4F_{3/2} - ^4I_{13/2}$ 的跃迁, 其中 1 064 nm 和 1 319 nm 属于四能级系统, 而 946 nm 属于准三能级系统。三条谱线的激光特性比较如表 1 所示, 从表 1 可以看出, 由于 946 nm 的受激发射截面最小, 且属于准三能级结构, Nd 离子在基质晶格场的作用下发生 Stark 能级分裂, 基态分裂成 5 个子能级 $Z_1 \sim Z_5$, 各个子能级粒子数占基态总粒子数的比例遵从玻耳兹曼分布, 其中 Z_5 子能级占基态总粒子数的 0.74%。946 nm 激光的下能级便是存在一定粒子数的 Z_5 子能级。由于下能级粒子数的存在, 振荡阈值较高不易获得激光输出, 在实现激光运转时与 1 064 nm 和 1 319 nm 存在严重的谱线竞争, 要想实现

* 收稿日期: 2004-11-22; 修订日期: 2005-01-20

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 卜轶坤(1979—), 男, 河北省人, 现在中国科学院长春光机物理所攻读光学专业博士学位, 主要从事 LD 泵浦全固态激光器及大功率激光反射膜的研究; E-mail: buyikun139@163.com。

粒子数反转,就必须有很强的泵浦功率密度。这里采用激光二极管端面泵浦,光斑半径小,光束匹配好,有利于提高泵浦光的功率密度。由于 946 nm 振荡阈值较高,对 1 064 nm 和 1 319 nm 和频影响很小,在设计激光腔镜时可不予考虑,所以常见的和频 Nd:YAG 激光器都是针对 1 064 nm 和 1 319 nm 两个波长进行的和频。而对于 1 064 nm 和 946 nm 的双波长运转,由于激光阈值 $P_{th,1064} < P_{th,946}$,所以在相同的条件下 1 064 nm 谱线优先振荡。同时由于激光阈值 $P_{th,1319} < P_{th,946}$,为保证 946 nm 的高效振荡,还应对 1 319 nm 谱线进行有效的抑制,最大限度减小其与 1 064 nm 和 946 nm 的谱线竞争。

表 1 Nd:YAG 中各主要谱线的激光特性比较

Table 1 Comparison of laser performances of the Nd:YAG at main laser transitions

/ nm	transition	/ 10^{-20} cm^2	ν / cm^{-1}	(branching ratios)	relative performance
1 064	R ₂ - Y ₃	45.8	5	0.135	100
946	R ₁ - Z ₅	5.1	9	0.040	46
1 319	R ₁ - X ₁	8.9	6	0.018	34

稳态小信号下的和频光功率为

$$P_3 = (\text{const}) P_1 P_2 \quad (1)$$

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 $P_{1064} = h \nu_{1064} N_{1064}$, $P_{946} = h \nu_{946} N_{946}$, h 为普朗克常数, ν_{1064} 和 ν_{946} 为基频光频率,所以要满足光子数平衡,则有 $P_{946} / P_{1064} = \nu_{946} / \nu_{1064} = \nu_{1064} / \nu_{946} = 1.12$,也就是说 946 nm 和 1 064 nm 的腔内光功率要满足分支比为 1.12 这一条件。

根据上述分析可以看出,由于 1 064 nm 和 946 nm 谱线增益不同,要实现最优化和频输出,必须对两基频光的损耗进行调谐以达到较好的增益匹配。由于激光谐振腔采用简单的线性平凹腔结构,所以对 1 064 nm 和 946 nm 的能量调谐只能通过谐振腔反射镜来实现。这里我们采用增加谐振腔对 1 064 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 946 nm 的透射和反射损耗外,降低其振荡阈值,还要严格控制对 1 064 nm 的透过率,既不能太大也不能太小,对 1 064 的透过率太大,造成 1 064 nm 谱线输出损耗过大,腔内光功率过低,不利于和频;对 1 064 的透过率太小,就会对其抑制不够,与 946 nm 谱线产生强烈的竞争,严重时会将 946 nm 的振荡完全抑制掉。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,为获得和频 500.8 nm 青色激光的高效输出,在输出镜反射面还应对 500.8 nm 实现高的透过率。

为实现基频光 1 064 nm 和 946 nm 的双波长运转,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, 946, 1 064, 1 319 nm 以及和频后产生波长 500.8 nm 的透射和反射特性,最主要的是合理搭配基频光 1 064 nm 和 946 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:YAG 晶体的入射面反射率固定不变,通过调整输出镜凹面对 1 064 nm 的透过率来达到优化配比。实际中精确控制 1 064 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 1 064 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 1 所示,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 W 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

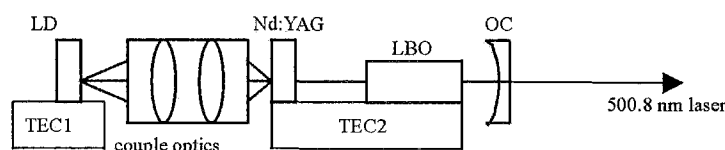


Fig. 1 Setup of LD-pumped 500.8 nm laser

图 1 LD 泵浦的 500.8 nm 激光器装置

输出功率为 1.8 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:YAG 晶体的吸收峰 808 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:YAG 晶体尺寸为 φ4 mm × 3 mm,沿 a 向切割,钕离子掺杂浓度为 1.0%,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 1 064 nm 和 946 nm 同时运转时,放入不同相位匹配角的 LBO 晶体,可分别实现 1 064 nm 的倍频(532 nm)、946 nm 的倍频(473 nm)以及 1 064 nm 和 946 nm 的和频 500.8 nm 的红、绿、青三色激光输出。为实现基频光 1 064 nm 和 946 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、1 064、946、1 319 nm 以及和频后产生波长 500.8 nm 的透射和反射特性,最主要的是合理搭配基频光 1 064 nm 和 946 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:YAG 晶体的入射面反射率固定不变,通过调整输出镜凹面对 1 064 nm 的透过率来达到优化配比。具体膜系要求:(1) Nd:YAG 晶体入射面镀 808 nmAR, $T > 95\%$, 1 064 nm 和 946 nmHR, $R > 99.9\%$; 1 319 nm $T > 90\%$, Nd:YAG 晶体出射面镀 1 064 nm 和 946 nmAR, $T > 99\%$;(2) 晶体 LBO 两端面均镀 1 064 nm/946 nm/500.8 nmAR; $T > 99\%$;(3) 平凹镜凹面镀 946 nmHR, $R > 99.9\%$, 500.8 nmAR, $T > 95\%$, 1 064 nm 部分透射,通过反复实验得到输出镜凹面对 1 064 nm $T = 10\%$ 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 1 064 nm 的振荡,使其与 946 nm 的振荡达到合理匹配。图 2、图 3 为谐振腔镜的膜系设计曲线。

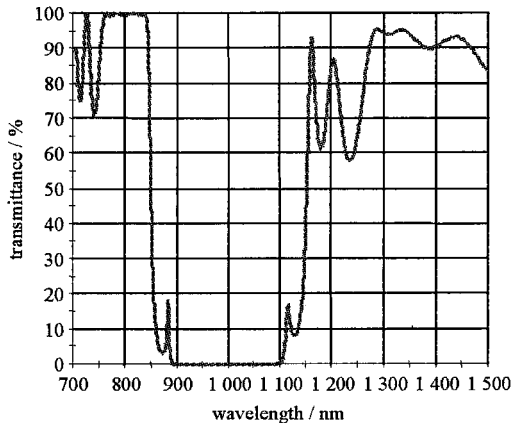


Fig. 2 Transmission curve of incident face on Nd:YAG

图 2 Nd:YAG 晶体入射面膜系透射曲线

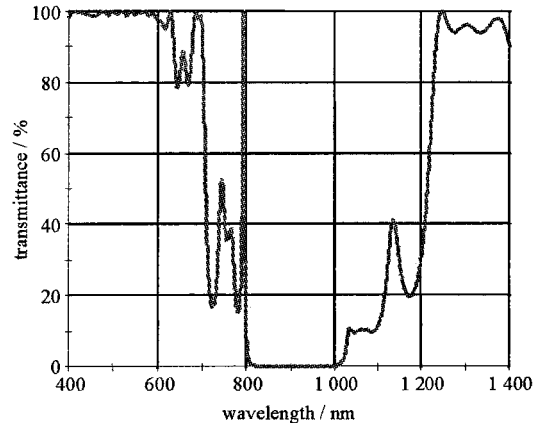


Fig. 3 Transmission curve of left face on output mirror

图 3 平凹输出镜左端面膜系曲线

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 390 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 输出功率为 400 mW 时获得 500.8 nm 青色激光输出,通过调节制冷器 TEC1 和 TEC2,加大制冷电流,在泵浦功率为 1.4 W 时获得 500.8 nm 青色激光的最大输出,测量时先用滤光片滤去红外光 808、946、1 064 nm 的干扰并用功率计接收测得青光输出功率最大为 20 mW,图 4 给出了 500.8 nm 青光输出功率随泵浦注入功率的函数曲线图,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 23 mW,473 nm 蓝光输出 28 mW,从和频光、倍频光的输出特性上我们可以初步判断 1 064 nm 和 946 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 1.4%,功率稳定性 24 h 内为 $\pm 3\%$ 。

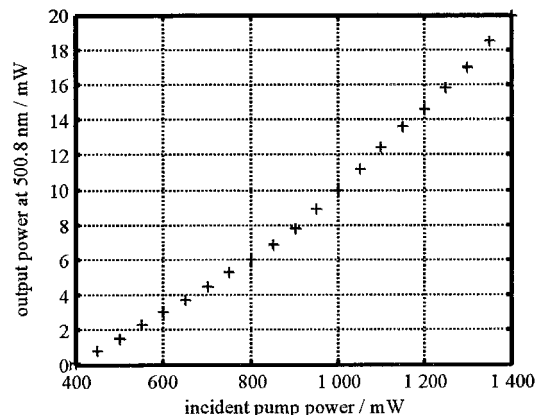


Fig. 4 Output power of 500.8 nm laser as a function of pump power

图 4 500.8 nm 激光输出功率随注入泵浦功率的变化

4 结 论

本文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 1 064 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 946 nm 的增益匹配。在国内首次实现了 LD 泵浦 Nd:YAG 晶体中 1 064 nm 和 946 nm 谱线双波长连续运转,并通过 LBO 晶体腔内和频获得 20 mW 的 500.8 nm 青色激光的连续输出。目前该实验正在进一步进行中,通过优化膜系,有望进一步提高青光的输出功率。

参考文献:

- [1] Morgn R A, Hopf F A, Peyghambarian N. Dual-frequency Nd:YAG laser for the study and application of nonlinear optical crystals[J]. *Opt Eng*, 1987, **26**:1240—1244.
- [2] Bethea C G. Megawatt power at 1.318 μm in Nd:YAG and simultaneous oscillation at both 1.06 μm and 1.318 μm [J]. *IEEE J Quantum Electronics*, 1973, **9**(2):254—258.
- [3] Shen H Y, Lian T Q, Zhen R R, et al. Measurement of the stimulated emission cross section for the $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ transition of Nd^{3+} in YAlO_3 crystal. *IEEE J Quantum Electronics*, 1989, **25**(2):144—146.
- [4] Chen Y F. CW dual-wavelength operation of a diode-end-pumped Nd:YVO₄ laser[J]. *Appl Phys B* 70, 2000, 475—478.
- [5] Shen H Y. Oscillation condition of simultaneous multiple wavelength lasing[J]. *Chin Phys Lett*, 1990, **7**(4):174—176.
- [6] 郑权,薛庆华,王军营,等. LD 泵浦 1.2 W 连续 Nd:YAG/LBO 红光激光器[J]. *激光与红外*, 2004, **34**(1):24—26. (Zheng Q, Xue Q H, Wang J Y, et al. LD pumped 1.2 W Nd:YAG/LBO CW red laser. *Laser and Infrared*, 2004, **34**(1):24—26)
- [7] Chen Y F, Huang T M, Wang C L, et al. Compact and efficient 3.2 W diode-pumped Nd:YAG/KTP green Laser[J]. *Appl Opt*, 1998, **37**(24):5727—5730.
- [8] 刘伟仁,钱龙生,檀慧明,等. LD 泵浦的 946 nm Nd:YAG 激光器及腔内倍频 473 nm 蓝光输出[J]. *激光杂志*, 2000, **21**(3):12—13. (Liu W R, Qian L S, Tan H M, et al. LD pumped 946 nm Nd:YAG laser and intracavity second harmonic generation at 473 nm. *Journal of Laser*, 2000, **21**(3):12—13)

LD-pumped Nd:YAG 946 nm/1 064 nm laser dual-wavelength operation and intracavity sum-frequency mixing

BU Yi-kun^{1,2}, ZHENG Quan¹, XUE Qing-hua^{1,2}, CHENG Ying-xin¹, QIAN Long-sheng¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: An LD-pumped Nd:YAG laser that generates simultaneous laser action at the wavelengths 1 064 nm and 946 nm by optimizing film design is presented. An optimized CW 593.5 nm yellow laser at room temperature was obtained for the first time. Using type-I critical phase-matching LBO crystal, 500.8 nm laser was obtained by 1 064 nm and 946 nm intracavity sum-frequency mixing for the first time. The maximum laser output power of 20 mW was obtained when an incident pump laser of 1.4 W was used. The optical-to-optical conversion was up to 1.4% and the power instability in 24 h was better than $\pm 3\%$.

Key words: LD-pumped; Dual-wavelength operation; Intracavity sum-frequency mixing; Nd:YAG