

1.1 μm 波段 Nd:YAG 激光运转及其腔内倍频^{*}

贾富强^{**}, 薛庆华, 郑 权, 卜铁坤, 钱龙生

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

摘要:为了提高 Nd:YAG/LBO 腔内倍频黄光激光器输出功率的稳定性,通过在腔内插入 F-P 标准具选择出单一激光谱线来实现,同时通过 F-P 标准具的角度调谐还得到了 1.1 μm 波段 3 条分离谱线的单独倍频运转。用 2 W LD 抽运 Nd:YAG,腔内加入 150 μm 厚的熔石英 F-P 标准具,先通过 F-P 标准具放置角度的调节获得单一谱线的基频光运转,再通过 LBO 腔内倍频获得高稳定性的黄光输出,在 1.6 W 的抽运功率下,556 nm、558 nm 和 561 nm 的输出功率分别为 85 mW、65 mW 和 71 mW,光-光转换效率分别为 5.31%、4.06% 和 4.68%。

关键词:LD 抽运固体激光器; F-P 标准具; 黄光激光器; 腔内倍频; LBO

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2005)07-0788-05

Nd:YAG Lasers Operated at 1.1 μm and Intracavity Frequency-doubling

JIA Fu-qiang^{**}, XUE Qing-hua, ZHENG Quan, BU Yi-kun, QIAN Long-sheng

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to improve the stability of the output power of the Nd:YAG/LBO intracavity-frequency doubling yellow laser, we inserted the F-P etalon into the cavity to obtain the single laser line, and at the same time the three laser line at 1.1 μm waveband solely operated through the angle tuning. In this paper, we use the 2 W LD end-pumped the Nd:YAG, insert 150 μm thickness F-P etalon into the cavity, by the tuning of alignment angle of the F-P etalon, firstly, we obtain the fundamental laser operation of the single line, then the yellow laser is obtained by LBO intracavity-frequency-doubling. At the incident pump power of 1.6 W, the output power at 556 nm, 558 nm, 561 nm are 85 mW, 65 mW, 71 mW, the light to light conversion efficiency are 5.31%, 4.06%, 4.68% respectively.

Key words: LD-pumped solid-state-laser; F-P etalon; yellow laser; intracavity-frequency-doubling; LBO

1 引言

Nd:YAG 激光光谱中存在 30 多条谱线^[1], 除去熟知的 1064 nm、1319 nm 和 946 nm 谱线外^[2~6], 1112 nm、1116 nm 和 1123 nm 谱线^[7]的相对性能也比较好, 虽然通过激光谐振薄膜的合理设计可以将增益较大的 1064 nm、1319 nm 和 946 nm 激光谱线抑制掉, 从而获得增益较小的 1112 nm、1116 nm 和 1123 nm 激光谱线的同时运转。但是, 由于镀膜工艺

的限制, 很难通过简单的镀膜来选择激光性能和波长接近的这 3 条谱线中的任何一条。同时, 这 3 条谱线增益接近, 竞争激烈, 导致基频光尤其是腔内倍频时倍频光的输出稳定性差。虽然已有通过倍频晶体角度调谐获得 556 nm 黄光的输出报道^[8]但功率起伏很大仍然是未能解决的问题。

目前, 关于它们的基频和倍频光的报道较多, 其中关于 1123 nm 谱线的报道最多, 且主要集中于该谱线基频光运转^[9~11], 而关于 1112 nm 谱线的基频

收稿日期: 2004-09-29 修订日期: 2005-01-04

* 基金项目: 国家高技术发展计划资助项目 (2002AA311141)

** E-mail: jfq555@yeah.net

和倍频光输出还少有报道^[8,12],其中 1112 nm 经倍频获得波长为 556 nm 的黄光,该波长非常接近人眼最敏感波长 555 nm,所以非常适合于激光显示和照明。同时,黄光在分子生物学、化学等领域还有着重要的应用。为了获得稳定性好、激光谱线单一的基频和倍频光输出,本文通过腔内插入 F-P 标准具来实现,同时利用 F-P 标准具的角度调节不仅获得了 1112 nm、1116 nm 和 1123 nm 这 3 条激光谱线的单独运转,再通过 LBO 腔内倍频,还获得了 556 nm、558 nm 和 561 nm 黄光输出。

2 理论分析

2.1 Nd:YAG 1.1 μm 谱线分析

在 Nd:YAG 激光晶体中,Nd³⁺ 取代了 YAG 基质中的 Y³⁺ 以后,Nd³⁺ 在晶格场的作用下,发生斯塔克分裂,其能级结构如图 1 所示。从图可以看出,1112 nm、1116 nm 和 1123 nm 这 3 条谱线都是对应⁴F_{3/2}-⁴I_{11/2} 这 2 个能级间的跃迁,只是其上下能级对应不同的斯塔克分裂子能级,其中 1112 nm 对应的是 R₂ 到 Y₆ 的跃迁,1116 nm 对应的是 R₁ 到 Y₅ 的跃迁,1123 nm 对应的 R₁ 到 Y₆ 的跃迁,因此这 3 条激光谱线的相对性能比较接近^[3,5]。三者中,1112 nm 谱线的受激辐射截面最大,也最易获得激光输出。Nd:YAG 1.1 μm 谱线与常用谱线的激光特性的比较^[1,5] 如表 1 所示,其中 σ 表示受激辐射截面,Δν 表示激光谱线的频宽,β 表示荧光辐射相对强弱的分支比。从表可以看出,1112 nm、1116 nm 和 1123 nm 这 3 条谱线的相对性能比较接近,但受激发射截面都比 1064 nm、1319 nm 和 946 nm 小。所以,为了获得增益较小的 1112 nm、1116 nm 和 1123 nm 3 条激光谱线的运转,不仅需要抑制 1064 nm 振荡,同时还要对 1319 nm 和 946 nm 谱线进行抑制,同时在这 3 条谱线同时运转以后,需要通过波长选择手段获得其中一条谱线的激光输出。这里,首先通过提高谐振腔两腔模对 1064 nm、1319 nm 和 946 nm 的整体透过率,抑制它们起振,同时让谐振腔对 1112 nm、1116 nm 和 1123 nm 谱线的反射率足够高,就可以获得这 3 波长激光器的运转。

2.2 F-P 标准具激光谱线选择分析

通过镀制窄反射带激光膜,选择性获得 1112 nm、1116 nm 和 1123 nm 当中任意一条激光谱线的单独运转是非常困难的。这里,在腔内插入 F-P 标准具,通过 F-P 标准具放置角度的倾斜把相距很近的激光谱线分开,从而获得单一谱线运转。F-P 标准

具对不同频率的光束具有不同的透过率,其关系可以表示为^[11]

表 1 Nd:YAG 中各主要谱线的激光特性比较

Tab. 1 The comparison of laser performance of the Nd:YAG at the main laser transitions

λ/nm	Transition	σ/10 ⁻²⁰ cm ²	Δν/cm ⁻¹	β	Relative performance
1319	R ₁ -X ₁	8.7	6	0.018	34
1123	R ₁ -Y ₆	3.0	13	0.030	40
1116	R ₁ -Y ₅	2.9	16	0.034	46
1112	R ₂ -Y ₆	3.6	14	0.025	49
1064	R ₂ -Y ₃	45.8	5	0.135	102
946	R ₁ -Z ₅	5.1	9	0.040	46

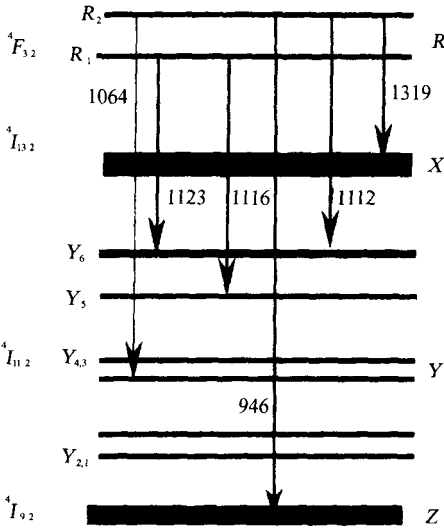


图 1 Nd:YAG 的能级图

Fig. 1 The energy level of Nd:YAG

$$T(\lambda) = \frac{1}{1 + F \sin^2(\frac{\phi}{2})} = \frac{1}{1 + F \sin^2(\frac{2\pi n d \cos \alpha'}{\lambda})}$$
 (1)

式中:F=4R/(1-R)²,R 为标准具表面反射率,R=0.04;φ 是标准具中参与多光束干涉效应的相邻两出射光线间相位差,φ=(2πλ)2ndcosα',n'(=1.4) 为标准具介质折射率,d(=150 μm) 为标准具厚度,α' 为光束进入标准具后的折射角。在 d 和 n 确定的情况下,通过倾斜角度的改变,让 1112 nm、1116 nm 和 1123 nm 谱线间的相对损耗变大,从而获得其中一条谱线运转。对于将要选择的 3 条谱线通过理论上的模拟,近似得到了在零入射角附近(cosα'=1.00000、cosα''=0.99905、cosα'=0.99548) 时标准具的透过率曲线,如图 2 所示。从图可以看到,当 cosα'=1.00000,标准具在 1123 nm 处的透过率为 1.00000,在 1116 nm 和 1112 nm 处的相对损耗为 0.133

00、0.087 00,足以抑制 1112 nm 和 1116 nm 起振;同理,当 $\cos\alpha' = 0.999\ 05$ 时,标准具在 1116 nm 处的透过率为 1.000 00,在 1112 nm 和 1123 nm 处的相对损耗为 0.127 00、0.109 00,只有 1116 nm 这条谱线可以起振;当 $\cos\alpha' = 0.995\ 48$ 时,标准具在 1112 nm 处的透过率值为 1.000 00,在 1116 nm 和 1123 nm 处的相对损耗为 0.113 00、0.118 00,只有 1112 nm 这条谱线可以起振。所以,在当 F-P 标准具在不同的倾斜角度时,可以选择性获得相应的激光谱线。

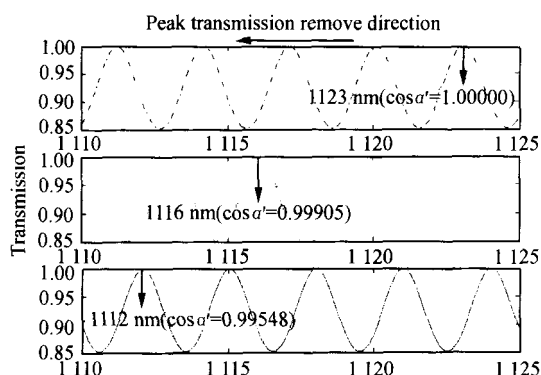


图2 标准具在不同倾斜角时光谱透过率曲线

Fig. 2 The transmission curves of the F-P etalon

3 实验装置与结果

实验装置如图3所示。LD由中科院半导体所提供,最大输出功率为2 W,中心发射波长为807.5 nm。抽运光经耦合光学系统(CO)准直、扩束和聚焦以后光斑半径变为100 μm 左右,抽运光入射到Nd:YAG的左端面。Nd:YAG的尺寸为 $\Phi 4\text{ mm} \times 3\text{ mm}$,掺杂浓度为1.0 at %。Nd:YAG左端面作为谐振腔的端镜,对808 nm、946 nm、1319 nm高透,对1112 nm、1116 nm和1123 nm高反。输出镜(OC)是曲率半径为50 mm的平凹镜,对1064 nm、556 nm同时高透,对1112 nm、1116 nm和1123 nm高反。整体考虑谐振腔对各谱线的透过率情况以后,增益较大的谱线(1064 nm、1319 nm和946 nm)被抑制掉,增益较小的谱线(1112 nm、1116 nm和1123 nm)可以起振。实验结果表明,膜系设计是非常合理的。谐振腔由工作物质的左端面和输出镜的凹面共同构成,谐振腔的长度约为24 mm。图中,F-P为熔石英材料制成的标准具,厚度为150 μm ,两端都没有镀膜。LBO是倍频晶体,按1112 nm I类临界位相匹配角切割($\theta = 90^\circ$, $\Phi = 8.3^\circ$),尺寸为2 mm $\times$ 2 mm $\times$ 10 mm。

实验时,首先调节LD的温控,让LD的发射峰与Nd:YAG的吸收峰808.5 nm重合(LD的发射波



图3 Nd:YAG/LBO黄光激光器实验原理图

Fig. 3 Schematic diagram of Nd:YAG/LBO yellow laser

长随温度变化大约为0.3 nm/ $^\circ\text{C}$);然后仔细调节输出镜的位置和晶体温控,直到红外输出光斑和功率到最佳状态。实验中,一定抽运功率下获得激光输出以后,在调节谐振腔的位置到最佳的过程中发现,当输出激光接近最佳状态时,Nd:YAG晶体产生的荧光开始呈蓝色,蓝色荧光的产生为激发态吸收所致。同时还曾发现,在腔内没有倍频晶体时,在倍频光输出镜右端有微弱的绿光斑点,产生原因目前还不清楚。在最佳状态时,通过光谱仪测量输出激光的光谱,如图4所示。从图可以看见,输出激光光谱中存在3个明显的尖峰,它们正好对应1112 nm、1116 nm和1123 nm这3条激光谱线。由于3条激光谱线的相对性能和受激辐射截面接近,在特定的抽运功率下,它们很容易同时获得激光输出。在成功获得这3条谱线同时运转以后,在谐振腔内插入标准具,通过标准具角度的改变利用闪耀光栅(光栅常数为1.67 μm)分光,通过红外卡片接收后看到了红外光斑的周期性移动。这就是单一谱线基频光的获得过程。

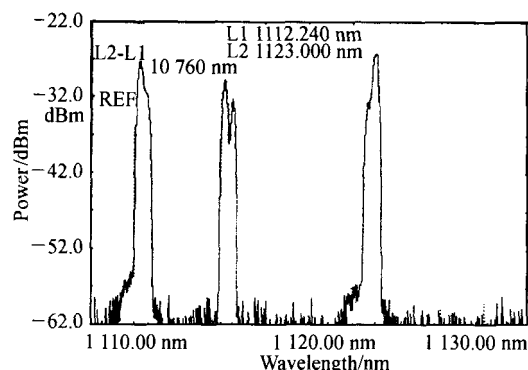


图4 基频光的光谱图

Fig. 4 The spectrum of the fundmental wave

通过标准具获得不同的基频光,然后分别对它们倍频可以获得不同波长的倍频光556 nm、558 nm和561 nm输出。由于这3个波长的倍频晶体切割角度相差不大,实验都使用556 nm LBO($\theta = 90^\circ$, $\Phi = 8.3^\circ$)。通过对实验装置的仔细调节,在标准具对基频光选择以后,调节LBO的位置,就可以获得相应倍频光的最大输出。实验发现,当标准具的倾斜角度固定到某一个值时,通过LBO的角度调整不能再获得

不同的倍频光输出,该现象已经说明标准具已经成功地对基频光进行了选择。用 Field Master-GS 功率计测量了输出不同倍频光时,输出功率随抽运功率的变化曲线,如图 5 所示。从图 5 可以看出,556 nm 的输出功率最高 85 mW,这和 1112 nm 谱线的受激发射截面较 1116 nm 和 1123 nm 大是一致的。同时发现,腔内加入标准具以后,倍频光的输出功率有所降低,但是输出功率稳定性有了很大提高。加入标准具前后倍频光的输出功率随时间(100 s)的变化曲线,如图 6 所示。标准具的插入,可以选择出单一的基频光谱线,从而避免腔内同时存在 3 条谱线时谱线间的相互竞争,提高输出功率的稳定性。

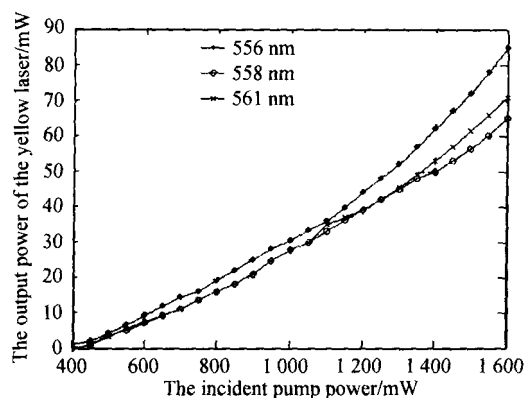


图 5 黄光的输出功率随输入功率的变化曲线

Fig. 5 The output power of the yellow laser versus pump power

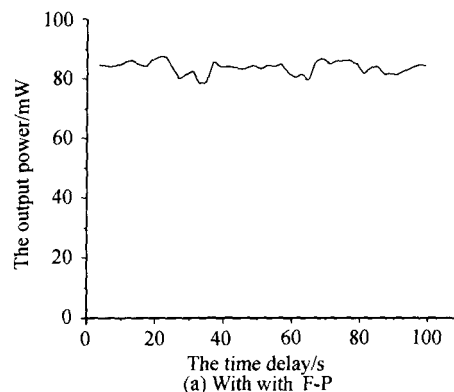
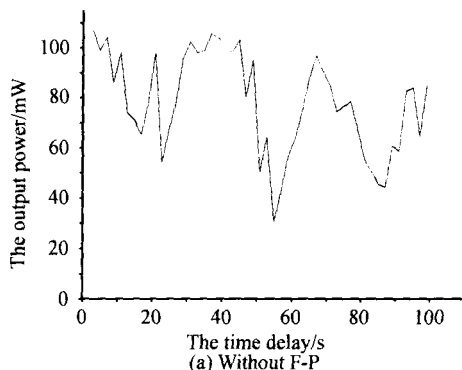


图 6 插入标准具前后倍频光的输出稳定性

Fig. 6 The stability of the output power without and with F-P etalon

4 结 论

通过对 Nd:YAG 各主要谱线激光参数的比较和分析,要想获得低增益谱线 1112 nm、1116 nm 和 1123 nm 振荡,必须通过镀制特定的谐振腔膜来抑制增益较大的 1064 nm、1319 nm 和 946 nm 谱线的运转。通过对谐振腔膜系的设计,利用 2 W 的 LD 抽运 Nd:YAG,用 F-P 标准具选择激光谱线,LBO 腔内倍频,通过标准具倾斜角度的合理调节,在 1.6 W 的抽运功率下,556 nm、558 nm 和 561 nm 的输出功率分别为 85 mW、65 mW 和 71 mW。标准具的使用不仅将镀膜不能分开的激光谱线进行了选择,同时提高了倍频光的输出稳定性。在进一步的工作中,将使用 20 W 的半导体激光器阵列(LDA)当抽运源,获得大功率黄光激光器,充分满足激光显示和表演需要。同时,连续和调 Q 输出的 1112 nm、1116 nm 和 1123 nm 激光器具有广阔的应用前景,在实验条件成熟的条件下,我们会致力于这方面的研究。

参考文献:

- [1] Singh S, Smith R G, Uiter G Van. Stimulated emission cross section and fluorescence quantum efficiency of Nd^{3+} in yttrium aluminum garnet at room temperature [J]. Phys Rev B, 1974, 10: 2566.
- [2] FENG Yan, BI Yong, ZHANG Hong-bo, et al. 20 W Nd:YAG all-solid-state green laser by extracavity-frequency doubling [J]. Acta Optica Sinica (光学学报), 2003, 23(4): 469-471. (in Chinese)
- [3] ZHENG Quan, XUE Qing-hua, WANG Jue-ying. LD pumped 1.2 W Nd:YAG/LBO CW red laser [J]. Laser & Infrared (激光与红外), 2004, 34(1): 24-26. (in Chinese)
- [4] ZHENG Quan, ZHAO Ling, SHAO Yong-hong, et al. Cr:YAG passively Q-switched all-solid-state blue laser at 473 nm [J]. Chinese Journal of Lasers (中国激光), 2003, 30(8): 673-676. (in Chinese)
- [5] GAO Lan-lan, TAN Hui-ming, CHEN Ying-xin. Investigation on LD-pumped intracavity frequency-doubled low-noise

- blue lasers with two LBO crystals and plate[J]. Journal of Optoelectronics · Laser (光电子 · 激光), 2003, **14** (3):221-224. (in Chinese)
- [6] ZHANG Yong, YAO Jiar-quan, WANG Deng, et al. Study on self-mixing interference effects in LD pumped single-mode green laser[J]. Journal of Optoelectronics · Laser (光电子 · 激光), 2003, **14** (7):679-682. (in Chinese)
- [7] Koechner W. Solid-State Laser Engineering[M]. Beijing: Science Publishing House, 2002. 45. (in Chinese)
- [8] Chen Y F, Lan Y P, Tsai S W. High-power diode-pumped actively Q-switched Nd:YAG laser at 1 123 nm[J]. Optics Communications, 2004, **234**:309-313.
- [9] Chen Y F, Lan Y P. Diode-pumped passively Q-switched Nd:YAG laser at 1 123 nm[J]. Applied Physics B, Nd:YAG laser[J]. Chinese Letters and Optics, 2004, **79**:29-31.
- [10] GUO Xiao-ping, MENG Chen, GANG Li, et al. Diode-pumped 1 123 nm Nd:YAG laser[J]. Chinese Optics Letters, 2004, **2** (7):402-404.
- [11] Jack Marling. 1.05~1.44 μm tunability and performance of the CW Nd³⁺:YAG laser[J]. IEEE Q E, 1978, **14** (1):56-62.
- [12] YAO Jiar-quan. Nonlinear Optics Frequency Conversion and Laser Tuning Technology[M]. Beijing: Science Publishing House, 1995. 256-267. (in Chinese)

作者简介:

贾富强 (1980 -), 男, 重庆人, 在读博士研究生, 研究方向为全固体激光器件与非线性频率变换技术.

www.cnki.net