

文章编号:1002-2082(2017)03-0499-07

高稳定性低噪声的 561 nm 黄光激光器

马刚飞^{1,2,3}, 姚文明¹, 鞠乔俊^{1,4}, 檀慧明¹, 杨建明¹, 蒋羽⁵, 高静^{1,2}

(1. 中国科学院苏州生物医学工程技术研究所江苏省医用光学重点实验室, 江苏苏州 215163;

2. 苏州国科医疗科技发展有限公司, 江苏苏州 215163;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏南京 210094;

5. 苏州图森激光有限公司, 江苏苏州 215011)

摘要: 鉴于目前 561 nm 激光器噪声较大, 影响其实用性, 提出一种高稳定性低噪声的 561 nm 黄光激光器。利用 Nd:YAG 晶体得到 1 123 nm 基频光, 通过 LBO 晶体腔内倍频得到 561 nm 输出。理论分析了 1 112 nm、1 116 nm 与 1 123 nm 波长的阈值泵浦功率, 提出 1 123 nm 的单波长振荡条件, 确定谐振腔镀膜要求。根据理论计算, 设计了合理的谐振腔膜系, 通过抑制 1 112 nm 与 1 116 nm 谱线在谐振腔内的振荡实现 1 123 nm 谱线的单波长振荡。在泵浦功率为 5 W 时, 实现了 561 nm 激光单波长输出, 输出功率达到 107 mW, 功率不稳定性达到 0.7%, 噪声为 1.2%。

关键词: 非线性光学; 高稳定性; 低噪声; 561 nm; 谐振腔膜系

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A

doi: 10.5768/JAO201738.0307002

561 nm yellow laser with high stability and low noise

Ma Gangfei^{1,2,3}, Yao Wenming¹, Ju Qiaojun^{1,4}, Tan Huiming¹,

Yang Jianming¹, Jiang Yu⁵, Gao Jing^{1,2}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Medical Optics, Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215163, China;

2. Suzhou Guoke Medical Science & Technology Development Co., Ltd., Suzhou 215163, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 5. Suzhou Tusen Laser Co., Ltd., Suzhou 215011, China)

Abstract: In view of current high noise of domestic 561 nm laser, affecting its practicality, 561 nm yellow laser with high stability and low noise is proposed. Nd:YAG crystal is used to obtain 1 123 nm fundamental frequency light, and output of LBO crystal is 561 nm. Threshold pump power of 1 112 nm, 1 116 nm and 1 123 nm wavelength is analyzed theoretically, and a single wavelength oscillation condition of 1 123 nm is proposed to determine requirements of resonant cavity coating. According to theoretical calculation, a reasonable resonant cavity system is designed, and single-wavelength oscillation of 1 123 nm line is realized by suppressing oscillation of 1 112 nm and 1 116 nm lines in the resonator. At a pump power of 5 W, 561 nm laser single wavelength output is achieved with an output power of 107 mW, power instability of 0.7% and noise of 1.2%.

Key words: nonlinear optics; high stability; low noise; 561 nm; resonant cavity film system

收稿日期: 2016-11-15; 修回日期: 2017-02-07

基金项目: 国家自然科学基金(61405236); 国家高技术研究发展计划(2015AA021106)

作者简介: 马刚飞(1992—), 男, 江苏苏州人, 硕士, 主要从事全固态激光技术方面的研究。E-mail: mgf19920726@163.com

导师简介: 高静(1982—), 男, 博士, 研究员, 主要从事全固态黄光激光器和非线性光学方面的研究。

E-mail: owengaojing@126.com

引言

黄激光具有高单色性、高准直性和高亮度等特点, 可以应用于军工、通信、大气遥感、信息存储、医疗美容、生物医学等方面。例如: 军事上黄光激光可用于空间目标的探测与识别; 黄激光在天文望远镜系统中可以替代传统的钠导信号光源; 黄激光还可用于眼底黄斑部进行眼底光凝治疗。因此黄光激光器已经成为激光器领域的研究热点, 而 561 nm 黄光激光器作为近年来的一种新型黄光激光器也越来越受到人们的关注。

2004 年, Guo^[1] 等人首次报道了功率为 0.5 mW 的 561 nm 连续黄光输出。采用 808 nm 激光二极管(LD)作为泵浦光, 当抽运功率为 1.57 W 时, 1 123 nm 输出功率达到 132 mW。采用周期性极化铌酸锂晶体腔外倍频, 观察到了微弱的黄光。2005 年, 贾富强^[2] 等人报道了用 2 W 的 LD 抽运掺钕钇铝石榴石(Nd: YAG)晶体, 腔内加入 0.15 mm 厚的标准具, 先通过调节标准具角度获得单一谱线的基频光输出, 再通过三硼酸锂(LBO)晶体腔内倍频获得黄光输出。在 1.6 W 的抽运功率下, 获得了 85 mW、65 mW、和 71 mW 的 556 nm、558 nm 和 561 nm 的黄光输出。2008 年, Raikkonen^[3] 等人使用 2.5 W 的单管 LD 抽运 Nd: YAG 晶体, 利用掺铬钇铝石榴石(Cr: YAG)被动调 Q, 通过磷酸钛氧钾(KTA)晶体腔外倍频, 获得重复频率为 12 kHz, 脉宽为 4 ns 的 561 nm 黄光输出, 单脉冲能量为 5 μ J, 平均功率为 55 mW。2010 年, Yao^[4] 等人首次报道了瓦级以上的 561 nm 黄光输出。他们采用 LBO 晶体 I 类相位匹配腔内倍频, 在 10 W 的抽运功率下, 获得了 1.2 W 的连续 561 nm 黄光。总的光光转换效率超过 13.3%, 3 h 内输出功率不稳定性小于 3%。2012 年, Wang^[5] 等人使用 808 nm 二极管侧面泵浦以及声光调 Q 方法, 通过 LBO 晶体腔内倍频, 获得重复频率为 6 kHz 的 561 nm 输出, 最大输出功率达到了 60.3 W。2013 年, Gao^[6] 等人通过合理的镀膜膜系设计并插入标准具, 直接泵浦 Nd: YAG 晶体, 然后腔内倍频产生 561 nm 连续黄光输出。在吸收泵浦功率为 21.8 W 时, 最大输出功率达到了 2.3 W, 光光转换效率为 10.6%。但目前国内外关于 561 nm 激光器的报道主要偏向于理论研究, 而实际应用所需的小型化、低噪声、高稳定性 561 nm 激光器报道还比较少。在已

有的低噪声 561 nm 激光器报道^[7-8] 中, 主要是通过添加选波长器件如双折射滤波器或使用 V 型腔结构的方法来实现 561 nm 单波长输出, 从而改善激光器的稳定性和噪声, 但却使整个激光器结构变得不够紧凑, 影响其实用性。

本文采用简单直腔结构, 利用 808 nm 激光二极管端面泵浦 Nd: YAG 晶体, 通过 LBO 晶体 I 类相位匹配实现腔内倍频。设计合理的谐振腔镀膜膜系, 在不添加任何选频器件情况下, 获得了高稳定性、低噪声的 561 nm 单波长激光输出。实验中, 在泵浦功率为 5 W 时, 获得了 107 mW 的 561 nm 单波长输出, 不稳定性达到了 0.7%, 均方根值(RMS)噪声为 1.2%。

1 理论分析

1.1 Nd: YAG 晶体谱线分析

Nd: YAG 激光器是目前最为常用的一类固体激光器, 其简化能级如图 1 所示。在 Nd: YAG 晶体中, 钕离子 Nd^{3+} 替换了 YAG 基质中的钇离子 Y^{3+} , Nd^{3+} 在晶格场的作用下, 发生了斯塔克分裂。激光跃迁主要发生在上能级 $4F_{3/2}$ 的斯塔克能级和下能级 $4I_{13/2}$, $4I_{11/2}$, $4I_{9/2}$ 之间。其中, 1 112 nm、1 116 nm 和 1 123 nm 这 3 条谱线都对应于 $4F_{3/2}$ 能级与 $4I_{11/2}$ 能级之间的跃迁, 只是其激光上下能级对应不同的斯塔克分裂能级。因此这 3 条谱线的性能比较接近^[9], 为了实现 1 123 nm 基频光的单谱线运转, 必须对 1 112 nm 和 1 116 nm 谱线进行抑制。除此之外, 1 064 nm、946 nm、1 319 nm 这 3 条谱线性能与 1 123 nm 谱线也比较接近。

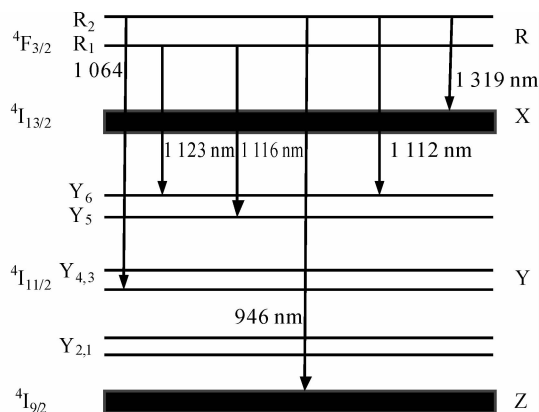


图 1 Nd: YAG 能级图

Fig. 1 Energy level of Nd: YAG

影响谱线跃迁的参数主要有受激发射截面、频宽与荧光辐射相对强弱分支比,可以用 3 种参数的乘积来衡量其跃迁难易程度。设 1 064 nm

谱线对应乘积为 100,根据比值可以得到其余谱线的相对性能,各项参数详情及相对性能比较如下表 1 所示^[10]。

表 1 Nd:YAG 晶体中主要谱线的激光特性比较

Table 1 Comparison of laser performance of Nd:YAG at main laser transitions

波长/nm	跃迁能级	受激发射截面 /(10^{-20} cm ²)	频宽/cm ⁻¹	荧光辐射相对 强弱分支比	相对性能
946	R ₁ -Z ₅	5.1	9	0.04	46
1 064	R ₂ -Y ₃	45.8	5	0.135	100
1 112	R ₂ -Y ₆	3.8	14	0.025	49
1 116	R ₁ -Y ₅	2.9	16	0.034	46
1 123	R ₁ -Y ₆	3	13	0.03	40
1 319	R ₁ -X ₁	8.7	6	0.018	34

本文通过设计合理的谐振腔与晶体镀膜膜系提高了 1 064 nm、1 319 nm、946 nm、1 112 nm、1 116 nm 谱线的整体透射率,进而抑制其在谐振腔内的振荡,同时提高了 1 123 nm 谱线在谐振腔内的整体反射率来获得其运转,其中最为关键的就是对 1 112 nm 和 1 116 nm 谱线的抑制。

1.2 1 123 nm 单波长振荡的理论分析

激光晶体每条发射谱线都对应不同的激光阈值,要获得特定谱线的振荡,必须使该谱线的振荡阈值小于其他谱线的振荡阈值。此时,该谱线将优先起振,从而抑制其他谱线在谐振腔内的振荡,最终实现单波长激光输出。四能级激光系统中,谐振腔内产生振荡的阈值泵浦功率^[11]为

$$P_{th} = \frac{h\nu\delta V}{\sigma\tau\eta L} = \frac{h\nu V}{\sigma\tau\eta L} \left[aL - \frac{1}{2} \ln(Rr) \right] \quad (1)$$

式中: h 为普朗克常数; ν 为泵浦光频率; V 为泵浦体积; δ 为平均单程损耗因子; σ 为相应波长的受激发射截面; τ 为激光上能级寿命; η 为泵浦效率; α 为激光晶体的单程吸收损耗系数; L 为激光晶体长度; R 为相应波长在谐振腔前端的反射率; r 为相应波长在谐振腔后端面的反射率。

根据阈值表达式可知,要想获得所需波长的单波长振荡输出,必须满足如下关系式:

$$P_{th} \leq P_{thi}$$

$$\frac{h\nu V}{\sigma\tau\eta L} \left[aL - \frac{1}{2} \ln(Rr) \right] \leq \frac{h\nu V}{\sigma_i\tau_i\eta_i L} \left[aL - \frac{1}{2} \ln(R_i r_i) \right]$$

$$[2aL - \ln(Rr)] \leq \frac{\sigma}{\sigma_i} [2aL - \ln(R_i r_i)]$$

$$\ln(R_i r_i) \leq 2aL - \frac{\sigma_i}{\sigma} [2aL - \ln(Rr)] \quad (2)$$

式中不带下标 i 的为所需波长的参数,带下标 i 的为第 i 个需要抑制波长的参数。对同一激光晶体的同一上能级,可以假设不同波长对应的上能级寿命 τ 和泵浦效率 η 以及吸收系数 α 相同。

由表达式(2)可知,抑制 1 112 nm 产生 1 123 nm 需满足的条件为

$$\ln(R_1 r_1) \leq 2aL - \frac{\sigma_1}{\sigma} [2aL - \ln(Rr)] \quad (3)$$

R_1 为谐振腔前端面 1 112 nm 波长的反射率, r_1 为谐振腔后端面 1 112 nm 波长的反射率,Nd:YAG 晶体中单程损耗系数 α 取 0.001 57/cm^[12],Nd:YAG 晶体长度 L 为 10 mm,Nd:YAG 晶体中 1 112 nm 谱线的受激发射截面 σ_1 为 3.8×10^{-20} cm²,1 123 nm 谱线的受激发射截面 σ 为 3×10^{-20} cm²,谐振腔前端面 1 123 nm 波长的反射率 R 为 99.8%,谐振腔后端面 1 123 nm 波长的反射率 r 为 99.8%。将各项数据代入(3)式,计算可得 $R_1 \times r_1 \leq 99.4\%$,即谐振腔对 1 112 nm 波长的整体反射率不大于 99.4%。由表达式(2)可知,抑制 1 116 nm 产生 1 123 nm 需满足的条件为

$$\ln(R_2 r_2) \leq 2aL - \frac{\sigma_2}{\sigma} [2aL - \ln(Rr)] \quad (4)$$

R_2 为谐振腔前端面 1 116 nm 波长的反射率, r_2 为谐振腔后端面 1 116 nm 波长的反射率,Nd:YAG 晶体中 1 116 nm 谱线的受激发射截面 σ_2 为 2.9×10^{-20} cm²。将各项数据代入(4)式,计算可得 $R_2 \times r_2 \leq 99.6\%$,即谐振腔对 1 116 nm 波长的整体反射率不大于 99.6%。

2 实验装置

实验装置如图 2 所示,抽运源为 808 nm 激光

二极管,最大输出功率为 5 W,数值孔径 0.22,芯径 $400\text{ }\mu\text{m}$ 。经过两块平凸透镜准直聚焦后入射到激光介质,透镜焦距都为 15 mm。激光介质是 Nd:YAG 晶体,掺杂浓度为 1.1%,尺寸为 $3\text{ mm}\times 3\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 。倍频晶体为按 1 123 nm I 类临

界相位匹配切割的 LBO 晶体,切割角为 $\theta=90^\circ$, $\varphi=7.5^\circ$,尺寸为 $2\text{ mm}\times 2\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 。激光晶体与倍频晶体一起放置在一块半导体致冷器 (TEC) 上实现精确温控确保激光器稳定运行。谐振腔的长度约为 25 mm。

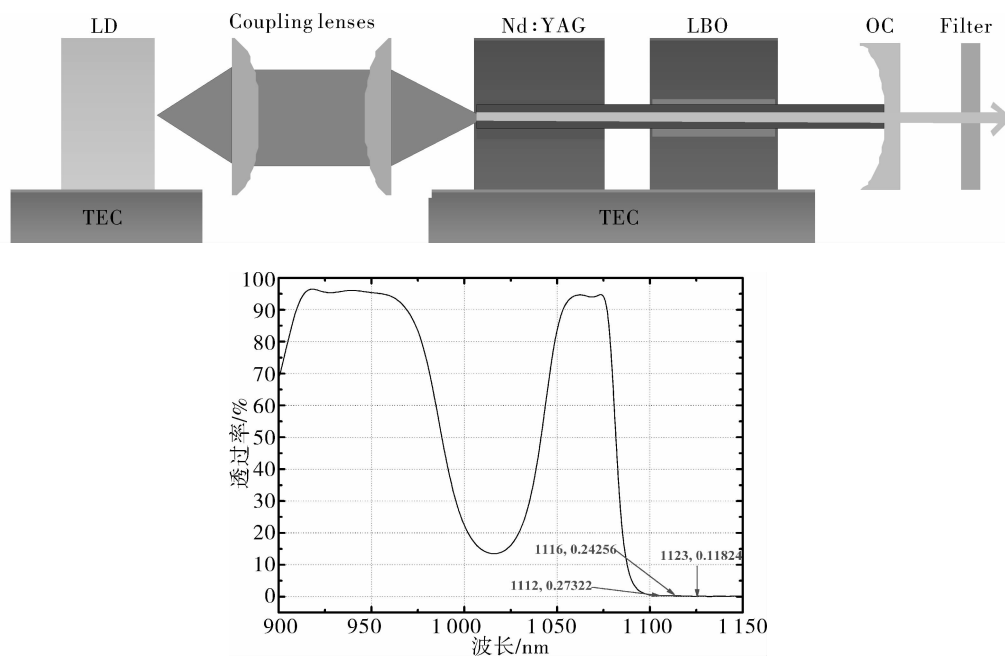


图 2 实验装置原理图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental device

由于 1 064 nm、1 319 nm 和 946 nm 波长与 1 123 nm 之间的波长差很大,通过对作为谐振腔前腔镜的 Nd:YAG 输入端面的膜系进行设计,抑制了这 3 个波长在谐振腔内的振荡,其制备后的透过率曲线如图 3(a)所示。1 064 nm 和 946 nm 的透过率都是 95% 左右;1 319 nm 波长的透过率在 30% 左右(这里没有画出),由于 1 319 nm 的受激发射截面比 1 064 nm 小很多,30% 的透过率也足以抑制 1 319 nm 的腔内振荡。同时,要求厂家的输入镜的制备在保证 1 123 nm 具有足够的反射率的同时,尽可能降低 1 112 nm 和 1 116 nm 波长的反射率,提高这 2 个波长的振荡阈值。但由于这 2 个波长与 1 123 nm 的波长差较小,其透过率只能略大于 1 123 nm。

输出腔镜的镀膜要求与输入镜的制备类似,也要求在保证 1 123 nm 波长具有足够反射率的同时,尽可能降低 1 112 nm 和 1 116 nm 波长的反射率,其制备后的透过率曲线如图 3(b)所示,1 112 nm 和 1 116 nm 的输出镜透过率也略大于 1 123 nm。

Nd:YAG 晶体输入端的 1 112 nm 透过率为

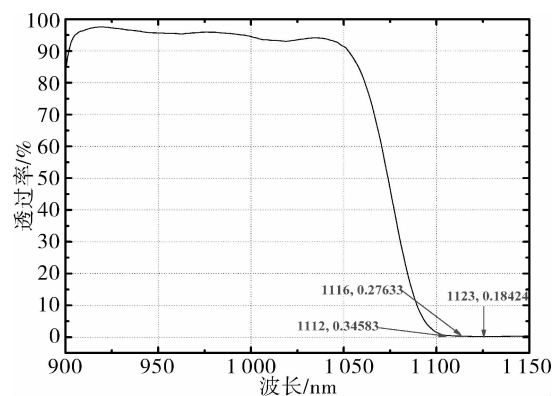


图 3 Nd:YAG 透过率曲线

Fig. 3 Transmittance curve of Nd:YAG

0.27%, 1 116 nm 的透过率为 0.24%, 1 123 nm 的透过率为 0.12%, 由公式 $R=1-T$ 可得相应波长反射率,即 1 112 nm 反射率为 99.73%, 1 116 nm 反射率为 99.76%, 1 123 nm 反射率为 99.88%。同理可得输出镜的 1 112 nm 反射率为 99.65%, 1 116 nm 反射率为 99.72%, 1 123 nm 反射率为 99.82%。1 116 nm 谱线在腔内整体反射率为 $99.76\% \times 99.72\% = 99.48\% \leq 99.6\%$,

1 112 nm谱线在腔内整体反射率为 $99.73\% \times 99.65\% = 99.38\% \leq 99.4\%$ 。计算结果满足了公式(3)和公式(4)的要求。以上结果表明,通过对输出镜和输入镜的膜系制备提出适当的要求,不用在腔内插入波长抑制器件,实现 1 123nm 单波长振荡是有可能的。

3 实验结果

如图 2 搭建光路,LBO 倍频晶体未放入光路中。调节 LD 温控使 LD 的发射峰中心波长为 808 nm,与 Nd:YAG 晶体的吸收峰重合。经过红外滤光片 RG850 滤除大部分 808 nm 泵浦光,用海洋光学公司的 NIRQUEST 型光谱仪对输出光谱进行扫描,得到基频光输出光谱如图 4 所示。从图 4 可见,此时基频光输出光谱中只有 1 123 nm 单波长,无论是增益较大的 1 064 nm、946 nm、1 318 nm 还是各项特性都非常接近的 1 112 nm、1 116 nm 谱线都被抑制,因此可以证明所采用的谐振腔镀膜设计能够实现 1 123 nm 基频光单波长输出。

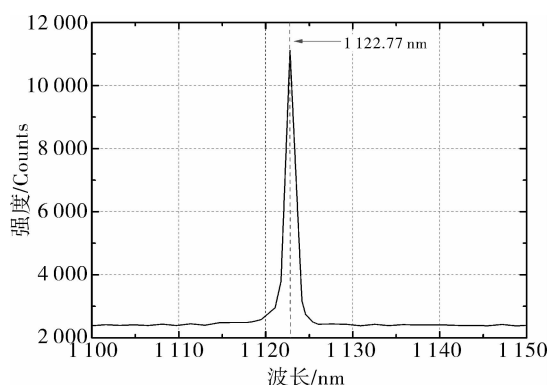


图 4 1 123 nm 输出光谱

Fig. 4 Output spectrum of 1 123 nm

将 LBO 沿光路方向放入谐振腔中间位置,微调 LBO 的角度,使基频光以最佳相位匹配角入射,倍频效率达到最大。这时虽然 1 112 nm 和 1 116 nm 分别倍频到 556 nm 和 558 nm 也在晶体的接收带宽内,但其倍频效率要小于 1 123 nm 倍频到 561 nm 的倍频效率,这样可以促进 1 123 nm 谱线对应的能级跃迁转移和 561 nm 的单波长倍频输出。前期在研究通过 1 084 nm 基频光的腔内倍频获得 542 nm 输出的激光器时,采用接收带宽窄的 BiBO 倍频晶体获得了单波长 542 nm 的激光输出,有效地抑制了受激发射截面最高的 1 064 nm 谱线的跃迁^[13],这也证明了在多波长激光器中,激光波长向倍频效率高的基频光跃迁波长的转移也

可以促进相应倍频光的单波长输出。

经过滤光片(对 561 nm 波长透过率为 86%)对泵浦光以及基频光滤除后,用海洋光学公司 HR4000CG-UV-NIR 型光谱仪扫描倍频输出光,得到输出光谱如图 5 所示,扫描光谱中只存在对应 561 nm 谱线的单波峰。理论与实际相符,经过特殊设计的谐振腔镀膜膜系确实可以实现 561 nm 单波长输出。

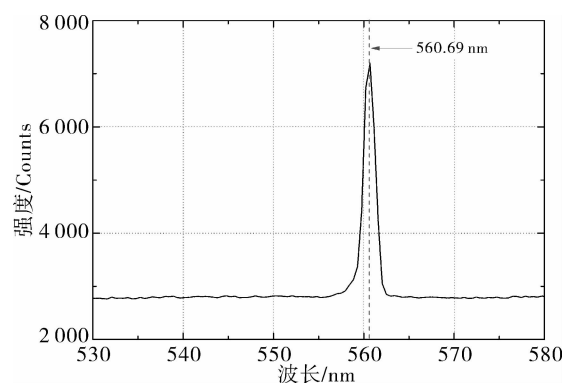


图 5 561 nm 输出光谱

Fig. 5 Output spectrum of 561 nm

当泵浦功率为 5 W 时,最大输出功率为 107 mW,经滤光片后用功率计测得数值为 92.6 mW。此时 561 nm 激光功率在 5 min 内不稳定性为 0.7%,如图 6 所示,100 min 内不稳定性为 1.2%。

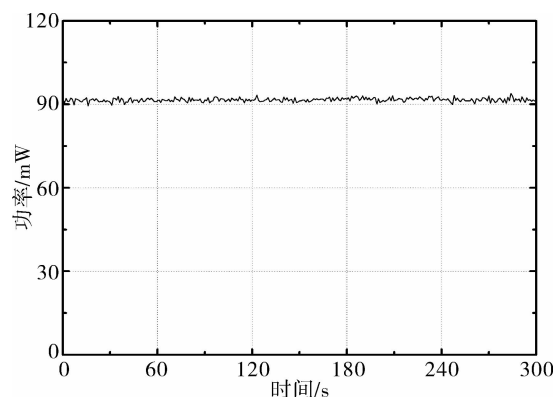


图 6 5 min 内稳定性测试

Fig. 6 Stability test in 5 minutes

用 THORLABS 公司的 DET10A/M 型光电探头测量激光器输出光斑,并连接示波器,测得 561 nm 激光的噪声曲线如图 7 所示,图 8 为背景噪声曲线。

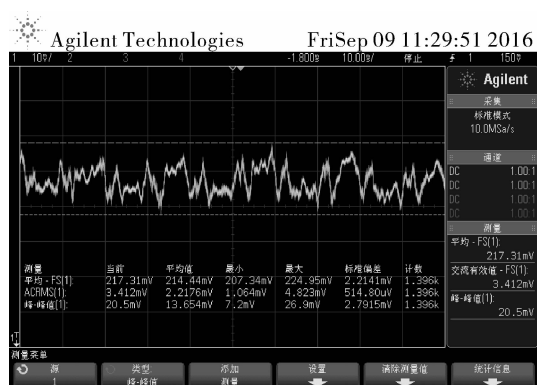


图 7 低噪声曲线

Fig. 7 Low noise curve



图 8 背景噪声

Fig. 8 Background noise curve

由RMS 噪声计算公式:

$$\text{RMS 噪声} = \frac{\text{交流 RMS 值} - \text{背景噪声交流 RMS 值}}{\text{直流平均值}}$$

(5)

可得 RMS 噪声为 1.2%。

通常情况下,通过 LBO 倍频的 561 nm 激光器的 1 123 nm 基频光附近还有 1 112 nm 和 1 116 nm 谱线的跃迁,而 1 123 nm、1 112 nm 和 1 116 nm 都在 LBO 的光谱接收带宽以内,因此在 1 123 nm 倍频到 561 nm 的同时,1 112 nm 和 1 116 nm 也分别倍频到 556 nm 和 558 nm。此外,由于这 3 个波长之间的相互和频也在 LBO 的光谱接收带宽以内,所以如果不加控制,561 nm 腔内倍频激光器可以实现 6 个波长的输出^[14]。因此多波长腔内倍频激光器中存在不同波长之间的和频以及共用能级的波长竞争,使得激光输出的功率稳定性很差以及产生高噪声激光输出。通常表现为在

561nm 激光光路调试过程中出现颜色闪变现象。

本文通过膜系制备,获得了 561 nm 的单波长输出,消除了不同波长之间的和频以及共用能级的激光跃迁的波长竞争对激光输出噪声的影响,实现了 1.2% 的低噪声输出。实验中也发现:当稳定低噪声状态下的 561 nm 激光器受到外界扰动时,输出光斑出现颜色闪变,噪声明显变大,其噪声曲线如图 9 所示。

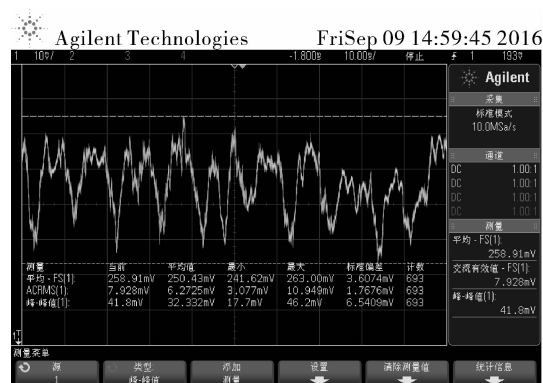


图 9 高噪声曲线

Fig. 9 High noise curve

4 结论

使用 808 nm LD 泵浦 Nd:YAG 晶体,采用 I 类临界相位匹配 LBO 晶体进行腔内倍频,通过对激光器的振荡阈值进行分析计算,设计了合理的镀膜膜系,在简单的直腔结构下,不使用任何选频器件,最终获得了 561 nm 单波长激光输出。在最大泵浦功率为 5 W 时,获得了 107 mW 的高稳定性低噪声输出,5 min 内功率不稳定性为 0.7%,100 min 内不稳定性为 1.2%,RMS 噪声为 1.2%。下一步将在继续优化谐振腔镀膜膜系设计的基础上,控制 561 nm 波长线宽,抑制模式竞争,以获得稳定性更好,噪声更低的 561 nm 激光器。

参考文献:

- [1] Guo X P, Chen M, Li G, et al. Diode-pumped 1 123 nm Nd:YAG laser[J]. Chin. Opt. Lett., 2007, 2(7): 402-404.
- [2] Jia F Q, Zheng Q, Xue Q H, et al. Yellow light generation by frequency doubling of a diode-pumped Nd

- : YAG laser[J]. Opt. Commun., 2006, 259(1): 212-215.
- [3] Räsänen E, Kimmelma O, Kaivola M, et al. Passively Q-switched Nd: YAG/KTA laser at 561 nm[J]. Opt. Commun., 2008, 281(15): 4088-4091.
- [4] Yao Y, Zheng Q, Qu D P, et al. All-solid-state continuous-wave frequency-doubled Nd: YAG/LBO laser with 1.2 W output power at 561 nm[J]. Laser Phys. Lett., 2010, 7(2): 112-115.
- [5] Wang Z C, Peng Q J, Bo Y, et al. 60 W yellow laser at 561 nm by intracavity frequency doubling of a diode-pumped Q-switched Nd: YAG laser[J]. Opt. Commun., 2012, 285(3): 328-330.
- [6] Gao Jing, Dai Xianjin, Zhang Long, et al. All-solid-state continuous-wave yellow laser at 561nm under in-band pumping[J]. J. Opt. Soc. Am. B, 2012, 30(1): 95-98.
- [7] Ni Mingxin, Yang Min, Qu Dapeng, et al. All solid-state 561 nm single longitudinal mode laser[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(6): 680-683.
倪明心, 杨敏, 曲大鹏, 等. 561 nm 全固态单纵模激光器[J]. 激光与红外, 2016, 46(6): 680-683.
- [8] Ma Wei, Gao Lanlan, Zhu Xinyu. Research on 561 all-solid-state low-noise laser[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(10): 1206-1210.
马威, 高兰兰, 朱心宇. 561 nm 全固态低噪声激光器研究[J]. 激光与红外, 2015, 45(10): 1206-1210.
- [9] Koechner W. Solid state laser engineering[M]. Sun Wen, translated by Jiang Zewen, Cheng Guoxiang. Beijing: Science Press, 2002.
- [10] Cui Jinjiang, Tan yuming, Wang fan. High power medical all-solid-state 561 nm yellow laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(1): 87-91.
崔锦江, 檀慧明, 王帆, 等. 大功率医用全固态 561 nm 黄光激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(1): 87-91.
- [11] Shen H Y, Su H. Operating conditions of continuous wave simultaneous dual wavelength laser in neodymium host crystals[J]. Journal of Applied Physics, 1999, 86(12): 6647-6651.
- [12] Zhu Jianhui, Xu Xuezhen, Yao Guangtao, et al. Research on the single pass loss of Nd: YAG crystal[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2002, 31(6): 542-546.
朱建慧, 徐学珍, 姚广涛, 等. Nd: YAG 激光晶体单程损耗的研究[J]. 人工晶体学报, 2002, 31(6): 542-546.
- [13] Zhang Z, Tan H M, Gao L L, et al. Intra-cavity second harmonic generation with Nd: YVO₄/BIBO laser at 542 nm[J]. Optics Communications, 2006, 267(2): 487-490.
- [14] Li Zhi, Tan Huiming, Tian Yubing, et al. All-solid-state multi-wavelength yellow laser intra-cavity SHG/SFG[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 140-145.
李智, 檀慧明, 田玉冰, 等. 全固态腔内 SHG/SFG 多波长黄光激光器[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 140-145.