

激光与光电子学进展

基于窄线宽光栅的光纤激光器倍频技术

韦丽娟¹, 曹剑², 张庆茂³, 曾国华¹, 吴锦兴¹, 高翔¹, 郝明明^{1*}

¹广东工业大学材料与能源学院, 广东 广州 510006;

²核工业理化工程研究院, 天津 300180;

³华南师范大学广东省微纳光子功能材料与器件重点实验室, 广东 广州 510006

摘要 高功率连续绿光激光器在激光显示、生物医疗、有色金属加工等领域有着重要的应用,该研究课题已经成为激光领域的研究热点。为了实现高功率、高效率连续绿光激光的输出,利用窄带光纤光栅搭建了高功率光纤激光器,并以此为基频光源进行倍频技术的研究,得到了带宽小于 50 pm 的基频光纤激光器,输出功率可达 100 W。利用该基频激光以腔外单程方式倍频 KTP 晶体,实现了 11.6 W 的 532 nm 绿光输出,倍频效率为 11.6%;利用偏振棱镜将该基频光起偏后得到线偏振光,对透过偏振棱镜的 p 偏振光进行倍频实验,得到 532 nm 倍频光的输出功率可达 7.3 W,倍频效率为 14.2%。以上实验证明利用窄线宽光栅来控制基频光源的光谱带宽,可提高光纤激光器的倍频效率,若将经偏振棱镜分光后被反射出去的 s 偏振光进行倍频,可得到 532 nm 绿光,利用合束技术将两束绿光进行合束,有望将绿光功率提高至 14 W 以上。

关键词 激光器; 倍频效率; 窄线宽光栅; 偏振特性; 绿光激光器

中图分类号 O437

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1914010

Frequency Doubling of Fiber Laser Based on Narrow Linewidth Grating

Wei Lijuan¹, Cao Jian², Zhang Qingmao³, Zeng Guohua¹, Wu Jinxing¹, Gao Xiang¹,
Hao Mingming^{1*}

¹School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou,
Guangdong 510006, China;

²Institute of Physical and Chemical Engineering of Nuclear Industry, Tianjin 300180, China;

³Guangdong Provincial Key Laboratory of Nanophotonic Functional Materials and Devices,
South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China

Abstract High power continuous green lasers have important applications in laser displaying, biomedicine, non-ferrous metal processing, and other fields. These research issues have become hot topics in the laser field. Therefore, to achieve high power and high efficiency continuous green laser output, a high-power fiber laser is built by using a narrow-band fiber grating, and the frequency doubling technology is studied by using the laser as the fundamental laser source. The fundamental frequency fiber laser with a bandwidth less than 50 pm is obtained, and the output power can reach 100 W. Based on this fundamental frequency laser, 532 nm green laser output of 11.6 W is achieved by using a one-way frequency doubling KTP crystal, and the frequency doubling efficiency is 11.6%. Linearly polarized laser is obtained by polarizing the fundamental frequency laser with a polarizing prism. The

收稿日期: 2021-01-25; 修回日期: 2021-02-12; 录用日期: 2021-03-02

基金项目: 广东省重点领域研发计划(2020B090922001)、广东省基础与应用基础研究基金(2019B1515120091)、国家重点研发计划(2017YFB0405201)

通信作者: *ciomp2007@163.com

frequency doubling experiment of p-polarized laser passing through a polarizing prism is carried out. The output power of 532 nm frequency doubling laser is 7.3 W and the frequency doubling efficiency is 14.2%. These experiments show that the frequency doubling efficiency of fiber lasers can be improved by controlling the spectral bandwidth of fundamental frequency laser via the narrow linewidth grating. The 532 nm green laser can be obtained by doubling the frequency of the s-polarized laser reflected by the polarizing prism. The green laser power can be increased to more than 14 W by combining two green laser beams via the laser beam combination technology.

Key words lasers; frequency doubling efficiency; narrow linewidth grating; polarization characteristics; green laser

OCIS codes 140.3515; 140.3510; 140.3615

1 引言

绿光激光器由于其短波长的工作特性,在生物医疗、显示及激光精细加工等领域有着越来越重要的应用^[1-3]。20世纪80年代,沈德忠院士等科研人员在国内外研制出KTP倍频晶体,结束了国外对我国倍频晶体的出口限制^[4],促进了我国激光倍频技术的研究。进入21世纪以后,关于全固态绿光激光器的报道已经很多,而全固态激光器存在电-光转换效率低、损耗大、功率不够稳定等缺陷^[5-7],光纤激光器具有电-光转化效率高、光束质量好、支持高功率输出的优点,已经在工业加工等众多领域逐步替代全固态激光器和气体激光器,但其光谱特性差、偏振输出成本昂贵等缺点,导致采用连续光纤激光器作为基频光倍频实现高功率高效率输出的报道较少。2011年,中国科学院上海光学精密机械研究所采用周期极化钽酸锂晶体倍频窄谱宽全光纤连续激光放大器得到2.1 W的绿光输出,倍频效率为9.6%^[8]。2014年,IPG公司的Gapontsev等^[9]报道了一台基于线性极化窄线宽的光纤激光器,该激光器在连续光运转下,输出绿光的功率可达350 W,这种激光器采用单频半导体激光器作为种子源,经过多级放大达到1000 W基频光输出,结构复杂并且成本高。2020年,中国科学院上海光学精密机械研究所研究者研制出了10 W低噪声连续绿光激光器^[10],该技术采用了MgO:sPPLT倍频晶体,倍频效率可达38.3%,但是该倍频晶体激光器的损伤阈值较低且价格较贵。为了实现光纤激光器基频光

的高功率、高效率倍频技术,本课题组开展了基于窄线宽光栅的连续全光纤激光器倍频技术研究,得到光谱带宽小于0.05 nm的百瓦级基频光纤激光器,并且对高损伤阈值的KTP晶体进行腔外倍频,最终获得了输出功率为11.6 W的532 nm激光,倍频效率为11.6%;基频光经偏振棱镜起偏后得到线偏振光,对p偏振的基频光进行倍频,可输出7.3 W的532 nm绿光,倍频效率为14.2%,如果对被偏振棱镜反射的s偏振光进行倍频实验,再将两束绿光合束,则有望得到功率为14 W的绿光。

2 实验装置

实验装置如图1所示,采用了功率为240 W、工作波长为915 nm的半导体激光器作为泵浦源,合束器为由(6+1)×1的纤芯,包层直径分别为200 μm和220 μm的泵浦端光纤,纤芯、包层直径分别为20 μm和400 μm的信号纤构成的反向合束器,用于将泵浦光耦合到增益光纤中,增益光纤为纤芯、包层直径分别为20 μm和400 μm的掺镱光纤,采用高反光栅(HR FBG)和10%反射率(PR FBG)的窄线宽光纤光栅对构成谐振腔,得到窄线宽的基频光源,从而提高激光器的倍频效率^[11-13]。包层光剥除器(CPS)用于剥除在包层中残余的泵浦光,隔离器(isolator)用于避免激光反向传输对光源以及光路系统产生不良影响,然后通过激光输出头QBH输出基频光。图2为输出光栅(PR FBG)的测试光谱,由图中可知窄带光栅输出光的中心波长为1064 nm,输出光谱宽度为0.0489 nm。基频

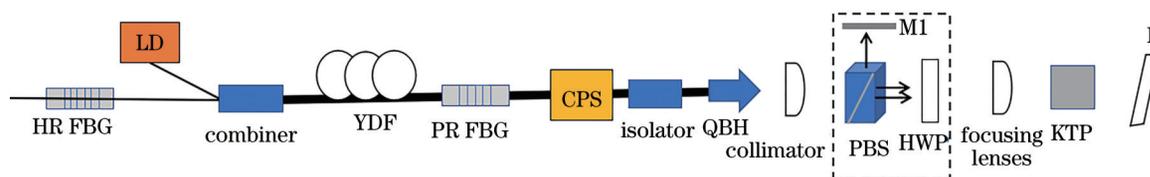


图1 连续光纤激光器倍频装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of frequency doubling device of continuous fiber laser

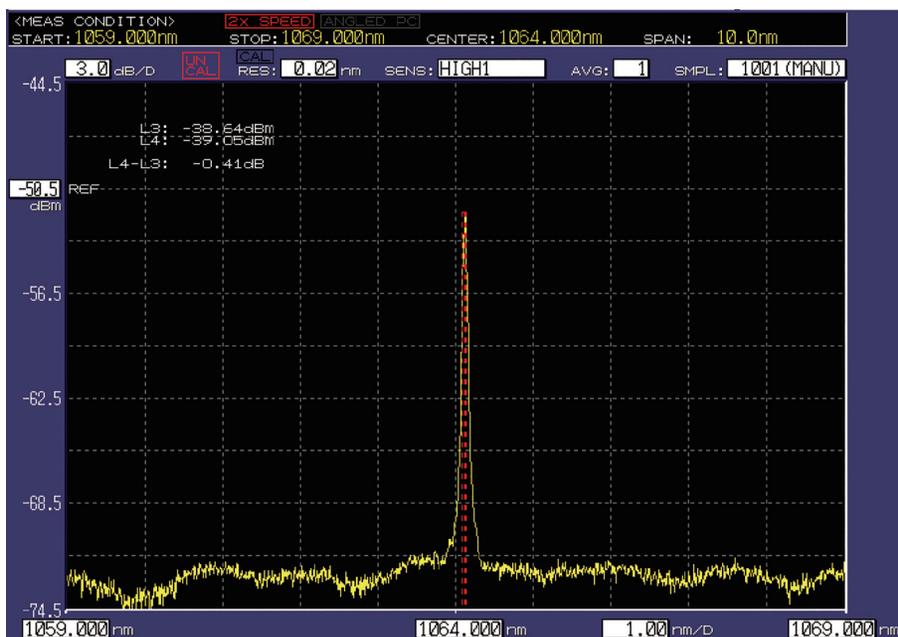


图 2 窄带宽光栅光谱

Fig. 2 Spectrum of narrow bandwidth grating

光偏振特性对倍频效率有影响,基频光在线偏振的状态下会得到更高的倍频效率^[14-15],在倍频实验中为了得到线偏振的基频光源,首先让 1064 nm 的基频光经过准直镜变成平行光再经过偏振棱镜(PBS)+半波片(HWP)即图 1 中虚线框中所示光学元件,得到线偏振的基频光。当线偏振光经过半波片时,旋转半波片可调节入射光的偏振方向,使得入射光波的波矢方向、偏振方向和晶体光轴方向符合匹配条件,从而提高倍频效率。其中 M1 为挡板,用来挡住经偏振棱镜起偏后反射出来的 s 偏振光。利用焦距为 50 mm 的聚焦镜让 1064 nm 的光聚焦到 KTP 晶体上,最后利用 532 nm 高透 1064 nm 高反光学镜片(图 1 中 L 透镜)将 532 nm 绿光沿光轴方向输出,使 1064 nm 激光以一定角度打到挡板上。

为了对比实验采用的基于窄带宽光栅的谐振腔的光纤激光器与基于普通商用光栅的谐振腔的光纤激光器的倍频效率,用 20 W 的 LD 泵浦源,将光谱带宽为 2.2 nm 的普通商用光栅作为谐振腔,搭建了一台连续光纤激光器,最终得到的最大基频光功率为 8.2 W,同样采用 KTP 晶体腔外倍频的方式进行倍频实验,倍频实验结果如图 3 所示。当基频光功率为 8 W 时,得到 532 nm 绿光输出的最高功率为 0.05 W,倍频效率为 0.6%,为其最高倍频效率。

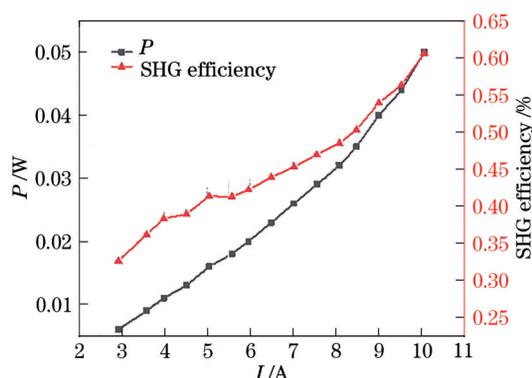


图 3 基于普通商用光栅的光纤激光器实验结果

Fig. 3 Experimental results of fiber laser based on common commercial grating

3 理论分析及实验结果

3.1 倍频理论分析

介质与强光作用会产生极化现象,当足够强的基频光束打到倍频晶体上时,倍频晶体内部产生非线性效应,从而产生倍频信号,通过波耦合方程可以求出倍频信号的强度、转换效率等一些重要参数,忽略基频光通过倍频晶体时的衰减,在倍频过程中认为两基频光特性相同,倍频光强为^[16]

$$I_{2\omega} = \frac{8\pi^2 L^2 d^2 d_{\text{eff}}^2}{\epsilon_0 n_{\omega}^2 n_{2\omega} \lambda_{\omega}^2 c} I_{\omega}^2 \sin^2\left(\frac{\Delta k L}{2}\right), \quad (1)$$

式中: L 为晶体长度; ϵ_0 为空气的介电常数; λ_{ω} 为基频光的波长; n_{ω} 、 $n_{2\omega}$ 分别为基频光在晶体中的折射率及

倍频光在晶体中的折射率; I_ω 为基频光强; d_{eff} 为倍频晶体的有效非线性系数; Δk 为相位匹配因子。倍频效率即输出的倍频光功率 $P_{2\omega}$ 与基频光功率 P_ω 之比为

$$\eta_{\text{SHG}} = \frac{P_{2\omega}}{P_\omega} = \frac{I_{2\omega}}{I_\omega} = \frac{8\pi^2 L^2 d_{\text{eff}}^2}{\epsilon_0 n_\omega^2 n_{2\omega} \lambda_\omega^2 c} I_\omega \sin^2 \left(\frac{\Delta k L}{2} \right) \quad (2)$$

由(2)式可看出,倍频效率与相位匹配因子 Δk 有关,即

$$\Delta k = \frac{2\pi n}{\Delta \lambda} \quad (3)$$

Δk 与基频光波长有关,若基频光输出波长偏离中心波长,会造成倍频效率降低^[16];此外当光栅线宽过大时也会引起基频光波长展宽,宽带多纵模的光纤激光将会影响谐波的转换效率,要获得高的转换效率,需要单模窄带宽频率稳定性好的光纤激光^[17-20]。

3.2 实验结果分析

由于光纤激光器输出的基频光是自然光^[15],基频光经 PBS+半波片,可得到线偏振的基频光源,如图 4 所示,窄带光纤激光器输出的基频光经偏振棱镜被分为两束线偏振光,即 s 偏振光和 p 偏振光,其中 s 偏振光是基频光经过偏振棱镜时被反射出去的那束光,p 偏振光是透过偏振棱镜的线偏振光,分别对两束分路的线偏振光进行功率测量,得到同一电流下 p 偏振光与 s 偏振光的功率几乎相等的结论,其功率随电流的变化如图 5 所示。光功率相加等于光纤激光器直接输出的基频光功率,p 偏振光的最高功率为 51.4 W,s 偏振光的最高功率为 50.2 W,未加入 PBS+半波片前基频光的功率基本等于 p 偏振光与 s 偏振光功率之和。

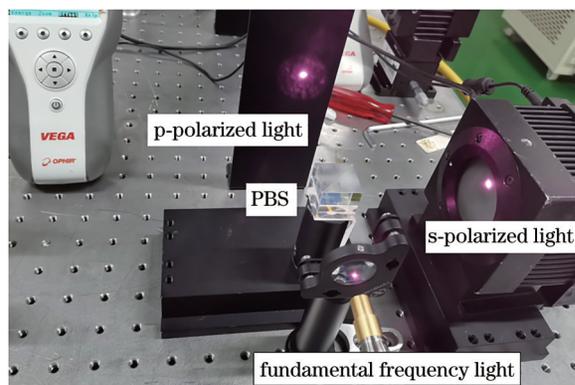


图 4 经偏振棱镜分光后基频光被分成两束功率几乎相等的光,即 s 偏振光和 p 偏振光
Fig. 4 Fundamental frequency laser is divided into two beams with almost equal power, namely s-polarized laser and p-polarized laser

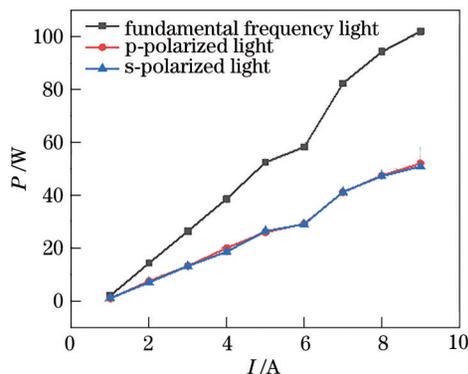


图 5 p 偏振光和 s 偏振光的功率随电流的变化
Fig. 5 Powers of p-polarized light and s-polarized light varying with current

对 p 偏振光进行倍频实验,实验光路图如图 6 所示,当电流增加到 9 A,即 p 偏振基频光功率等于 51 W 时,倍频得到 7.3 W 的 532 nm 绿光,倍频效率为 14.2%。

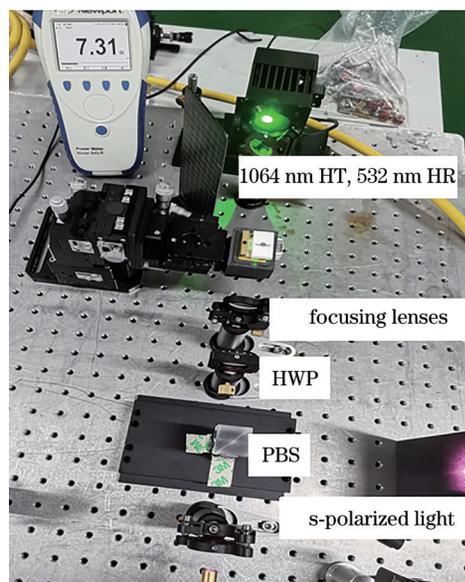


图 6 对 p 偏振光进行倍频(得到功率为 7.3 W、波长为 532 nm 的绿光)
Fig. 6 Frequency doubling of p-polarized laser (532 nm green laser is obtained with 7.3 W power)

如图 7 所示,将偏振棱镜移除,此时基频光源为自然光,当电流增加到 9 A 时即基频光源功率为 100 W 时,倍频得到 11.6 W 的 532 nm 绿光,倍频效率为 11.6%。

图 8(a)为利用 p 偏振基频光进行倍频实验得到的实验结果,图 8(b)为去掉 PBS+半波片后,进行倍频实验得到的实验结果。由图 8(b)可知,当窄带光纤激光器输出的基频光的功率为 100 W 时,倍频

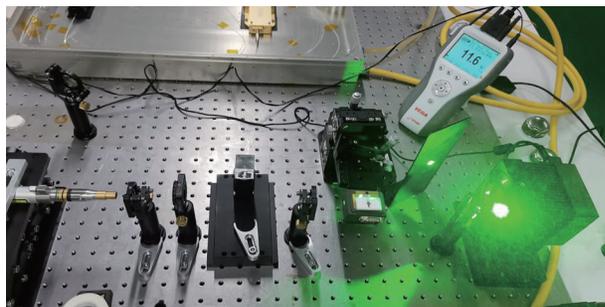


图 7 基频光源为自然光时倍频得到 11.6 W 的 532 nm 绿光
Fig. 7 532 nm green laser is obtained with 11.6 W power when fundamental laser source is natural light

得到最大功率为 11.6 W 的 532 nm 绿光,最大倍频效率为 11.6%。由图 8(a)可知,当在基频光后面加入 PBS+半波片后,得到 532 nm 绿光的最大功率为 7.3 W,最大倍频效率为 14.2%;若对 s 偏振光也进

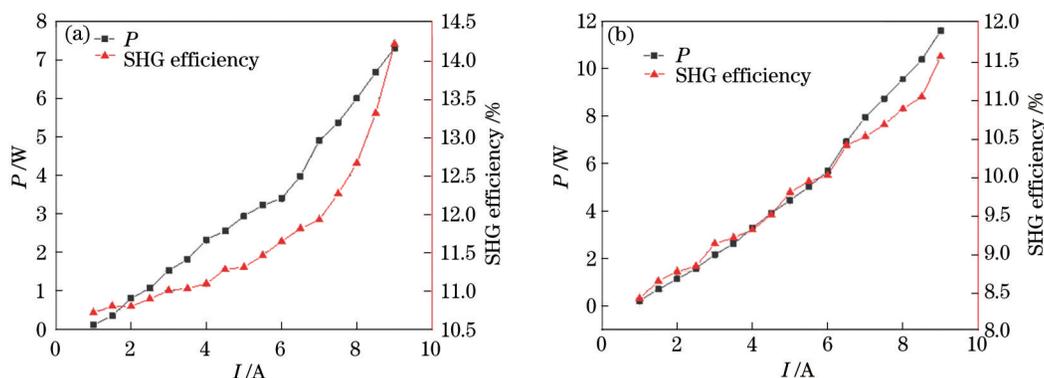


图 8 532 nm 绿光功率随电流的变化曲线以及倍频效率随电流的变化。(a)以 p 偏振光为倍频光源;(b)去掉 PBS+半波片
Fig. 8 Variation of 532 nm green laser power with current and change of frequency doubling efficiency with current. (a) Using p-polarized laser as frequency doubling source; (b) after removing PBS and half wave plate

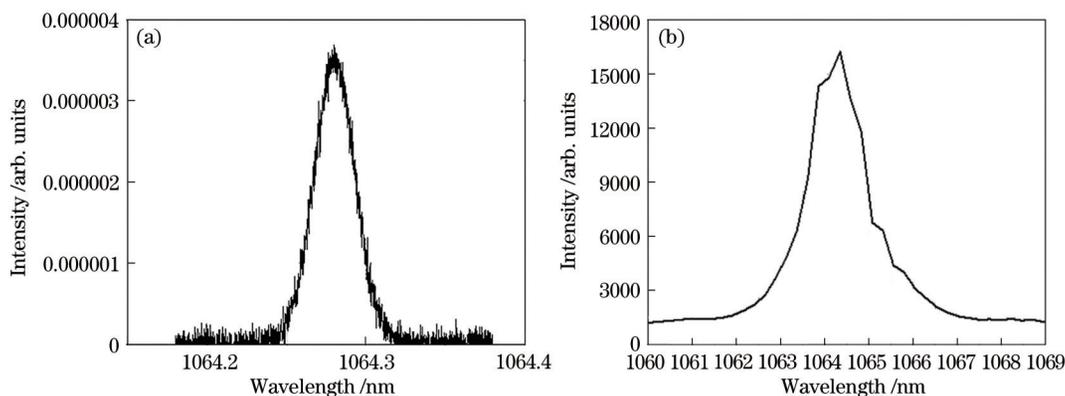


图 9 不同激光器的基频光光谱图。(a)窄带宽光纤激光器;(b)普通商用光纤激光器
Fig. 9 Spectra of fundamental frequency laser from different lasers. (a) Narrow bandwidth fiber laser; (b) common commercial fiber laser

4 结 论

基于窄线宽光栅的光纤激光器输出的 1064 nm

行倍频实验,再利用合束技术将倍频得到的两束绿光进行合束,则有望将绿光功率提高至 14 W 以上。

当窄带宽光纤激光器的基频光功率为 8 W 时,得到 0.69 W 的绿光,倍频效率为 8.6%,而当普通商用光纤激光器的基频光功率为 8 W 时,倍频效率为 0.6% (图 3)。由此可见,窄带宽光纤激光器的倍频效率比普通商用光纤激光器的高,基频光功率同为 8 W 时,窄带宽光纤激光器的倍频效率比普通商用光纤激光器的倍频效率高了 10 倍以上,说明利用线宽小于 0.05 nm 的光栅控制基频光带宽,以提高倍频效率是可行的。

对窄带宽光纤激光器输出的基频光进行光谱测试,得到如图 9(a)所示的光谱,由图中可知该基频光的输出光谱带宽为 0.05 nm,与窄带光栅输出光谱宽度(图 2)几乎一致,而普通商用光纤激光器基频光输出的光谱带宽约为 2.2 nm,如图 9(b)所示。

基频光的光谱宽度为 0.05 nm,其工作方式为连续输出,倍频得到最大功率为 11.6 W 的 532 nm 绿光,倍频效率为 11.6%,该值比光谱带宽为 2.2 nm 的普

通商用光纤激光器的倍频效率高。基于窄线宽光栅的光纤激光器在保证功率达到技术指标的前提下,减小了基频光带宽,提高了倍频效率。基频光的偏振特性对倍频效率也有影响,线偏振的基频光比自然光的倍频效率高,通过偏振棱镜得到线偏振的基频光源,经倍频得到最高绿光功率为 7.3 W,倍频效率为 14.2%,若对经过偏振棱镜时被反射出去的 s 偏振光进行倍频实验,再经合束技术将两束绿光合束,则有望得到 14 W 以上的 532 nm 绿光。有色金属例如铜、金对绿光的吸收比近红外光的吸收强约 8~10 倍,因此绿光激光器在铜材、金材的焊接上的能耗比红外激光器低,这意味着,当红外激光器需要 10 kW 的功率来焊接铜材或其他金属材料时,使用绿光激光器仅需要约 1~2 kW 的功率,可见此绿光激光器用于有色金属加工等可达到更好的效果。

参 考 文 献

- [1] Zhou Y H, Zhang J, Feng A X, et al. Damage law and mechanism of bronze based diamond grinding wheel by picosecond green laser dressing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(6): 0602116.
周远航, 张健, 冯爱新, 等. 皮秒绿激光修整青铜基金刚石砂轮损伤规律与机制[J]. 中国激光, 2021, 48(6): 0602116.
- [2] Jin X, Zhang L, Zhou Y, et al. Clinical study on treatment of conjunctival relaxation with frequency doubling Nd: YAG laser[J]. Chinese Journal of Laser Medicine & Surgery, 2019, 28(6): 308-313.
金熙, 张磊, 周颖, 等. 倍频 Nd: YAG 激光治疗结膜松弛症的临床研究[J]. 中国激光医学杂志, 2019, 28(6): 308-313.
- [3] Yan B X, Wang Y W, Qi Y, et al. Study of color proportion and color temperature in laser display[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 0401004.
颜博霞, 王延伟, 亓岩, 等. 激光显示光源颜色配比和色温研究[J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0401004.
- [4] Geng A C, Yang X D, Yang M J. Progress of research on all-solid-state green laser[J]. Laser Journal, 2011, 32(1): 57-59.
耿爱丛, 杨晓冬, 杨明江. 全固态绿光激光器研究进展[J]. 激光杂志, 2011, 32(1): 57-59.
- [5] Liu C, Qi Y F, Ding Y Q, et al. All-fiber, high power single-frequency linearly polarized ytterbium-doped fiber amplifier[J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(3): 031402.
- [6] Liu H K, He B, Zhou J, et al. Coherent beam combination of two nano second fiber amplifiers by an all-optical feedback loop[J]. Optics Letters, 2012, 37(18): 3885-3887.
- [7] He J, Zhao H M, Zhou J, et al. Single-ended fiber coupled acousto-optic Q-switched all-fiber laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(5): 0502008.
何晶, 赵宏明, 周军, 等. 单端光纤耦合的声光调 Q 全光纤化光纤激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0502008.
- [8] Jiao M L, Lü X J, Liu C, et al. Second harmonic generation characteristics of continuous wave narrow-line spectrum all fiber amplifier in PPSLT[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(3): 0302005.
焦梦丽, 吕新杰, 刘驰, 等. 周期极化钽酸锂倍频窄谱线全光纤连续激光放大器特性[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0302005.
- [9] Gapontsev V, Avdokhin A, Kadwani P, et al. SM green fiber laser operating in CW and QCW regimes and producing over 550 W of average output power [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8964: 896407.
- [10] Zeng X, Cui S Z, Qian J P, et al. 10 W low-noise green laser generation by the single-pass frequency doubling of a single-frequency fiber amplifier[J]. Laser Physics, 2020, 30(7): 075001.
- [11] Zhu X Z, Zhou J, Lou Q H, et al. 59 mW green light second harmonic generation of quasi-CW double-cladding fiber laser in periodically poled lithium niobate[J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(7): 777-779.
朱晓峥, 周军, 楼祺洪, 等. 准连续双包层光纤激光在周期性极化钽酸锂晶体中倍频产生 59 mW 绿光[J]. 中国激光, 2004, 31(7): 777-779.
- [12] Hayasaka K, Zhang Y, Kasai K. Generation of 22.8 mW single-frequency green light by frequency doubling of a 50-mW diode laser[J]. Optics Express, 2004, 12(15): 3567-3572.
- [13] Zhang K, Bai J D, He J, et al. Influence of laser linewidth on the conversion efficiency of single-pass frequency doubling with a PPMgO:LN crystal[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(7): 074207.
张孔, 白建东, 何军, 等. 激光线宽对单次通过 PPMgO: LN 晶体倍频效率的影响[J]. 物理学报, 2016, 65(7): 074207.
- [14] Wu J R, Lü Z Q, Lu X, et al. Characteristics of second harmonic generation in erbium doped femtosecond fiber lasers based on quasi phase matching [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(7): 0701001.
吴嘉瑞, 吕志强, 陆星, 等. 基于准相位匹配的掺铒

- 飞秒光纤激光器倍频特性研究[J]. 中国激光, 2018, 45(7): 0701001.
- [15] Fu W J, Yu J, Kang Y Z, et al. 13 mW-continuous-wave green light output by quasi-phase-matched frequency doubling in periodically poled KTP[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(6): 1063-1066.
- 付伟佳, 于建, 康玉琢, 等. 准相位匹配 PPKTP 晶体连续倍频 13 mW 绿光输出[J]. 光学学报, 2007, 27(6): 1063-1066.
- [16] Jia P J. Study on LD pumped ytterbium (Yb^{3+})-doped fiber laser and its frequency-doubling characteristics[D]. Xi'an: Northwest University, 2007.
- 贾培军. LD 泵浦掺镱光纤激光器及其倍频特性的研究[D]. 西安: 西北大学, 2007.
- [17] Wu W D, Ren T Q, Zhou J, et al. Frequency doubling of narrow-linewidth pulsed fiber laser[J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(5): 050604.
- [18] Georgiev D, Gapontsev V P, Dronov A G, et al. Watts-level frequency doubling of a narrow line linearly polarized Raman fiber laser to 589 nm[J]. Optics Express, 2005, 13(18): 6772-6776.
- [19] Champert P A, Popov S V, Taylor J R. Highly efficient, variable pulse format, 770 nm source based on powerful seeded fibre amplifier and second-harmonic generation in periodically poled KTP[J]. Electronics Letters, 2000, 36(7): 648-649.
- [20] Han C Q. Study of the second harmonic generation with fiber laser[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009.
- 韩春谦. 光纤激光器中倍频技术的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009.