文章编号:1001-5078(2015)10-1206-05

· 激光器技术 ·

561 nm 全固态低噪声激光器研究

马 威,高兰兰,朱心宇 (长春理工大学,吉林长春130022)

摘 要:利用激光二极管端面泵浦 Nd:YAG 晶体,通过 LBO 非线性晶体腔内倍频,利用双折射滤 波器进行选频,最终获得稳定的低噪声 561 nm 激光输出。LBO 晶体尺寸为 2 mm × 2 mm × 10 mm, 采用 I 类相位匹配切割。抽运功率为 4.8W 时,低噪声 561 nm 激光最大输出功率为 70 mW, 光 - 光转换效率为 1.46%。作为对比,再利用布氏片进行选频,得到的 561 nm 激光的噪声高 于利用双折射滤波器进行选频时的噪声,实验结果与理论分析一致。

关键词:激光器;561 nm;双折射滤波器;LBO 晶体;低噪声

中图分类号:TN248.1 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2015.10.012

Research on 561 nm all-solid-state low-noise laser

MA Wei, GAO Lan-lan, ZHU Xin-yu

(Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Using a laser diode end pumped Nd : YAG crystal, LBO nonlinear crystal intracavity frequency doubling, birefringent filter(BF) frequency-selecting, a stable 561 nm laser output with low noise is obtained. The size of LBO crystal is 2 mm \times 2 mm \times 10 mm, and the crystal is cut with type I phase matching. The 561 nm laser maximum output power with low noise is 70 mW when the pump power is 4.8 W, and the optical to optical conversion efficiency is 1.4%. As a contrast, using frequency-selecting with BP, the obtained noise of 561 nm laser is higher than that by BF. The experimental results and theoretical analysis are consistent.

Key words: lasers; 561 nm; BF; LBO crystal; low noise

1 引 言

激光器噪声是衡量其性能的主要因素之一。激 光器噪声越低,输出光强出现瞬间尖峰的几率就越 低,激光器的功率稳定性越高,而且会减少对腔内光 学元件的损伤,从而延长激光器的工作寿命^[1]。波 长为561 nm 黄绿光在生物医学方面有重要的应用, 它是共焦显微镜流式细胞仪及其他生物成像装置的 理想光源,同时也是激光治疗复杂眼科疾病的最佳 波长^[2,3]。因此,研究高稳定性低噪声561 nm 激光 输出是该波段激光器实现临床应用的关键。但在腔 内倍频激光器中,由于工作物质中的交叉饱和以及 非线性晶体中的和频效应的作用,使得腔内倍频激 光器功率起伏比较大,制约了其发展,因此必须采取 措施使激光器低噪声运转。

1986年,T. Baer^[4]利用腔内倍频多纵模速率方 程理论对腔内倍频激光器的功率起伏问题给出了合 理解释,并指出强迫激光器单频运转可以消除晶体内 的和频效应,获得稳定的倍频光输出,这在实验上也 得到了验证。2006年,Jia等^[5]报道了561 nm 连续 输出在抽运功率为10 W时得到了1.2 W的561 nm 绿光。2013年,邵志强等^[6]在808 nm LD的抽运功 率为5 W时,获得了123 mW的561 nm 输出。但是

基金项目:2011 年高等学校博士学科点专项科研基金联合项目(No. 20112216110006)资助。 作者简介:马 威(1988 -),女,硕士研究生,研究方向为光子学与光电子技术。E-mail:846432717@qq. com 收稿日期:2015-01-19;修订日期:2015-01-30

目前国内外有关毫瓦级低噪声 561 nm 黄绿光的报 道还比较少。

本文利用 4.8 W 的激光二极管(LD) 抽运 Nd:YAG晶体,产生1123 nm 的基频光,再分别用双 折射滤波器(BF)、布氏片(BP)进行选频,最后利用 I类相位匹配切割的 LBO 非线性晶体进行腔内倍 频,实现 561 nm 激光输出。实验结果显示,利用双 折射滤波器进行选频时,激光器容易产生低噪声 561 nm 激光输出。561 nm 激光输出的信噪比为 7%,用布氏片选频时,激光器的噪声比较大,信噪比 达到 42%,实验表明,选用双折射滤波器实现选频 是得到低噪声激光输出的有效方法。

2 实验装置

实验装置如图1所示,激光二极管(LD)作为抽 运源,最大输出功率为5W,输出中心波长为 808 nm,抽运光经过透镜系统准直聚焦后入射到激 光介质。激光介质是 Nd³⁺掺杂原子分数 1% 的 Nd:YAG 晶体,尺寸为3 mm×3 mm×3 mm,用铟 铂包裹并且固定在一个铜槽中,入射面镀有 808 nm 增透膜(T>90%)和1123 nm 高反膜(R>99.8%)。 出射面镀有 1123 nm 增透膜(T>99%)。LBO 倍频 晶体,尺寸为2 mm ×2 mm ×10 mm, I 类相位匹配 切割,两边均镀有561 nm 和1123 nm 的增透膜(T> 99%)。输出耦合镜 OC 的曲率半径为 100 mm, 左 表面镀有 1123 nm 的高反膜(R > 99%)和 1064、 1318 nm 的增透膜(T>90%),右表面镀有 561 nm 的增透膜(T>90%)。LD 用半导体制冷器(TEC) 控温,使 LD 发射波长与Nd:YAG晶体的吸收波长 吻合。整个谐振腔用一个 TEC 实现精确温控确保 激光器稳定运行。谐振腔的长度约为30 mm。实验 选用的双折射滤波器(未镀膜)的厚度为2 mm,选 用的布氏片(未镀膜)的厚度为1 mm,均呈布氏角 放置。



Fig. 1 The schematic of the experimental setup

3 实验结果

如图1(a)所示,将LBO放到谐振腔中,调节LBO 的放置角度,使得基频光以最佳相位匹配角方向入 射,采用OCEAN OPTICS 公司 HR4000CG-UV-NIR 光 谱仪测量输出的二次谐波的光谱特性,得到如图2所 示的谱线图,由图可以看出,激光输出为多条谱线。



图 2 谐振腔内只插入 LBO 时 561 nm 的谱线图 Fig. 2 The spectrum of 561 nm when only the LBO in cavity

将双折射滤波器(BF)以布儒斯特角放置到谐振腔中,并使其调谐角为0.744 rad,微调 LBO 和输出镜的位置,以获得最佳输出光。输出功率为30 mW时,测得输出激光的噪声如图3 所示。



图 3(a) 为没有光信号输入时示波器的噪声图,

图3(b)为有561 nm激光输入时的噪声图,对比图3 (a)和(b)可以看出,获得了561 nm低噪声输出,并 且实验过程中发现随着功率的升高,噪声有不断增 加的趋势。这是因为,随着泵浦功率的增大,腔内纵 模数量不断增加,模式竞争和非线性耦合效应增加 导致噪声增大。用格兰棱镜测得561 nm激光的偏 振比为100:1。同时,采用OCEAN OPTICS 公司 HR4000CG-UV-NIR光谱仪测量输出的二次谐波的 光谱特性,如图4 所示。从图中可以看出561 nm激 光为单谱线输出。双折射滤波器成功抑制了竞争谱 线(1112 nm、1116 nm)振荡,从而降低了激光噪声。

如图 1(b) 所示,将布氏片以布氏角放到谐振腔 中,调节 LBO 和输出镜的位置,以获得最佳输出光。 测量输出激光的噪声,如图 5 所示,可以看出此时激 光器具有很高的噪声,信噪比达到 42%。对比图 3 (b)的噪声情况,可以看出利用双折射滤波器的情 况下噪声更低。同时,采用 OCEAN OPTICS 公司 HR4000CG-UV-NIR 光谱仪测量输出的二次谐波的 光谱特性,如图 4 所示,从图中可以看出,用 BP 也 同样获得了 561 nm 的单谱线输出。









入电流,输出功率随泵浦功率的增加而升高,泵浦功 率为4.8 W时,最大输出功率为70 mW,光-光转 化效率为1.46%,输出功率关于泵浦功率的曲线如 图6所示。



图 6 561 nm 输出功率关于泵浦功率的曲线

Fig. 6 The output power of the 561 nm laser versus pump power 在实验过程中发现,将 BF 和 LBO 的位置调换,得 到的噪声大小相差很大,把 BF 放在接近 Nd:YAG 的 位置时,得到的噪声较小,出现这种现象的原因我们 会在以后的工作中进行研究。

4 理论分析

4.1 腔内倍频激光器产生噪声的原因

腔内倍频^[7]是中低功率激光器最常用的倍频 方法,但是由于空间烧空效应和和频效应的存在,激 光器的输出功率波动大、一般激光光强波动的频率 为数十赫兹,相干性和光斑质量也受到了影响,因此 解决腔内倍频激光器的噪声问题,已成为目前的研 究热点。561 nm 腔内倍频固体激光器产生噪声的 原因主要有以下几点:

(1) 基频光本身不同纵模间的竞争;

(2)1112,1116,1123 nm 谱线之间的竞争;

(3) 倍频光的三波耦合作用。

消除噪声^[8-9]的方案可以归结为强迫激光器单 频运转和改变激光器的偏振态。只要通过合理的膜 系设计以及各选频元件的调谐,就可以有效地消除 掉1112 nm、1123 nm 波长的光,从而减少各谱线之 间的竞争。本文采用在谐振腔内插入双折射滤波器 或布氏片来选频,从而迫使激光器单频运转,最终获 得561 nm 低噪声激光输出。

4.2 双折射滤波器的工作原理

双折射滤波器^[10](BF)通常由一片或多片天然 或人工石英晶体加工而成,每片 BF 加工成两表面 相互平行,它们的光轴可以与表面成一定角度,亦可 以平行于平面。我们主要用光轴与表面平行的 BF

1209

来滤光。

如图 7 所示为单元滤光片的工作原理图,我们 规定,包含光轴 C 且垂直于 BF 表面的平面称为主 平面,入射光和法线构成的平面称为入射面,并且入 射光的偏振方向与入射面重合,θ为入射角(布儒斯 特角),A 为主平面和入射面之间的夹角为调谐角,γ 为入射光线和光轴之间的夹角。由于石英晶体的双 折射效应,当一束平面偏振光入射到 BF 上,将会在 晶体中产生双折射现象,分解为 o 光和 e 光,当它们 通过 BF 后,会产生相位延迟,其相位延迟量为:

$$\delta = \frac{2\pi l(n_e - n_o) \sin^2 \gamma}{\lambda \sin \theta} \tag{1}$$

式中, *l* 为 BF 厚度, (*n_o* - *n_e*) 为 o 光和 e 光的折射率 差, λ 为入射光波长。由图 7 和式(1) 可知, 当以 BF 面法线为轴转动 BF 时, 相位延迟量 δ 也发生相应的 改变, 从 BF 透射的 o 光和 e 光, 若经过一个平行于入 射面的偏振片时, 两束光将会发生干涉, 其光强透射 比为:

$$T = \frac{I}{I_0} = 1 - \sin^2(2\phi)\sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)$$
(2)

其中, ϕ 为偏振面与电位移矢量D'(或 D')的夹角:

$$\sin\phi = \cot\gamma \left(\tan\theta - \frac{\sin\alpha}{\cos\theta\cos\gamma}\right) \tag{3}$$

其中, α 为光轴和 BF 表面的夹角,由于我们是用 BF 滤光,所以 $\alpha = 0$,因此:

$$\sin\phi = \cot\gamma \tan\theta$$
 (4)
把式(4)代入式(3)中,得:

$$T = 1 - 4 \cot^2 \gamma \tan^2 \theta (1 - \cot^2 \gamma \tan^2 \alpha) \sin^2 \left(\frac{\delta}{2}\right)$$
(5)

由式(5)得双折射滤波器的透过率关于调谐角的曲线,如图 8 所示。从图中可知,当调谐角为0.744 rad 时,1123 nm 基频光谱线的透过率为100%。在这个角度下,1116 nm 和1112 nm 的透过率远远小于 98.5%。巨大的插入损耗抑制了这两个谱线的振荡^[11],从而减小了激光器的噪声。



图 7 双折射滤光片的工作原理图 Fig. 7 Operation principle of birefringent filter



4.3 布氏片的工作原理

在谐振腔内插入布氏片^[12],可以起到两个作 用:①频率不同的纵模往返经过倍频晶体时,偏振方 向会略有不同,BP对存在s分量的纵模也会引起反 射损耗;②不同频率纵模的布氏角略不相同,某一角 度对于某一纵模为布氏角时,对其他纵模的 p 分量 可能会存在一定的反射性损耗。我们主要应用第一 点来抑制该纵模的形成,通过对各纵模的选择性损 耗实现选频,从而抑制噪声。

根据 Fresnel 定律,把入射光的电矢量分解为平行和垂直于入射面的 p 波和 s 波,他们的反射率 R_p 和 R_s 分别为:

$$R_{\rm p} = \tan^2(\alpha - \beta) / \tan^2(\alpha + \beta) \tag{6}$$

$$R_s = \sin^2(\alpha - \beta) / \sin^2(\alpha + \beta)$$
(7)

式中, α, β 分别为入射角和折射角, 空气和布氏片的 折射率分别为1和1.52, 由折射定律可知:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = 1.52 \tag{8}$$

由式(6)~(8)可得光波在 BP 表面的反射率曲 线,如图 9 所示。



由图得到布氏角约为 57°,此时 p 波的反射率 为零,s 波的反射率为 15%。由 Fresnel 定律可知, 只有当偏振方向与 BP 的 p 偏振面重合时损耗才为 零,对其他纵模则存在不同的损耗。但单个布氏片 的选频能力有限,在较高的抽运功率下还会形成多 纵模,加大激光器的噪声,因此,将 BF 插入谐振腔 内更容易获得低噪声。

5 结 论

利用 LD 端面泵浦 Nd:YAG 晶体,通过 LBO 非 线性晶体腔内倍频,利用双折射滤波器/布氏片进行 选频,抑制激光器噪声,获得稳定的低噪声 561 nm 激光输出。分别用 BF 和 BP 来选频,实验结果表明 选用 BF 选频的实验装置,获得较低的噪声,信噪比 为7%,实验结果与理论分析一致。通过合理的膜 系设计以及谐振腔内各元件合理的摆放位置,在抽 运功率为4.8 W 时,低噪声 561 nm 激光最大输出功 率为70 mW,光 - 光转换效率为1.46%。由于 LBO 晶体经过多次反复试验,损坏比较严重,因此得到的 输出功率较低,如果更换新的 LBO 晶体,一定可以 获得更高的转换效率。

参考文献:

- [1] GAO Zhihong. Analysis on noise characteristic of intracavity sun-frequency laser [D]. Changchun: The Changchun University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
 高志红. 腔内和频激光器噪声特性分析[D]. 长春:长 春理工大学,2012.
- [2] William Telford, Matilde Murga, Teresa Hawley. DPSS yellow-green 561 nm lasers for improved fluorochrome detection by flow cytometry [J]. Cytometry Part A, 2005, 68 (1):36-44.
- [3] Jing Gao, Xianjin Dai, Long Zhang, 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.
- [4] T Baer. Large-amplitude fluctuation due to longitudinal mode coupling in diode-pumped intracavity-doubled Nd: YAG laser[J]. J. Opt. Soc. Am. (B), 1986, 3(9): 1175 - 1180.
- [5] Fuqiang Jia, Quan Zheng, et al. Yellow light generation by frequency doubling of a diode-pumped Nd : YAG laser
 [J]. Optics Communications, 2006, 259:212 - 215.
- [6] SHAO Zhiqiang, GAO Lanlan, ZHANG Chen. Research on 561 nm frequency-double all-solid-state laser[J]. Laser &

Optoelectronics Progress, 2013, 50:031401 – 1 ~031401 – 5. (in Chinese)

邵志强,高兰兰,张辰.全固态 561nm 倍频激光器研究 [J].激光与光电子学进展,2013,5:031401-1~ 031401-5.

[7] WANG Xincheng. Study on the noise characteristics of all-solid-state frequency-double laser [D]. Changchun: The Changchun university of science and technology, 2008. (in Chinese)

王心诚.全固态倍频激光器噪声特性研究[D].长春: 长春理工大学,2008.

[8] XUE Qinghua. Study on the noise characteristics of allsolid-state blue laser [D]. Changchun: Changchun Institude of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2004. (in Chinese)
费时状 合用女 基本 激素 思聞書 性材 的研究 [D] 长

薛庆华.全固态蓝光激光器噪声特性的研究[D].长春:长春光学精密机械与物理研究所,2004.

[9] GUO Jiaxi, JIN Guangyong, LI Yongda, et al. Methods of obtain low-noise operation in DPSSL [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2009, 32(1):116-118. (in Chinese) 郭家喜,金光勇,李永大,等. LD 泵浦全固态激光器的 低噪声运转实现方法[J]. 长春理工大学学报, 2009,

32(1):116 - 118.
[10] MU Tingkui. Study on the BF characteristics of Lyot Si

crystal[D]. Qufu:Qufu Normal University,2007. (in Chinese)

穆廷魁. Lyot 型石英晶体双折射滤光片特性研究[D]. 曲阜:曲阜师范大学,2007.

[11] LI Zhi, TAN Huiming, TIAN Yubing. Study of the wavelength suppression of etalon in intracavity frequency doubling laser[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(1):17-21. (in Chinese)
李智,檀慧明,田玉冰. 标准具在腔内倍频激光器中的

波长抑制研究[J]. 激光与红外,2014,44(1):17-21.

[12] ZHENG Quan, ZHAO Ling, TAN Huiming, et al. Single-frequency CW and pulse operation of diode-pumped green lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29(9):769 – 772. (in Chinese)
郑权,赵岭,檀慧明,等. 用布氏片实现有效连续和脉冲单频绿光输出[J]. 中国激光, 2002, 29(9): 769 – 772.