高功率单频LBO腔内倍频461 nm钛宝石激光器

李慧娟 张 淼 李凤琴

山西大学光电研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006

摘要 利用全固态单频绿光激光器作为抽运源抽运钛宝石晶体,采用六镜环形谐振腔结构。在谐振腔内插入I类临界相位匹配的LBO晶体进行腔内倍频,TGG晶体和宽带半波片(HWP)组成的光学单向器保证单频运转。加入三片厚度分别为1、2、4 mm的双折射滤波片组合和一片0.25 mm的控温标准具片作为调谐元件,实现了高功率单频可调谐461 nm蓝光钛宝石激光器。在14 W的抽运功率下,选取LBO倍频晶体的最佳长度为7.3 mm时,获得了最大功率为1.02 W的单频可调谐蓝光输出,中心波长为460.86 nm,3 h内其长期稳定性优于±1.3%,光束质量得到了明显的改善,其M^2因子优于1.59,蓝光最大调谐范围为20 nm。

关键词 激光器; 钛宝石激光器; 高功率; 阈值; 腔内倍频

中图分类号 0436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201643.0302003

High-Power Single-Frequency 461 nm Generation from an Intracavity Doubling of Ti∶Sapphire Laser with LBO

Li Huijuan Zhang Miao Li Fengqin

State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, *China*

Abstract A high-power single-frequency 461 nm light by intracavity doubling of Ti:sapphire laser is designed and built. An astigmatically compensated double-folded resonator with six mirrors is employed to give two tight-focus regions, where Ti:sapphire and doubling crystals are located respectively. A type-I critical phase-matched LBO, an optical diode composed with a TGG crystal and a broadband half wave plate (HWP) are placed inside the resonator for the intracavity frequency doubler and forcing the laser to operate unidirectionally. Three birefringent filters with different thicknesses of 1, 2, 4 mm and a temperature controlled etalon with thickness of 0.25 mm are inserted in the cavity to tune the fundamental wavelength of 461 nm Ti∶sapphire laser. With the pump power of 14 W and an optimized LBO crystal with the length of 7.3 mm, the tunable single-frequency second harmonic output of 1.02 W at 460.86 nm is obtained. The peak-to-peak fluctuation of the power is less than ±1.3% within 3 h. The measured beam quality of M^2 and the tuning range of blue laser are better than 1.59 and 20 nm, respectively.

Key words lasers; Ti:sapphire laser; high power; threshold; intracavity doubling

OCIS codes 140.3515; 140.3570; 140.3580

1 引 言

掺钛蓝宝石激光器的激光输出光谱覆盖了700~1000 nm的红外和近红外波段[1],是迄今为止调谐范围最宽、发展最迅速的可调谐固体激光器,而且与非线性变频技术相结合产生新频率的激光,可进一步拓展其光波输出范围。目前,由倍频方式产生的蓝光钛宝石激光器已经在高密度光学数据存储、彩色激光显示、激光

收稿日期: 2015-09-11; **收到修改稿日期**: 2015-10-22

基金项目: 国家青年基金(11504220)、山西省青年基金(2015021022)

作者简介: 李慧娟(1989—),女,硕士研究生,主要从事于光量子器件与全固态激光技术方面的研究。

E-mail: lhjfriends@163.com

导师简介: 李凤琴(1977—),女,博士,讲师,主要从事于光量子器件与全固态激光技术等方面的研究。

E-mail: lfq@sxu.edu.cn(通信联系人)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

医学、光谱学、激光成像等领域有着广泛的应用[2-3]。与半导体外腔倍频得到的蓝光激光器相比，全固态蓝光钛宝石激光器具有波长可变、空间光束质量好、线宽窄、噪声低、相干长度长等不可替代的优点，近年来，作为原子冷却与原子俘获的优质光源，在激光冷却研究领域发挥着越来越重要的作用。

461 nm的蓝光激光器是锶原子一级冷却和俘获实验的主光源[4]，其性能指标对锶冷原子样品的制备非常重要。除了要求蓝光单纵模运转并且频率在一定范围内可调谐外，还要求输出光强度足够大，以得到尽可能多的原子数目并且提高捕获速率，并且激光的空间模式要好，尽可能实现单模高斯光束基模截面呈高斯分布，以保证较高的囚禁和冷却效率[5]。目前，这类激光器商品主要集中于半导体外腔倍频激光器的发展，输出功率可达到500 mW(Toptica.Co.Ltd.),但是其系统复杂、体积比较庞大、蓝光光束质量差、噪声比较大；日亚公司最近也推出了一款体积比较小、易于操作的460 nm±5 nm的直接半导体激光器，输出功率可达到100 mW，但是由于半导体材料容易老化，性能指标受环境温度的影响容易产生波动。因此,为了弥补商用461 nm半导体激光器的缺陷，2005年，莱斯大学的A D Saenz等[6]就利用$KNbO_3$晶体外腔倍频钛宝石激光器的方式实现了输出功率为125 mW的461 nm可调谐蓝光输出，并用于锶原子的一级冷却光源、锶原子吸收成像、光致电离谱等实验。2010年，彭瑜等[7]也采用PPKTP晶体外腔倍频钛宝石激光器得到了310 mW的461 nm蓝光输出，但是在这些外腔倍频的钛宝石激光器系统中，需要采用锁相放大技术以及电子伺服系统等锁定倍频腔以得到稳定的倍频蓝光输出,使得整个系统比较复杂，体积比较庞大。与外腔倍频激光器相比[8-9]，内腔倍频的激光器结构紧凑、腔内功率密度比较高，内腔损耗小、较容易提高转换效率，而且容易在谐振腔内插入各类光学元件以改善激光器输出性能[10-12]。因此在2011年，李凤琴等[13]设计了一种内腔倍频式单频可调谐461 nm蓝光钛宝石激光器，选用有效非线性系数比较高的I类临界相位匹配BIBO(d_{eff}~3.41 pm/V)作为内腔倍频晶体，当抽运源输出功率为8 W时，得到了最大输出功率为280 mW的461 nm可调谐单频蓝光输出，但是，受走离效应的影响，蓝光光束质量仍然比较差。

为了进一步提高单频蓝光输出功率、改善激光输出光束质量，本文选用走离角度较小的LBO晶体作为内腔倍频晶体实现461 nm的单频蓝光输出。在分析走离效应对倍频效率影响的基础上，选择LBO倍频晶体的最佳长度为7.3 mm，当绿光抽运功率为14 W时，得到了中心波长为460.86 nm的单频蓝光输出，最高输出功率可达到1.02 W，光-光转化效率为7.3%，光束质量得到了明显的改善，其M^2因子优于1.59，长期功率稳定性3 h内小于±1.3%，将激光器锁定在法布里-珀罗(F-P)干涉仪的中心频率上时，其频率漂移优于±4.2 MHz(15 min)。

2　设计原理

2.1　激光阈值及谐振腔设计

从钛宝石晶体的荧光谱线中可以看出[14]，虽然钛宝石晶体的荧光谱线比较宽，但晶体在922 nm处的增益比较低，大概只有最高增益的23%，这样就比较难得到高功率的922 nm基频光输出，因此，在实验中降低抽运阈值将有利于提高转换效率，对于端面抽运的固体激光器，抽运阈值可表示为[15]

$$P_{\mathrm{th}}=\frac{1}{\eta_{\mathrm{t}}}\frac{\pi h\upsilon_{\mathrm{p}}\omega_0^2}{2\sigma\tau}(L_{\mathrm{cav}}+L_{\mathrm{xtl}})\left(1+k^2\right)\left[1-\exp\left(-\alpha l\right)\right]^{-1},\tag{1}$$

式中$\eta_{\mathrm{t}}=95\%$为抽运光传输效率，$h\upsilon_{\mathrm{p}}$为抽运光能量；σ为受激发射界面($\sigma_{922}=0.874\times10^{-19}\ \mathrm{cm}^2$)；谐振腔内线性损耗$L_{\mathrm{cav}}=4.85\%$；$k=0.75$为抽运光腰斑半径与钛宝石晶体处基频光腰斑半径的比值；钛宝石晶体的寄生吸收损耗$L_{\mathrm{xtl}}=1-\exp\left(\frac{-\alpha l}{Q_{\mathrm{FOM}}}\right)$；$\alpha=1.05\ \mathrm{cm}^{-1}$为钛宝石晶体对抽运光的吸收系数；$Q_{\mathrm{FOM}}=275$为钛宝石晶体的品质因子(FOM)；那么，得到了922 nm基频光的抽运阈值随着钛宝石晶体处的腰斑半径变化曲线，如图1所示。

从图1中可以看出，降低钛宝石晶体处的腰斑半径能够有效地降低激光抽运阈值功率，提高922 nm基频光的转换效率。因此，实验中为了实现两个较小腰斑位置来分别放置钛宝石晶体和倍频晶体，并且有效地降低抽运阈值功率，设计了如图2所示的六镜环形谐振腔结构($M_3\rightarrow M_4\rightarrow M_5\rightarrow M_6\rightarrow M_7\rightarrow M_8$)，其中，$M_3$、$M_4$和$M_6$、$M_7$分别为两对曲率半径为75 mm的平凹镜，$M_5$、$M_8$为两个平面镜，当调整总的腔长为718 mm、$l_1=37.4$ mm、像散补偿角度$\theta_0=17.5^\circ$时，利用*ABCD*矩阵计算得到了子午面和弧矢面内钛宝石晶体与倍频晶体处的腰斑半径随着M_6、M_7之间的距离l_3的变化曲线图，如图3所示。实验中，选取$l_3=82.5$ mm时，得到了

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

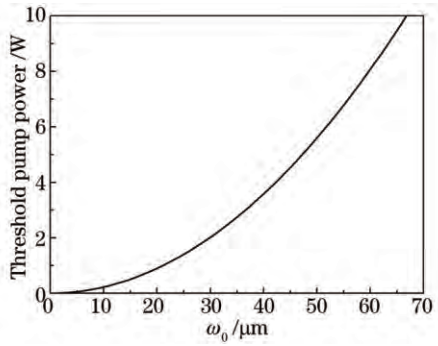

图1 抽运阈值随着激光晶体处腰斑半径的变化曲线

Fig.1 Dependence of threshold pump power on radius of Gaussian waist at Ti:S crystal (ω_0)

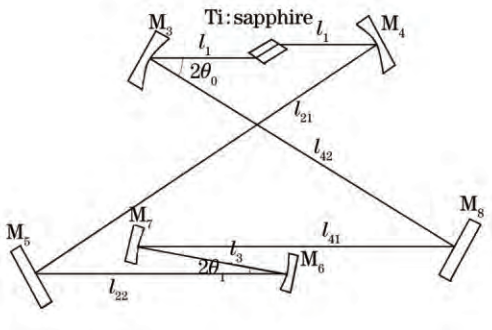

图2 激光谐振腔结构

Fig.2 Configuration of laser resonator

激光晶体处的腰斑半径为 $\omega_0 = 30$ μm，对应的激光抽运阈值大约为2 W。

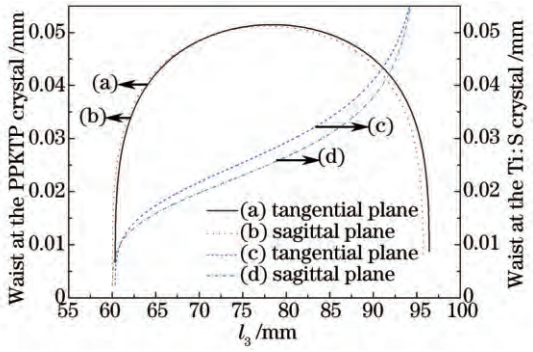

图3 LBO和钛宝石晶体中心处腰斑半径随l_3变化曲线。(a)、(b)分别为LBO晶体中心子午面和弧矢面上腰斑半径；(c)、(d)分别为钛宝石晶体中心子午面和弧矢面上腰斑半径

Fig.3 Waist size at the center of LBO and Ti:S crystals as a function of distance l_3. (a), (b) Waist at LBO crystal of tangential and sagittal planes, respectively; (c), (d) waist at Ti:S crystal of tangential and sagittal planes, respectively

2.2 倍频晶体

目前，在蓝光方面使用比较广泛的倍频晶体有$KNbO_3$、BBO、BIBO、LBO等，虽然$KNbO_3$晶体的有效非线性系数最大(d_{eff}~13 pm/V)，但它的光谱接受带宽和温度接受范围比较窄；BBO的有效非线性系数也比较大(d_{eff}~2.08 pm/V)，但是相位匹配角度范围窄、走离效应最严重，在实际使用中也容易潮解；因此在实验中，优先考虑LBO和BIBO晶体作为倍频晶体。对于临界相位匹配的倍频晶体，当入射角满足相位匹配条件时，由于光线传播方向与晶体的一个主轴不平行，使得在倍频过程中不同偏振态的基频光与倍频光的光线方向在倍频晶体中传播一个最大相互作用长度l_ρ后逐渐分开，分离后产生的倍频光不再与之前的倍频光相干叠加，倍频效率将不再提高，也就是所谓的走离效应。在倍频晶体中的最大相互作用长度l_ρ为[16]

$$l_\rho = \sqrt{\pi} \times \frac{\omega_1}{\rho}, \tag{2}$$

式中ω_1为基频光在倍频晶体中心的腰斑半径，ρ为走离角。在满足相位匹配的条件($\Delta k = 0$)下，当倍频晶体的长度取l_ρ时，近场高斯光束的倍频效率与有效非线性系数和倍频晶体长度乘积的平方成正比，即

$$\eta_{\text{SHG}} = \frac{P_{2\omega}}{P_\omega} \propto l_\rho^2 d_{\text{eff}}^2, \tag{3}$$

式中d_{eff}为有效非线性系数。由(2)、(3)式可以看出

$$\eta_{\text{SHG}} \propto \left(\frac{d_{\text{eff}}}{\rho}\right)^2. \tag{4}$$

那么从表1中可以看出，对于Ⅰ类临界相位匹配LBO和BIBO倍频晶体，LBO晶体的走离角和有效非线性系数较小，而BIBO晶体的有效非线性系数和走离角都比较大，最终导致这两种晶体的$(d_{\text{eff}}/\rho)^2$值相当。但

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

是LBO晶体的角度接收带宽和光谱接收带宽都比较宽，而BIBO晶体的相位匹配波长随角度的变化比较灵敏，要想达到好的倍频效果，需要比较苛刻的条件，显然采用LBO作为倍频晶体更有利于激光器的商品化。而且，当倍频晶体处的腰斑半径取值为 $\omega_1 = 50$ μm时，代入(2)式中得到LBO和BIBO晶体的最大作用长度分别为7.34 mm和2.04 mm，相对于比较薄的BIBO晶体，LBO更容易加工和装载。因此，选取长度为7.3 mm的LBO作为内腔倍频晶体。

表1 LBO和BIBO晶体特性

Table 1 Parameters of LBO and BIBO crystals

	LBO	BIBO
Matching type	CPM Ⅰ	CPM Ⅰ
Phase-matched angle (θ,φ)	(90°, 21.2°)	(160.1°, 90°)
d_{eff} /(10^{-12} pm/V)	0.805	3.41
Walk-off angle ρ /mrad	12.21	43.92
$\Delta\theta L$ /(mrad·cm)	2.29	0.54
$\Delta\lambda L$ /(nm·cm)	0.63	0.13

3　实验装置与结果分析

实验装置图如图4所示，抽运源是最大输出功率为14 W的全固态高功率单模单频绿光激光器，中心波长532 nm，整形聚焦系统由焦距分别为200 mm和100 mm的平凸透镜镜f_1和f_2组成；调整整形聚焦透镜f_1和f_2之间的间隔，将绿光聚焦到钛宝石晶体上，腰斑半径大约为22 μm。M_1、M_2为45° 532 nm导光镜，谐振腔前面插入532 nm $\lambda/2$波片，旋转$\lambda/2$波片的角度，用来调整抽运光的偏振方向；钛宝石晶体的尺寸为Φ4 mm×20 mm，用铟箔包裹放置在导热性好的紫铜夹具中，采用冷却循环水将其工作温度控制在16.5 ℃，晶体对532 nm抽运光的吸收系数为1.05 cm^{-1}，FOM值为275，钛宝石晶体的c轴垂直于晶体中的通光方向，旋转谐振腔前面的532 nm λ/2波片，实现抽运光以π偏振方式抽运钛宝石晶体，从而实现了腔内基频光以π偏振方式起振。为了减小整个调谐范围内的功率损耗，钛宝石晶体的两端面均为布儒斯特角度(60.4°)切割。激光谐振腔采用六镜环形腔结构，总腔长大约为718 mm，在谐振腔内产生两个腰斑位置分别放置激光晶体与倍频晶体，M_3为绿光输入耦合镜，是曲率半径75 mm的平凹透镜，凹面镀532 nm高透(HT)膜，透射率T>95%和922 nm高反(HR)，反射率R>99.9%，平面镀532 nm减反(AR)；M_4为曲率半径为75 mm的平凹镜，凹面镀922 nm HR膜，R>99.9%，它们到钛宝石晶体端面的距离均为l_1，实验中取l_1=37.4 mm；根据文献[17-18]，设计最佳像散补偿角θ_0为17.5°，M_5、M_8为两个平面镜，镀922 nm HR膜，R>99.9%，分别粘在两个压电陶瓷上用于锁定激光器频率和精细调节激光器谐振腔长；M_6、M_7为两个曲率半径为75 mm的平凹镜，其间隔为l_3，为了减小离轴放置的M_6、M_7凹面镜带来的像散，其折叠角θ_1尽量小，约3.5°；而且为了提高倍频光输出功率采用了腔内双通倍频的方式，折叠镜M_7凹面镀922 nm和461 nm双高反膜，R>99.9%，M_6作为输出镜，凹面镀922 nm HR膜R>99.9%，461 nm HT膜T>95%，平面镀461 nm AR，使得基频光往返两次通过晶体，和倍频光一起耦合输出，输出功率与转换效率将大大提高。选择M_6和M_7两个凹面镜间的距离为82.5 mm时，得到在钛宝石中心弧失面和子午面的腰斑半径大约28.56 μm×31.43 μm，倍频晶体中心弧氏面和子午面的腰斑半径大约50.81 μm×50.32 μm。在谐振腔内加入TGG(Φ4×8 mm)和宽带$\lambda/2$波片组成的光学单向器，以消除空间烧孔效应，实现基频光的单频运转，TGG双面镀922 nm减反膜，$\lambda/2$波片双面镀600~1000 nm的宽带减反膜；加入三片厚度分别为1、2、4 mm的组合双折射滤波片作为调谐元件，粗调谐激光器输出波长至922 nm附近并有效压窄激光器线宽(4164 GHz)；在此基础上，在谐振腔内加入控温的标准具片，一片厚度为0.25 mm的不镀膜熔融石英标准具片，旋转标准具片的角度以及工作温度精细调谐激光器基频光波长至921.72 nm处，在单向行波运转及双折射滤波片组压窄线宽的基础上进一步选模并压窄基频光的线宽(370 GHz)；在M_6与M_7之间的腰斑处插入Ⅰ类临界相位匹配的LBO晶体，尺寸为3 mm×3 mm×7.3 mm，两个端面都镀有922 nm和461 nm双色减反膜，相位匹配角度θ=90° ϕ=21.2°，将其用铟箔包裹放置在紫铜夹具中，采用半导体致冷器(TEC)制冷块结合高精度温控仪控制其温度，晶体的工作温度设定在30.85 ℃时，得到了最大输出功率为1.02 W的单频460.86 nm蓝

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

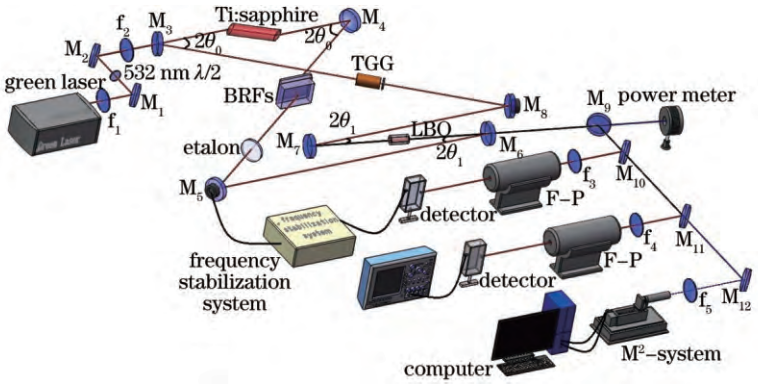

图4 实验装置图

Fig.4 Experimental setup

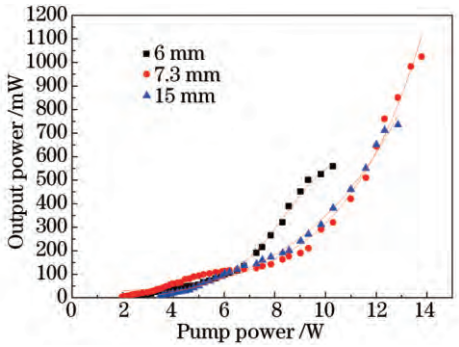

图5 采用不同长度LBO时蓝光钛宝石激光器输出功率随抽运功率的变化曲线

Fig.5 Variation of output power with pump power in different lengths of LBO

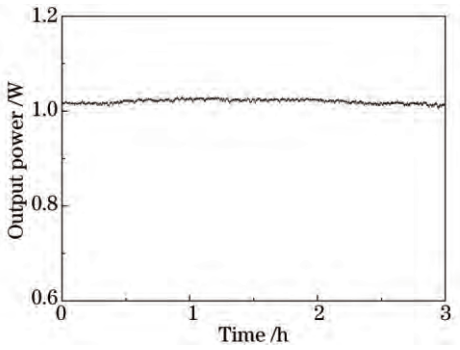

图6 单频蓝光激光器的长期功率稳定性曲线(3 h)

Fig.6 Long term power stability of single-frequency blue laser in 3 h

光输出。对于不同长度的LBO晶体，蓝光输出功率随着绿光抽运功率的变化曲线如图5所示，可以看出当晶体的长度为6 mm时，倍频光最大输出功率比较低，只有559 mW，继续增加抽运功率倍频蓝光输出功率不再增加；当晶体长度为15 mm时，由于走离效应比较明显，光束质量最差，在抽运功率为12.8 W时，倍频蓝光输出最大功率为735 mW；当晶体长度为最佳相互作用长度7.3 mm时激光器的抽运阈值最小，大约为1.97 W，与理论计算基本吻合，在抽运功率为14 W时，蓝光输出最大为1.02 W，绿光-蓝光的光光转化效率为7.3%，没有出现明显的饱和现象，继续增加抽运功率，有可能得到更高功率的蓝光输出。在14 W的抽运条件下，测量了激光器的长期功率稳定性，3 h内优于±1.3%，如图6所示；扫描自由光谱区为750 MHz的F-P干涉仪，得到基频光的单纵模运转曲线如图7所示；倍频光输出光斑得到了很大程度的改善，其M^2因子分别为$M_x^2=1.59$，$M_y^2=1.20$，测试结果如图8所示；旋转双折射滤波片组合，得到了蓝光激光器的输出功率随着输出波长的变化曲线图，如图9所示，由于倍频晶体LBO的光谱接收带宽比较宽，激光器输出蓝光的调谐范围也

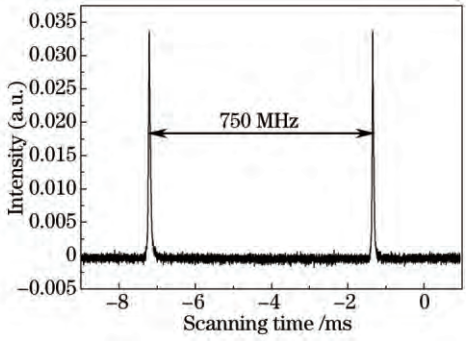

图7 激光器的频率特性

Fig.7 Frequency property of laser

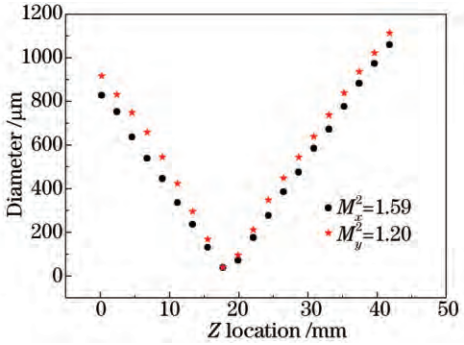

图8 蓝光M^2光束质量因子

Fig.8 Measured M^2 values for blue laser

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

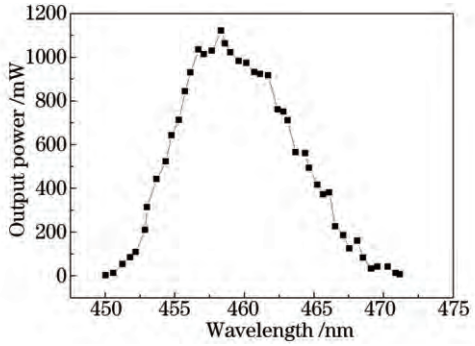

图9 蓝光输出功率随波长的变化曲线

Fig.9 Output power of blue laser varies with wavelength

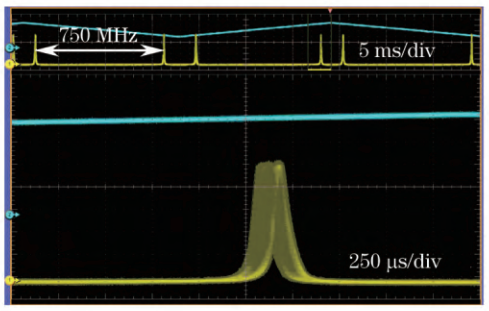

图10 锁定15 min内基频光频率漂移

Fig.10 Frequency drift within 15 min in locking operation

比较宽，为20 nm。为了提高钛宝石激光器的整机稳定性，选定一个稳定F-P干涉仪(自由光谱区750 MHz)的中心频率为参考频率，谐振腔外加入锁相环路和比例积分(PI)电路组成的稳频系统，当外界影响使得激光器基频光的中心频率偏离该参考频率时，鉴频器发出误差信号，然后负反馈电路控制系统通过粘在谐振腔镜M_5上的压电陶瓷来自动调节激光谐振腔长，使得激光频率自动回到F-P干涉仪的中心频率上，最终达到稳频的目的，锁定后得到基频光的频率漂移15 min内优于±4.2 MHz，如图10所示。

4　结　论

报道了一种全固态内腔倍频式钛宝石单频蓝光激光器，采用I类临界相位匹配的LBO晶体作为倍频晶体，在14 W的绿光抽运功率下，得到了输出功率为1.02 W、中心波长为460.86 nm的单频蓝光输出，光-光转换效率达到7.3%，3 h内功率波动小于±1.3%，并且光束质量得到了很大程度的改善，光束质量因子M^2分别为$M_x^2=1.59$, $M_y^2=1.20$，旋转双折射滤波片组合得到激光器输出蓝光的调谐范围为20 nm，将激光器锁定后，基频光频率漂移15 min内优于±4.2 MHz。

参 考 文 献

1 P F Moulton. Spectroscopic and laser characteristics of Ti∶Al_2O_3[J]. J Opt Soc Am B, 1986, 3(1): 125-133.

2 M Pizzocaro, D Calonico, P C Pastor, *et al*.. Efficient frequency doubling at 399 nm[J]. Appl Opt, 2014, 53(16): 3388-3392.

3 F Torabi-Goudarizi, E Riis. Efficient cw high-power frequency doubling in periodically poled KTP[J]. Opt Commun, 2003, 227(4): 389-403.

4 Tian Xiao. Realization of First-Stage Cooling of Strontium for the Optical Clock[D]. Xi′an: National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, 2010.

田　晓. 锶光晶格钟一级冷却的实现[D]. 西安: 中国科学院国家授时中心 2010.

5 Chang Hong, Zhang Shougang, Wang Xinliang, *et al*.. The development of atomic clock for time keeping and the strontium optical clock in national time service center[J]. Scientia Sinica Phy, Mech & Astron, 2010, 40(5): 616-622.

常　宏, 张首钢, 王心亮, 等. 基准原子钟的发展及国家授时中心光学原子钟的研制进展[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2010, 40(5): 616-622.

6 A D Saenz. 461 nm Laser for Studies in Ultracold Neutral Strontium[D]. Houston: Rice University, 2005.

7 Peng Yu, Zhao Yang, Li Ye, *et al*.. Three methods to lock the second harmonic generation for 461nm[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(2): 345-350.

彭　瑜, 赵　阳, 李　烨, 等. 3种方法实现461 nm外腔倍频激光器的锁定[J]. 中国激光, 2010, 37(2): 345-350.

8 Li Zhixiu, Yang Wenhai, Wang Yajun, *et al*.. The optimal design of single-frequency laser system for 795nm squeezed light source[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0902002.

李志秀, 杨文海, 王雅君, 等. 用于795 nm压缩光源的单频激光系统的优化设计[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0902002.

9 Li Hong, Feng Jinxia, Wan Zhenju, *et al*.. Low noise continuous-wave single frequency 780 nm laser high-efficiently generated by extra-cavity-enhanced frequency doubling[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0502003.

李　宏, 冯晋霞, 万振菊, 等. 高效率外腔倍频产生低噪声连续单频780 nm激光[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0502003.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

10 Zheng Yaohui, Wang Yajun, Peng Kunchi. A high-power single-frequency 540 nm laser obtained by intracavity frequency doubling of an Nd∶YAP laser[J]. Chin Phys Lett, 2012, 29(4): 044208.

11 Wang Yajun, Yang Wenhai, Zheng Yaohui, *et al*.. Influence of pump wavelength and Nd^{3+} doubling single-frequency lasers[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0602005.

王雅君, 杨文海, 郑耀辉, 等. 抽运波长及Nd^{3+}掺杂浓度对内腔倍频单频激光器性能的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602005.

12 Chang Dongxia, Liu Xia, Wang Yu, *et al*.. All-solid-state CW intracavity frequency-doubled and frequency-stabilized Nd:YVO_4/LBO red laser[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(3): 323-327.

常冬霞, 刘　侠, 王　宇, 等. 连续波Nd∶YVO_4/LBO稳频倍频红光全固态激光器[J]. 中国激光, 2008, 35(3): 323-327.

13 Li Fengqin, Shi Zhu, Li Yongmin, *et al*.. Tunable single-frequency intracavity frequency-doubled Ti:sapphire laser aroud 461 nm[J]. Chin Opt Lett, 2011, 28(12): 124205.

14 W Koechner. Solid-State Laser Engineering[M]. Beijing: World Publishing Corporation, 2013.

克希耐尔. 固体激光工程[M]. 北京: 世界图书出版公司, 2013.

15 J Harrison, A Finch, D M Rines, *et al*.. Low-threshold, cw, all-solid-state Ti∶Al_2O_3 laser[J]. Opt Lett, 1991, 16(8): 581-583.

16 J J Zondy, M Abed, S Khodja. Twin-crystal walk-off-compensated type-II second-harmonic generation: single-pass and cavity-enhanced experiments in $KTiOPO_4$[J]. J Opt Soc Am B, 1994, 11(12): 2368-2370.

17 Sun Yan, Lu Huadong, Su Jing. Continuous-wave single-frequency all-solid-state Ti:Al_2O_3 laser[J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2008, 14(3): 344-347.

孙　燕, 卢华东, 苏　静. 全固态单频钛宝石激光器[J]. 量子光学学报, 2008, 14(3): 344-347.

18 Lu Huadong, Su Jing, Li Fengqin, *et al*.. Compact, stable, tunable Ti: sapphire laser[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(5): 1166-1171.

卢华东, 苏　静, 李凤琴, 等. 紧凑稳定的可调谐钛宝石激光器[J]. 中国激光, 2010, 37(5): 1166-1171.

栏目编辑：宋梅梅

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net