量子光学学报 28(2):180–186, 2022
Journal of Quantum Optics

DOI:10.3788/JQO20222802.0901

全固态连续单频 455 nm 蓝光钛宝石激光器

秦玮霞[1]， 李凤琴[1,2†]

（1. 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；

2. 山西大学， 极端光学协同创新中心 山西 太原 030006）

摘要：全固态连续单频 455 nm 蓝色激光与铯原子高能态跃迁吸收线 $6^2S_{1/2} \leftrightarrow 7^2P_{3/2}$ 相匹配，是发展远距离水下量子通讯的重要光源。且 455 nm 激光还对应于钡离子 $^{138}Ba^{2+}$ 的跃迁能级 $6S_{1/2} \leftrightarrow 6P_{3/2}$，应用于量子计算领域，有利于减小量子计算及精密测量的系统误差。本文设计了内腔倍频式全固态高功率连续单频 455 nm 蓝光钛宝石激光器，优化了激光器谐振腔结构与激光振荡阈值，采用准相位匹配的 MgO:PPSLT 晶体作为内腔倍频器，当绿光泵浦功率为 11.5 W 时，获得了最高输出功率为 427 mW 的单频 455 nm 蓝色激光，光光转换效率为 3.7%，蓝光光束质量 M^2 因子优于 1.18。

关键词：水下量子通讯； 455 nm 蓝光钛宝石激光器； 单频

中图分类号：TN248 **文献标识码**：A **文章编号**：1007-6654(2022)02-0180-07

0 引言

455 nm 蓝色激光处于海水的蓝绿色光学透明窗口（400 nm∼500 nm），海水对于该波段的光子吸收很少、传输损耗较低，且 455 nm 激光与铯原子高激发态跃迁吸收线 $6^2S_{1/2} \leftrightarrow 7^2P_{3/2}$ 相匹配，有利于建设以铯原子系综为基础的水下量子存储节点[1–2]，是实现远距离水下量子通信的重要光源。另外，455 nm 激光还对应于 $^{138}Ba^{2+}$ 的跃迁能级 $6S_{1/2} \leftrightarrow 6P_{3/2}$，可与 640 nm 激光共同作用捕获到与多普勒冷却循环无关的 $5D_{5/2}$ 亚稳态 $^{138}Ba^{2+}$，应用于量子计算领域，有利于减小量子计算和精密测量中的系统误差[3]。因此，研究开发全固态连续单频 455 nm 蓝光激光器对于发展水下量子通信、海洋激光雷达以及量子计算等科学研究均具有重要意义。

1994 年，M.P. Le Flohic 等人[4] 报道了室温下连续上转换 455 nm Tm^{3+} 光纤激光器，但其输出功率只有 3 mW。2001 年，Schmidt 等人[5] 采用 I 类临界相位匹配的 LBO（三硼酸锂，LiB_3O_5）晶体内腔倍频全固态 Nd : $LiLuF_4$ 激光器的方案，获得了最高输出功率为 40 mW 的 455 nm 蓝光输出。近年来，随着半导体激光器与功率放大器的发展，市场上涌现了输出功率达到 300 mW、中心波长为 455 nm 的蓝光半导体激光器[6]，但该类激光器的激光线宽较宽（MHz 量级），不利于降低科学实验中的传输损耗。相比之下，钛宝石（Ti:Sapphire，Ti:S）晶体具有较宽的荧光光谱范围，覆盖了 700 nm∼1000 nm 的近红外区域，在 911 nm 波长处受激发射截面高达 1.9×10^{-19} cm^2，与非线性倍频技术相结合更有利于获得高功率、窄线宽、低噪声以及高光束质量

收稿日期：2022-02-10； **接受日期**：2022-03-21

基金项目：国家自然科学基金面上项目（61975100）

作者简介：秦玮霞（1994–），女，山西长治人，硕士研究生，主要从事光量子器件方面的研究

† **通信作者**：李凤琴，E-mail：lfq@sxu.edu.cn

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

的 455 nm 激光输出。2009 年，Rong 等人[7] 采用外腔倍频钛宝石激光器实现了窄线宽 455 nm 脉冲激光，但该实验锁定系统较复杂。因此，为了获得结构简单、紧凑稳定的高功率 455 nm 激光光源，我们小组于 2016 年设计了内腔倍频式钛宝石激光器，采用有效非线性系数较高的I类临界相位匹配 BIBO（硼酸铋，BiB_3O_6）晶体作为倍频晶体，获得了输出功率为 421 mW 的连续单频可调谐 455 nm 蓝光输出[8]。2019 年，我们组继续采用I类临界相位匹配、走离角较小的 LBO 晶体作为倍频晶体，获得了输出功率大于 1 W 的 455 nm 蓝光输出，这是目前为止国内外报道的最高输出功率[9]。然而，由于 BIBO 和 LBO 晶体均存在走离效应，导致输出蓝光的光束质量并不理想，均成椭圆高斯分布（以 BIBO 作为倍频晶体输出的蓝光光束质量因子为:$M_x^2=1.23$、$M_y^2=1.92$；以 LBO 作为倍频晶体输出的蓝光光束质量因子为：$M_x^2=1.58$、$M_y^2=1.18$）。

为了进一步优化 455 nm 蓝色激光的光束质量，本文采用准相位匹配的 MgO:PPSLT 晶体作为内腔倍频晶体，优化了激光器谐振腔结构以有效降低激光振荡阈值，当单频绿光激光器的泵浦功率为 11.5 W 时，获得了最高输出功率为 427 mW 的 455 nm 单频蓝光输出，光光转换效率为 3.7%，蓝光光束质量得到了明显的改善，M^2 因子优于 1.18。

1　设计原理

1.1　谐振腔结构与激光阈值优化

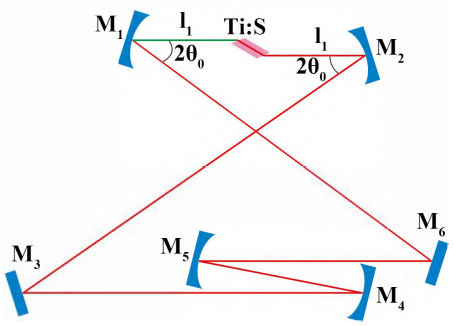


Fig. 1 Configuration of the laser resonator

图 1 激光器谐振腔结构

为了实现在两个较小高斯光束腰斑位置分别放置钛宝石晶体与倍频晶体，我们选用如图 1 所示的嵌入式六镜环形谐振腔结构。其中两对平凹镜（M_1、M_2）和（M_4、M_5）的曲率半径分别相等，在两对平凹镜的中间位置各产生两个较小腰斑，两个平面镜 M_3 和 M_6 为导光镜。输入耦合镜 M_1 镀有 532 nm 高透膜（$T>95\%$）和 911 nm 高反膜（$R>99.9\%$），腔镜 M_2、M_3、M_5、M_6 镀有 911 nm 高反膜（$R>99.9\%$），M_4–M_5 所在腔臂为嵌入臂，输出耦合镜 M_4 镀有 911 nm 高反膜（$R>99.9\%$）和 455 nm 高透膜（$T>95\%$）。增益介质钛宝石晶体双端面以布儒斯特角（60.4°）切割，尺寸为 ϕ4 mm × 20 mm，放置在 M_1 和 M_2 之间的腰斑位置，在 532 nm 波长处的吸收系数为 1.13 cm^{-1}，用铟箔包裹使其紧密接触导热性好的紫铜炉，利用冷却循环水控制其工作温度为 16.5°C。为了补偿谐振腔中布氏角入射的光学元件带来的像散，平凹镜 M_1、M_2 处折叠角为 17.5°，M_4、M_5 处的折叠角尽可能小到 3.5°[10]。

由于钛宝石晶体在 911 nm 波长处的增益仅为 795 nm 处的 51%，使得 911 nm 处激光阈值泵浦功率提高，从而限制 455 nm 倍频激光的输出功率，为此必须优化谐振腔的腔型结构。对于端面泵浦激光系统而言，阈值泵浦功率由下式给出[11]

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

式中 η_t 是泵浦光的传输效率，h_{ν_p} 是泵浦光子能量，σ 是受激发射截面，τ 是激光上能级寿命。k 是泵浦光腰斑 ω_p 与振荡光腰斑 ω_0 的模式尺寸之比，α 是晶体对泵浦光的吸收系数，l 是晶体长度，L_{cav} 和 L_{xtl} 分别是腔内损耗和晶体中残留的 Ti^{4+} 引起的红外吸收损耗，晶体中寄生吸收引起的损耗由下式给出：

$$L_{\mathrm{xtl}}=1-\exp\frac{-\alpha l_{\mathrm{eff}}}{FOM},\tag{2}$$

式中，l_{eff} 为晶体的有效作用长度，FOM 代表晶体的品质因子。具体参数如下：$\nu_p=c/\lambda_p$，$\lambda_p=532$ nm，$\eta_t=95\%$，$\sigma_{795}=3.8\times10^{-19}$ cm^2，$\sigma_{911}=3.8\times10^{-19}$ cm^2，$L_{\mathrm{cav}}=6\%$，$k=0.83$，$FOM=200$。将式 (2) 代入式 (1)，得到振荡激光波长分别为 795 nm 和 911 nm 时阈值泵浦功率随谐振腔内钛宝石晶体处高斯光束腰斑半径 ω_0 的变化曲线，如图 2。

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

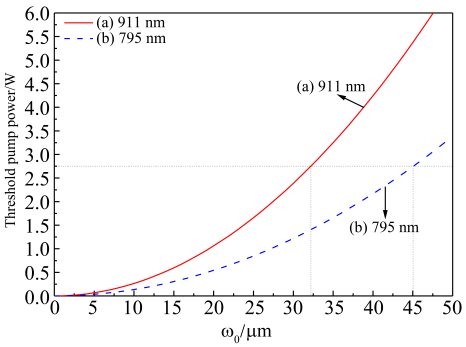
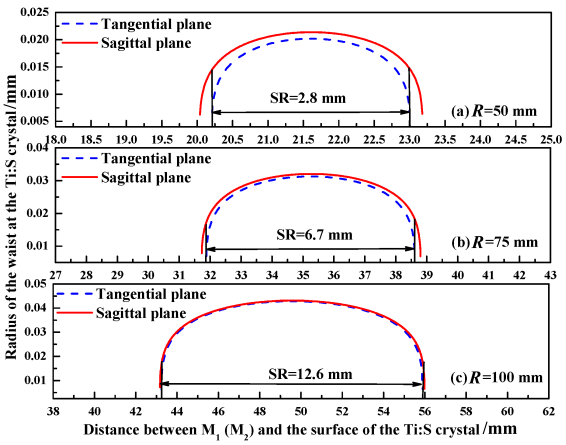


Fig. 2 Dependence of the threshold pump power on the radius of the Gaussian waist at the Ti:S crystal (ω_0)

图 2 激光器阈值泵浦功率随谐振腔内钛宝石晶体处高斯光束腰斑半径 ω_0 的变化

由图可知，911 nm 振荡波长处的阈值泵浦功率明显高于峰值振荡波长 795 nm。因此，为了有效降低 911 nm 处激光阈值泵浦功率，应缩小谐振腔内钛宝石晶体处高斯光束束腰半径。当 M_1 和 M_2 之外的路径 $M_2 \rightarrow M_3 \rightarrow M_4 \rightarrow M_5 \rightarrow M_6 \rightarrow M_1$ 约取 689 mm，平凹镜 M_4 和 M_5 的曲率半径均为 50 mm 时，通过 ABCD 传输矩阵，数值计算得到了三个不同曲率半径的 M_1（M_2）对应的钛宝石晶体处基横模振荡光的束腰大小和稳区范围，如图 3 所示。在稳区范围的中心处，当 M_1 和 M_2 的曲率半径从 100 mm 变为 75 mm 和 50 mm 时，钛宝石晶体的束腰半径从 43.0 μm 减小至 31.7 μm 和 20.8 μm。将这些值代入式 (1)，相应的阈值泵浦功率从 5.0 W 减小到 2.7 W 和 1.17 W。然而，随着 M_1（M_2）曲率半径的缩小，稳区范围也相应地缩小（当 R 取 100 mm、75 mm 和 50 mm 时，稳区范围分别为 12.6 mm，6.7 mm 和 2 mm），激光系统的稳定性随之降低。考虑到阈值泵浦功率和稳区范围，M_1 和 M_2 的曲率半径均选用 75 mm，且 M_1（M_2）距离钛宝石晶体端面均为 35.2 mm。



(a) R = 50 mm, (b) R = 75 mm, (c) R = 100 mm

Fig. 3 Radius of the waist at the Ti:S crystal and the stability range (SR) for M_1 (M_2) with different curvature radius

图 3 不同曲率半径的 M_1（M_2）对应的钛宝石晶体处基横模振荡光的束腰大小和稳区范围（SR）

1.2 倍频晶体

常用于蓝光领域的非线性倍频晶体有 BBO（β 相偏硼酸钡，$\beta-BaB_2O_4$）、BIBO、LBO、PPSLT（周期极化铌酸锂，Periodically Poled Stoichiometric $LiTaO_3$）、PPKTP（周期极化钛氧磷酸氧，Periodically Poled Stoichiometric $KTiOPO_4$）和 PPLN（周期极化铌酸锂，Periodically Poled Stoichiometric $LiNbO_3$）等，如表1所示。其中，I 类临界相位匹配

表 1 常用倍频晶体

Tab. 1 Frequency doubling crystals

倍频晶体	BBO	BIBO	LBO	PPKTP	PPLN	PPSLT
相位匹配类型	I 类临界相位匹配	I 类临界相位匹配	I 类临界相位匹配	准相位匹配	准相位匹配	准相位匹配
有效非线性系数（10^{12}pm/V）	2.08	3.3	0.81	7.7	17	2.85
走离角/mrad	55	40.7	11.3	—	—	—
接收角/mrad·cm	0.35	2.32	52	—	—	—
透光范围/nm	189～3 500	286～2 500	160～2 600	350～4 500	400～4 500	300～5 000

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

的 BBO 和 BIBO 晶体虽然具有较大的有效非线性系数，但他们的走离角度较大，导致倍频过程中存在严重的走离效应，倍频激光输出光束质量较差；LBO 晶体虽然走离角度较小，但仍受走离效应的影响，倍频输出光为椭圆高斯光束；PPKTP、PPLN、PPSLT 晶体均为准相位匹配的周期性极化晶体，有利于避免倍频过程中的走离效应，可以有效改善倍频光输出光束质量，但 PPKTP 晶体的透光范围截止波长接近 455 nm，在倍频过程中蓝光导致红外吸收现象非常明显，容易引起光折变损伤效应，且产生的热透镜效应比较严重，将影响倍频效率的提高，不利于提高激光功率的稳定特性[12]；PPLN 晶体在 911 nm 处实现准相位匹配需要工作温度高达 150°C[13]，为了实现精确的相位匹配，对于高温温控系统的要求较高；而 PPSLT 晶体在室温下即可实现非临界相位匹配，且倍频过程中蓝光导致红外吸收效应较弱，有利于在 455 nm 处获得较高光束质量的倍频激光输出[14]。因此，本实验中我们选用准相位匹配的 MgO:PPSLT 晶体作为内腔倍频晶体。

2　实验装置与结果分析

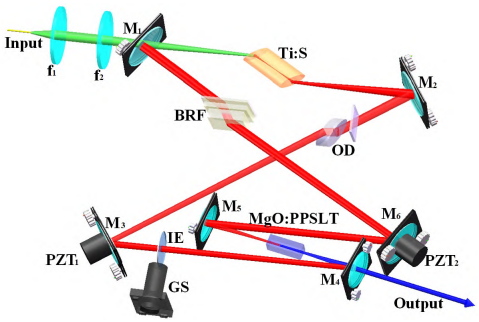


Fig. 4 Experimental setup of All-solid-state continuous wave single-frequency 455 nm Ti:S laser

图 4 全固态连续单频 455 nm 钛宝石激光器实验装置图

全固态连续单频 455 nm 蓝光钛宝石激光器如图 4 所示，泵浦源是中心波长为 532 nm，最大输出功率为 14 W 的全固态连续单频绿光激光器[15]，泵浦光光束先由一个焦距为 150 mm 的透镜 f_1 准直，再通过另一个焦距为 85 mm 的透镜 f_2 聚焦到钛宝石晶体上以获得较好的模式匹配。光学谐振腔为由 M_1、M_2、M_3、M_4、M_5 和 M_6 组成的嵌入式六镜环形谐振腔结构，输入耦合镜 M_1 是曲率半径为 75 mm 的平凹镜，镀有 532 nm 高透膜（$T>95\%$）和 911 nm 高反膜（$R>99.9\%$）；平凹镜 M_2 的曲率半径为 75 mm，凹面镀有 911 nm 高反膜（$R>99.9\%$），M_1、M_2 距钛宝石晶体的端面距离均为 l_1，M_1、M_2 处折叠角取最佳像散补偿角 17.5°；M_3 和 M_6 为平面导光镜，均镀有 911 nm 高反膜（$R>99.9\%$），分别粘在压电陶瓷上用于锁定激光器频率和对激光谐振腔长精细调节；平凹镜 M_4、M_5 的曲率半径均为 50 mm，M_5 上镀有 911 nm 高反膜（$R>99.9\%$），输出耦合镜 M_4 上镀有 911 nm 高反膜（$R>99.9\%$）和 455 nm 高透膜（$T>95\%$）。该嵌入臂长为 l_3，为了尽可能减小嵌入光学臂引入的像散，此折叠角约 3.5°。布儒斯特角（60.4°）切割的钛宝石晶体尺寸为 ϕ4 mm × 20 mm，放置在 M_1 和 M_2 之间的腰斑位置，在 532 nm 波长处的吸收系数为 1.13 cm^{-1}，品质因子 FOM 值为 200，用铟箔包裹使其紧密接触导热性好的紫铜炉，采用冷却循环水控制其工作温度为 16.5°C。使钛宝石晶体的光轴方向垂直于通光方向，旋转谐振腔前的 532 nm $\lambda/2$ 波片，保证泵浦光以 π 偏振方式抽运钛宝石晶体，从而使基频光 π 方向的偏振光起振。谐振腔总腔长约 781 mm，当取 M_1（M_2）距离钛宝石晶体端面 $l_1=35.2$ mm，M_4、M_5 之间的距离 $l_3=51$ mm 时，钛宝石中心基频光高斯光束半径大小约为 31.7 μm，平凹镜 M_4 和 M_5 之间中心处基频光高斯光束半径约为 23 μm。为了实现激光器稳定单向运转，在光学谐振腔内插入由两端以布儒斯特角切割的磁致旋光晶体 TGG（ϕ4 mm × 3.5 mm）和厚度为 0.334 mm 的石英旋光片组成的光学单向器。实验中选用三片厚度分别为 1 mm、2 mm 和 4 mm 的双折射滤波片组成的双折射滤波片组合以布儒斯特角插入谐振腔内实现激光波长的初步调谐。采用厚度为 0.5 mm、直径为 10 mm，在 911 nm 处镀有 20% 反射率的熔融石英标准具实现频率的精细调谐并压窄激光线宽。实验中，首先旋转双折射滤波片组[16] 将激光器输出波长粗调谐到 911 nm 附近，然后改变谐振腔内标准具的工作角度以及通过压电陶瓷 PZT_1 和 PZT_2 改变谐振腔的光学长度实现激光波长的精细调谐。当采用几何尺寸为 1 mm × 2 mm × 10 mm 的 MgO:PPSLT 作为倍频晶体、最大注入泵浦功率达到 11.5 W 时，455 nm 激光的最大输出功率为 427 mW，绿光 - 蓝光转换效率为 3.7%，蓝光输出功率随着泵浦功率的指数型变化曲

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

线如图 5 所示，从图中可以看出，激光泵浦阈值功率为 3.7 W，略高于谐振腔理论设计中得到的泵浦光阈值功率，我们分析认为这是由于内腔倍频过程中产生的附加损耗以及倍频晶体对于激光的吸收作用等因素导致的，当泵浦功率大于 10 W 时，倍频光输出功率随着泵浦功率的增加出现了轻微饱和现象，且 455 nm 蓝光 5 h 内长期功率稳定特性测量结果如图 6 所示，从图中可以看出，蓝光输出功率随着工作时间的积累呈缓慢下降趋势，进一步说明准相位匹配 PPSLT 晶体对于基频光与倍频光具有轻微的吸收作用，如果继续优化谐振腔结构，将获得更高的输出功率及长期功率稳定特性（图 6 中功率最大值为 338 mW，最小值为 232 mW, 功率起伏值为 ±18.5%）。采用光束质量分析仪（M2DU，DataRay Inc.）对激光器输出光束质量进行测量，测量结果如图 7 所示，焦散曲线对应的蓝光光束质量因子分别为 $M_x^2 = 1.07 \pm 0.11$ 和 $M_y^2 = 1.18 \pm 0.12$，显然采用准相位匹配的 MgO:PPSLT 作为倍频晶体更有利于实现高光束质量的蓝光输出。实验中采用自由光谱范围为 750 MHz，精细度为 120 的 F-P 干涉仪对输出激光的纵模结构进行监测，如图 8 所示，从图中可以看出该激光器实现了稳定的单纵模运转。

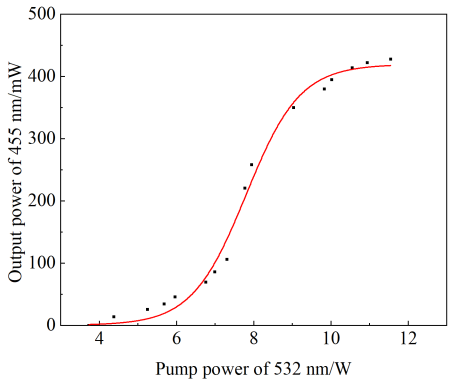


Fig. 5 Output power of 455 nm blue laser versus the incident pump power

图 5 455 nm 蓝光激光器输入 -输出特性曲线

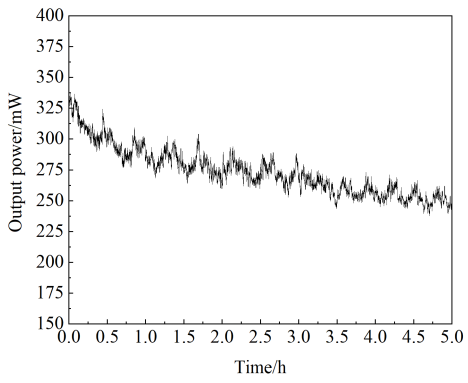


Fig. 6 Long term power stability of the 455 nm blue laser

图 6 455 nm 蓝光长期功率稳定性

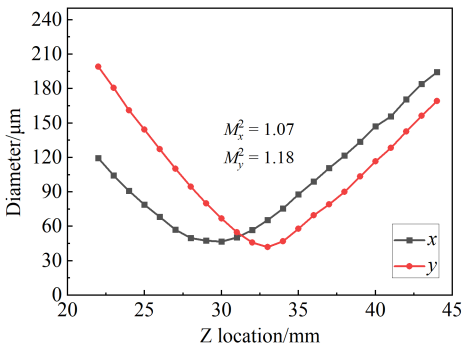


Fig. 7 The measured beam quality of 455 nm laser

图 7 455 nm 激光光束质量因子

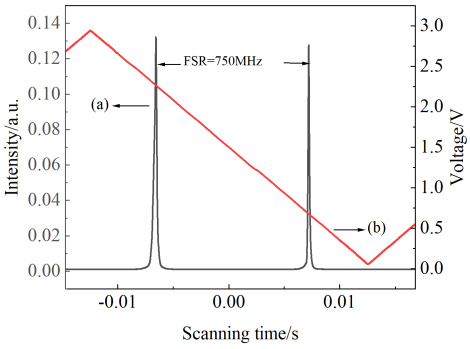


Fig. 8 The measured longitudinal mode structure

图 8 激光器纵模结构

3 结论

本文报道了一种内腔倍频式全固态高功率连续单频 455 nm 蓝光钛宝石激光器，该激光器采用准相位匹配的 MgO:PPSLT 晶体作为内腔倍频晶体，在 532 nm 绿光泵浦功率为 11.5 W 时，得到了中心波长为 455 nm、最大输出功率为 427 mW 的蓝色激光，绿光 - 蓝光的光光转换效率为 3.7%，输出的蓝光光束质量因子分别为 $M_x^2 = 1.07 \pm 0.11$ 和 $M_y^2 = 1.18 \pm 0.12$。如果继续优化谐振腔结构，将获

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

得更高输出功率及激光长期功率稳定特性，为远距离水下量子通讯、量子光学、超导体材料、量子操控和量子计算等研究领域提供优质光源。

参考文献

[1] WALL K F. Blue light sources based on Ti:sapphire lasers[C]. Applications of Lasers for Sensing & Free Space Communications, 2011, paper LWA2:1–3. DOI: 10.1364/LSC.2011.LWA2.

[2] WANG Y F, ZHANG X G, WANG D Y, *et al*. Cs Faraday optical filter with a single transmission peak resonant with the atomic transition at 455 nm[J]. *Opt Express*, 2012, **20**(23): 25817–25825. DOI: 10.1364/OE.20.025817.

[3] AUCHTER C, NOEL T W, HOFFMAN M R, *et al*. Measurement of the branching fractions and life time of the $5D_{5/2}$ level of Ba^{+}[J]. *Physical Review A*, 2014, **90**(6): 060501. DOI: 10.1103/PhysRevA.90.060501.

[4] LE FLOHIC M P, ALLAIN J Y, STÉPHAN G M, *et al*. Room-temperature continuous-wave upconversion laser at 455 nm in a Tm^{3+} fluorozirconate fiber[J]. *Opt Lett*, 1994, **19**(23): 1982–11984. DOI: 10.1364/OL.19.001982.

[5] SCHMIDT M, HEUMANN E, CZERANOWSKY C, *et al*. Generation of 455nm radiation by intracavity doubling of a Nd:$LiLuF_4$ laser[C]. // Conf. Lasers Electro-Opt., OSA Tech. Dig., 2001, paper CThC1: 387–388. DOI: 10.1109/CLEO.2001.947951.

[6] DL pro | TOPTICA Photonics AG[DB/OL]. https://www.toptica.com/products/tunable-diode-lasers/ecdl-dfb-lasers/dl-pro/. [2022.02.01].

[7] RONG S K, ZHU X L, CHEN W B. All-solid-state narrow-linewidth 455-nm blue laser based on Ti:sapphire crystal[J]. *Chin Opt Lett*, 2009, **7**(1): 43-45. DOI: 10.3788/COL20090701.0043.

[8] LI F Q, LI H J, LU H D. Realization of a Tunable 455.5-nm Laser With Low Intensity Noise by Intracavity Frequency-Doubled Ti:sapphire laser[J]. *IEEE Journal of Quantum electronics*, 2016, **52**(2): 0018–9197. DOI: 10.1109/JQE.2015.2509243.

[9] LI F Q, ZHAO B,WEI J, *et al*. Continuously tunable single-frequency 455 nm blue laser for high-state excitation transition of cesium[J]. *Opt Lett*, 2019, **44**(15): 3785–3788. DOI: 10.1364/OL.44.003785.

[10] SUN Y, LU H D, SU J. Continuous-wave, single-frequency, all-solid-state Ti:Al_2O_3 laser[J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2008, **14**(3): 344–347. DOI: 1007-6654(2008)03-0344-04.

[11] HARRISON J, FINCH A, RINES D M, *et al*. Low-threshold, cw, all-solid-state Ti:Al_2O_3 laser[J]. *Opt Lett*, 1991, **16**(8): 581–583. DOI: 10.1364/OL.16.000581.

[12] LIAO Z M, PAYNE S A, DAWSON J, *et al*. Thermally induced dephasing in periodically poled KTP frequency-doubling crystals[J]. *Opt Soc Am*, 2004, **21**(12): 2191–2196. DOI: 10.1364/JOSAB.21.002191.

[13] 陈云琳, 袁建伟, 闫卫国, 等. 准相位匹配 PPLN 倍频理论研究与优化设计 [J]. 物理学报, 2005, **45**(5): 2079–2083. DOI: 10.3321/j.issn:1000-3290.2005.05.021.
Chen Y L, YUAN J W, WANG W G, *et al*. Quasi-phase-matched second-harmonic-generation in bulk periodically poled $LiNbO_3$ and optimal design[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **45**(5): 2079–2083. (in Chinese). DOI: 10.3321/j.issn:1000-3290.2005.05.021.

[14] 姚建铨, 徐德刚. 全固态激光及非线性光学频变技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2007, **24**(5): 1–10. DOI: 10.16507/j.issn.1006-6055.2002.05.001.
YAO J Q, XU D G. All solid-state laser and nonlinear optical frequency conversion technology[M]. Beijing: Science Press, 2007, **24**(5): 1–10. (in Chinese). DOI: 10.16507/j.issn.1006-6055.2002.05.001.

[15] LU H D, SU J, ZHENG Y H, *et al*. Physical conditions of single-longitudinal-mode operation for high-power all-solid-state lasers[J]. *Opt Lett*, 2014, **39**(5): 1117–1120. DOI: 10.1364/OL.39.001117.

[16] WEI J, CAO X C, JIN P X, *et al*. Diving angle optimization of BRF in a single-frequency continuous-wave wideband tunable titanium: sapphire laser[J]. *Opt Express*, 2021, **29**(5): 6714–6725. DOI: 10.1364/OE.419580.

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

All-solid-state Continuous Wave Single-Frequency 455 nm Blue Ti:Sapphire Laser

QIN Wei-xia[1], LI Feng-qin[1,2†]

(1. *State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan* 030006, *China;*
2. *Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan* 030006, *China*)

Abstract: Continuous-wave (CW) single-frequency coherent laser sources in the blue spectral region are useful for applications in biomedicine, metrology, display technology, atomic-trapping, quantum optics, and so on owing to their intrinsic merits of low-intensity noise, narrow linewidth as well as the good beam quality. The single-frequency 455 nm laser is in the band of blue-green ($400 \sim 500$ nm) optically transparent window of seawater, and seawater has very little photon absorption and low transmission loss. Moreover, the wavelength of 455 nm is just corresponding to the higher state excitation transition $6S_{1/2} \leftrightarrow 7P_{3/2}$ of Cs atoms, which can be used for the development of long-distance underwater quantum communication based on quantum storage nodes of the cesium atom system. It also corresponds to the transition $6S_{1/2} \leftrightarrow 6P_{3/2}$ of $^{138}Ba^{2+}$, which can be used in the field of quantum computing to reduce systematic errors. In this paper, the continuous wave single-frequency 455 nm laser generation from intracavity frequency-doubled Ti:S laser is presented. By optimizing the curvature radii of the resonator mirrors, the beam waist of the fundamental wave at the Ti:S crystal is focused, and the threshold pump power is effectively decreased. When a quasi-phase matched MgO: PPSLT crystal is used as the intracavity frequency doubler, the highest output power of 427 mW at 455 nm is attained under the pump power of 11.5 W with an optical conversion efficiency of 3.7%. The measured blue laser beam quality is better than 1.18.

Keywords: underwater quantum communication; 455 nm blue Ti:sapphire laser; single frequency

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