

引用格式: YANG Shunyu, ZHOU Jingfeng, LI Ben, et al. Wavelength-adjustable All-solid-state Yellow-green Laser with Low Noise (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(10):1014005

杨顺宇,周井锋,李奔,等. 波长可调的低噪声全固态黄绿光激光器(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(10):1014005

波长可调的低噪声全固态黄绿光激光器(特邀)

杨顺宇^{1,2,3}, 周井锋^{1,2,3}, 李奔^{1,2,3}, 白杨^{1,2,3}

(1 西北大学 光子学与光子技术研究所, 西安 710127)

(2 省部共建西部能源光子技术国家重点实验室, 西安 710127)

(3 陕西省全固态激光及应用工程技术研究中心, 西安 710127)

摘要:报道了一种 808 nm 激光二极管端面泵浦 Nd:YAG 激光晶体/腔内倍频的波长可调、低噪声全固态黄绿激光器。基于 L 型折叠谐振腔结构的优化设计,不但使谐振腔对热焦距具有动态热不灵敏性,而且补偿了折叠型结构和凹面反射镜引起的光束像散。基于布儒斯特片的布儒斯特角调节,实现对 Nd:YAG 晶体受激辐射产生的 1 112.62 nm、1 116.70 nm 和 1 123.24 nm 三条谱线的选频和单一波长基频光腔内振荡;调节单一波长基频光的 p 偏振方向与双折射单晶玻璃光轴之间的夹角,通过压缩纵模个数,实现对该波长基频光的滤波。在此基础上,通过 I 类角度相位匹配 LBO 晶体腔内倍频,分别获得了 556.31 nm、558.35 nm 和 561.62 nm 三个波长可调、高稳定性、低噪声的黄绿激光输出,对应最大连续输出功率分别达到了 678 mW、653 mW 和 606 mW,光光转换效率分别为 8.47%、8.16% 和 7.58%。在输出功率均为 500 mW 时,功率不稳定性分别为 $\pm 0.42\%$ 、 $\pm 0.38\%$ 和 $\pm 0.49\%$,对应激光噪声分别为 0.69%、0.51% 和 0.96%。

关键词:全固态;黄绿光激光器;波长可调;低噪声;布儒斯特片选频;双折射晶体滤波

中图分类号:TN249

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225110.1014005

0 引言

激光二极管(Laser Diode, LD)泵浦 Nd:YAG 晶体并结合非线性光学频率变化获得的 556~561 nm 全固态黄绿激光在工业、大气遥感、通信、信息存储、食品和药品检测等领域具有广泛的应用,故而成为国内外的研究热点^[1-3]。特别是在生物医疗领域,低噪声的 556~561 nm 全固态黄绿激光不但可以通过激发荧光素藻红蛋白(Phycoerythrin, PE)来提高 PE 家族以及其它荧光蛋白的检测灵敏度和分辨率,而且还是共聚焦显微镜流式细胞仪及其它生物成像的理想光源^[4,5]。

噪声是衡量激光器输出稳定性的关键指标^[6-8],由 Nd:YAG 晶体受激辐射产生的 1 112.62 nm、1 116.70 nm 和 1 123.24 nm 三条谱线之间,每一条谱线内不同纵模之间的模式竞争以及倍频光的三波耦合作用是造成倍频黄绿激光的功率稳定性受到噪声无规律干扰的主要原因之一^[5,9-11]。目前国内外主要采用选单纵模或滤波的方法减少各谱线之间以及同一谱线内多个纵模之间的竞争,从而降低全固态黄绿光激光器的噪声。然而,选单纵模的传统方法主要是利用 F-P 标准具或复合谐振腔消除纵模间的模式竞争^[2,10-12],往往以牺牲激光器输出功率和光光转换效率为代价。采用布儒斯特角放置的双折射晶体(Birefringent Crystal, BC)在直线型谐振腔内同时进行选频和滤波,则需要同步精确调节布儒斯特角以及其表面与基频光光轴之间的夹角^[5,11],对方便紧凑型激光器调节,获得高功率、低噪声的黄绿激光输出而言难度极大。

本文采用 808 nm LD 端面泵浦 Nd:YAG 晶体的 L 型折叠谐振腔结构,在谐振腔中插入由布儒斯特偏振

基金项目:陕西省教育厅服务地方专项计划(No. 19JC040),陕西省省重点研发计划(No. 2020GY-118)

第一作者:杨顺宇(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向为全固态激光器技术。Email: yangshunyu0717@stumail.nwu.edu.cn

导师(通讯作者):白杨(1977—),男,教授,博士,主要研究方向为大功率全固态激光器及应用技术。Email: by@nwu.edu.cn

收稿日期:2022-05-25;录用日期:2022-06-24

<http://www.photon.ac.cn>

器(Brewster Polarizer, BP)和BC共同组成的双折射滤波器(Birefringent Filter, BF)。在合理设计谐振腔结构的基础上,通过调节BP的布儒斯特角的大小、BC的通光面与基频光光轴之间的夹角,分别对1 112.62 nm、1 116.70 nm和1 123.24 nm三条谱线进行选频和滤波。通过I类角度相位匹配LBO晶体腔内倍频,分别在556.31 nm、558.35 nm和561.62 nm三个波长上获得了波长可调、连续输出功率均超过600 mW、高稳定性、低噪声的黄绿激光输出。

1 实验装置

全固态黄绿光激光器的谐振腔结构示意图及实物如图1。单独的一块半导体制冷片(Thermoelectric Coole, TEC)对LD模块实施25°C独立温度控制。最大泵浦功率8 W时,LD中心波长为808.7 nm(线宽为1.74 nm),与激光晶体Nd: YAG的808.7 nm吸收峰相匹配。Nd: YAG激光晶体的尺寸为2 mm×2 mm×6 mm, Nd³⁺掺杂浓度为0.6 at%。如表1所示^[13], 1 112.62 nm、1 116.70 nm和1 123.24 nm三条谱线的相对性能接近,但是受激发射截面均小于1 064 nm、1 319 nm和946 nm三条主要谱线的受激辐射截面。因此,首先通过在Nd: YAG晶体入射、出射端面的镀膜来抑制1 064 nm、1 319 nm和946 nm三条主要谱线的振荡。Nd: YAG激光晶体泵浦端面上镀制的增透膜对808 nm、1 064 nm和1 319 nm波长高透射($T>95\%$ @808 nm, $T>90\%$ @1 064 nm+1 319 nm, $T>50\%$ @946 nm)、对1 110~1 125 nm波段高反射($R>99.7\%$ @1 110~1 125 nm),出光端面上的增透膜对808 nm、946 nm、1 064~1 319 nm波段高透射($T>90\%$ @808 nm+1 064 nm+1 319 nm+946 nm, $T>99.2\%$ @1 110~1 125 nm)。两个对称放置的G2非球面平凸透镜将最大功率8 W的LD泵浦光扩束准直聚焦,并在Nd: YAG晶体的泵浦端面后侧形成焦距3.4 mm、焦斑半径为250 μm的聚焦光束。Nd: YAG激光晶体的泵浦端面、M₁镜和M₂镜之间共同构成谐振腔。M₁镜为黄绿激光的输出镜,其凹面镀制有对1 110~1 125 nm波段高反射($R>99.7\%$)和对554~563 nm波段高透射($T>95\%$)的增透膜,其平面镀制554~563 nm波段的增透膜($T>99.5\%$)。M₂镜为全反射镜,其凹面镀制的高反膜在1 110~1 125 nm波段内的反射率 $R>99.7\%$,对554~563 nm波段的反射率 $T>99.2\%$ 。倍频晶体为I类角度相位匹配的LBO晶体,相位匹配角切割为($\theta=90^\circ, \varphi=8.1^\circ$)@1 116.70 nm,两个通光面镀制的增透膜在

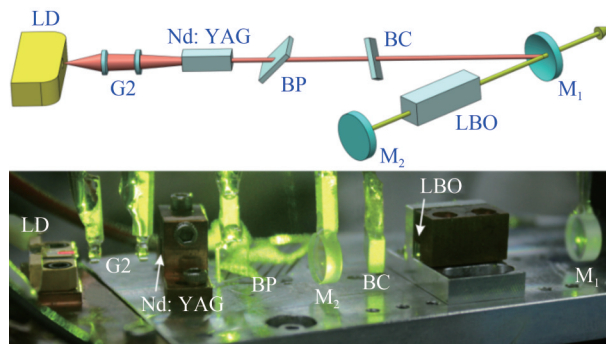


图1 实验装置

Fig.1 The experimental setup

表1 Nd: YAG晶体主要受激辐射荧光的性能

Table 1 Properties of the main stimulated emission fluorescence of the crystal Nd: YAG

λ/nm	Stimulated—emission cross section/ $(\times 10^{-20} \text{ cm}^2)$	Spectral line width $\Delta\nu/(\times 10^{12} \text{ Hz})$	Branch ratio of relative intensity of fluorescence radiation	Relative performance
946	5.1	3.72	0.040	46
1 064	45.8	5.30	0.135	100
1 112	3.8	1.73	0.025	49
1 116	2.9	1.51	0.034	46
1 123	3.0	1.83 ²	0.030	40
1 319	8.7	2.87	0.018	34

1 110~1 125 nm 波段内的透射率 $T > 99.5\%$, 在 554~563 nm 波段内的透射率 $T > 92\%$ 。微调 LBO 晶体的入射角, 当入射角分别满足 1 112.62 nm、1 116.70 nm 和 1 123.24 nm 三条谱线的 I 类角度相位匹配角时, 则可以分别产生 556.31 nm、558.35 nm 和 561.62 nm 三个波长的倍频黄绿激光。Nd: YAG 晶体和 LBO 晶体分别用铝箔包裹后固定在铜制冷却块中, 由另一块 TEC 实施 20°C 的精确温度控制。BP 材质为融石英玻璃, 尺寸为 6 mm(长)×6 mm(宽)×0.6 mm(厚)。BC 材质为石英晶体, 尺寸为 6 mm(长)×6 mm(宽)×2.6 mm(厚), BC 的光轴与其入射端面的斜上 45° 对角线平行。BP 和 BC 的通光面均未镀膜。除 LD 模块和 Nd: YAG 晶体外, 谐振腔中每一个光学元件均与一台三维弧摆台的 L 型摆杆连接, 由该三维弧摆台实施精确的三维距离调节和三维旋转角度调节。

众所周知, Nd: YAG 晶体内部因热积累而形成的热透镜焦距会随着 LD 泵浦功率的增加而减小。这一趋势会导致谐振腔稳定性下降, 甚至造成谐振腔失谐而无法形成基频光振荡^[14, 15]。此外, 腔内面为凹面的 M_1 镜被离轴放置, 这会造成腔内振荡的基频光产生像散, 导致基频光的弧矢光斑和子午光斑之间模式体积不匹配, 严重影响倍频光的转换效率和输出质量^[16]。因此, 为提高谐振腔对热焦距的动态热不灵敏性、倍频光的转换效率和输出质量, 合理设计谐振腔结构就显得格外重要。当 LD 泵浦功率从 1.0 W 升至 8.0 W 时, 实验利用热透镜焦距动态测试法^[16]测得 Nd: YAG 晶体的热透镜焦距从 900 mm 减小至 480 mm 左右。根据激光谐振腔的 ABCD 矩阵理论和已经确定的光学元件尺寸, 利用激光谐振腔设计软件(Laser Cavity Analysis and Design, LASCAD)对黄绿激光谐振腔的结构参数进行了优化设计。最终, 总腔长为 84.0 mm, M_1 镜、 M_2 镜的凹面曲率半径分别为 150 mm 和 250 mm, 折叠半角为 10.5°。Nd: YAG 晶体出光面、BP、BC、 M_1 、LBO 和 M_2 相邻光学元件的间距分别设定为 3.1 mm、13.5 mm、28.5 mm、12.1 mm 和 8.3 mm。

在优化后的谐振腔结构参数下, 1 116.70 nm 谱线的稳定振荡条件 $(A_i + D_i)/2$ 的数值随 LD 泵浦功率的变化规律如图 2(s: 弧矢光束; t: 子午光束)。当 LD 泵浦功率从 0.5 W 升至 8.0 W 时, 1 116.70 nm 基频光中弧矢光束部分和子午光束部分的稳定振荡条件 $(A_i + D_i)/2$ 值始终处于同一象限内, 不但其绝对值逐渐靠近 0.5, 而且相同 LD 泵浦功率对应的 $(A_s + D_s)/2$ 与 $(A_t + D_t)/2$ 之间的数值差异很小。说明在 Nd: YAG 晶体热效应影响下, 1 116.70 nm 基频光始终处于稳定振荡状态, 谐振腔具有热不敏感特性^[17, 18]。由于 1 112.62 nm、1 123.24 nm 与 1 116.70 nm 的波长差均小于 7 nm, 故谐振腔参数同时满足三条谱线的 $(A_i + D_i)/2$ 绝对值小于 1 的稳定振荡条件。

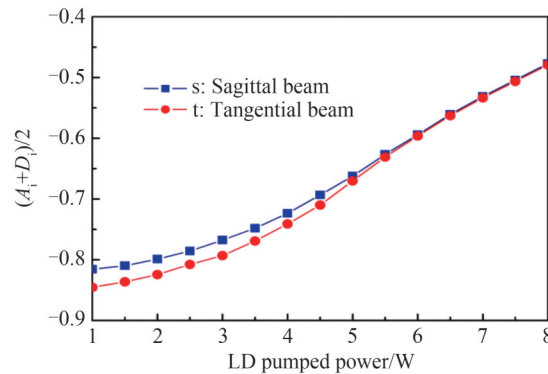


图2 谐振腔的 $(A_i + D_i)/2$ 值随 LD 泵浦功率的变化规律
Fig.2 Variation of $(A_i + D_i)/2$ value of cavity with LD pump power

在 8.0 W 的 LD 最大泵浦功率条件下, 由 LASCAD 软件得到基频光的弧矢光束部分和子午光束部分的光斑半径在谐振腔内的模拟分布特性, 如图 3。在 Nd: YAG 晶体内部, 弧矢光束部分和子午光束部分的光斑半径均接近于 250 μm 的 LD 泵浦光焦斑半径, 说明基频光与 LD 泵浦光之间所具有的良好模体体积重合度有利于提高 LD 的泵浦效率; 在输出镜 M_1 和倍频晶体 LBO 附近, 弧矢光束部分与子午光束部分的半径近似相等 $\omega_s \approx \omega_t$, 说明 L 型折叠谐振腔的像散问题得到了较好的补偿^[19]。在 LBO 晶体内部, 130 μm 左右的光斑半径有助于提高基频光的功率密度和倍频效率。

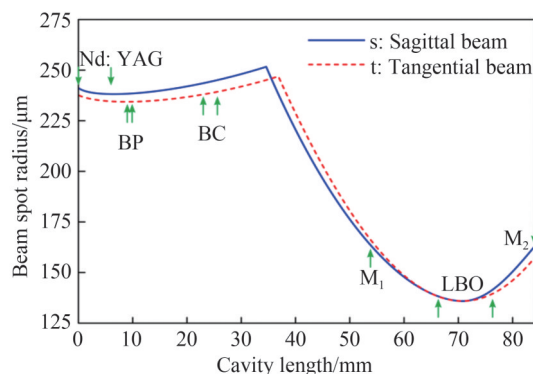


图3 基频光的弧矢光斑半径和子午光斑半径分别沿谐振腔的模拟变化曲线

Fig.3 Simulated variation curves of sagittal spot radius and tangential beam radius of fundamental laser along cavity

2 实验结果及讨论

根据 Fresnel 定律, Nd: YAG 晶体受激辐射产生的非偏振光通过 BP 后, 其电矢量将分解为平行于入射参考面的 p 偏振光分量和垂直于入射参考面的 s 偏振光分量, p 偏振光和 s 偏振光在 BP 的入射端面上的反射率分别表示为^[5]

$$R_p = \frac{\tan^2(A - B)}{\tan^2(A + B)} \quad (1)$$

$$R_s = \frac{\sin^2(A - B)}{\sin^2(A + B)} \quad (2)$$

式中, R_p 、 R_s 分别为 p 偏振光和 s 偏振光的反射率, A 、 B 分别为非偏振光的入射角和折射角。

当空气的折射率 n_0 近似为 1, 光学石英玻璃制成的 BP 在 1 112.62 nm、1 116.70 nm 和 1 123.24 nm 波长处的折射率为 n_i 时, 由折射定律可以得到布儒斯特角 Φ_i 与 A 、 B 之间的变化关系

$$\Phi_i = \arctan\left(\frac{n_i}{n_0}\right) \quad (3)$$

$$\frac{\sin A}{\sin B} = \frac{n_i}{n_0} \quad (4)$$

例如, 调节 BP 的俯仰角, 当非偏光的 A 角等于其 55.12° 的布儒斯特角时, 由式(1)~(4)可知, 1 112.62 nm、1 116.70 nm 和 1 123.24 nm 三条谱线中只有 1 116.70 nm 的 p 偏振光的 R_p 为零。同时, 精确调节 M_1 、 M_2 腔镜的水平方向角和俯仰角。当 1 116.70 nm 的 p 偏振光传播方向与谐振腔光轴平行时, 1 116.70 nm 在谐振腔内以最低损耗形成激光振荡。而 1 112.62 nm 和 1 123.24 nm 的 R_p 虽然只有 10^{-5} 左右, 但是由于色散原因, 在单次通过 BP 后, 1 112.62 nm 和 1 123.24 nm 谱线在谐振腔内的传播方向与谐振腔光轴之间产生约 0.3° 的夹角。在谐振腔内经多次往返后, 两条谱线会因累积的衍射损耗而被抑制。在此基础上, 插入 BC, 使 1 116.70 nm 谱线垂直入射 BC。BC 本身存在的双折射效应会将 p 偏振的 1 116.70 nm 谱线在 BC 中分解为 o 光和 e 光。单次往返通过 BC 时, o 光和 e 光之间产生 $\Delta\varphi_i$ 的相位延迟^[20]

$$\Delta\varphi_i = \frac{2\pi}{\lambda_i} \cdot (n_o - n_e) \cdot 2h = \frac{4\pi h(n_o - n_e)}{\lambda_i} \quad (5)$$

式中, h 为 BC 的厚度, n_o 、 n_e 分别为基频光 λ_i 的 o 光、e 光分量的折射率。

以谐振腔光轴为旋转轴并转动 BC 时, 1 116.70 nm 谱线的 p 偏振方向与 BC 光轴之间的夹角 ν_i 则随之变化。当 $\nu_i = \pi/4$ 时, 出射 BC 后的基频光 ν_i 的 p 偏振方向旋转 $\pi/2$ 。再次单次反向通过 BC 后, 偏振方向再旋转 $\pi/2$, $\Delta\varphi_i$ 为 2π 的整数倍, 即

$$\Delta\varphi_i = 2m\pi \quad (6)$$

1 116.70 nm 谱线中只有 $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ 所对应的纵模才能在谐振腔内单次往返后仍为原方向振动的 p 偏振线偏振光, 可以无反射损耗地再次通过 BP。剩余纵模则因反射损耗而被抑制。由此通过 BC 压

缩纵模个数,实现对 1 116.70 nm 谱线的滤波,可以减小 1 116.70 nm 谱线的噪声。

当精确调节 BP 的俯仰角并使 1 112.62 nm、1 116.70 nm 和 1 123.24 nm 三条谱线的 A 角分别等于各自对应的 Φ 角 ($55.31^\circ@1\ 112.62\ \text{nm}$ 、 $55.12^\circ@1\ 116.70\ \text{nm}$ 、 $54.92^\circ@1\ 123.24\ \text{nm}$) 时,通过进一步精确调节腔镜的水平方向角和俯仰角、BC 的 ν_i 角以及 LBO 晶体的入射角,可以在选频、滤波的基础上实现高效率的 I 类角度相位匹配倍频,分别获得了 556.31 nm、558.35 nm 和 561.62 nm 三个波长可选的低噪声黄绿激光输出。LBO 晶体对应三条基频光的相位匹配参数如表 2。

表 2 I 类角度相位匹配 LBO 晶体的相位匹配参数

Table 2 Phase matching parameters of typed-I critical phase-matching LBO crystal

λ_i / nm	Phase matching angle (θ, φ)/($^\circ$)	Nonlinear optical coefficient $d_{\text{eff}}/(\text{pm}\cdot\text{V}^{-1})$	Maximum allowable angle/ $^\circ$
1 112.62	90, 7.6	0.84	15.2
1 116.70	90, 8.1	0.84	14.3
1 123.24	90, 8.4	0.84	13.8

如图 4 所示,虽然通光面没有镀制增透膜的 BP、BC 会增加插入损耗,但在 BP 选频和 BC 滤波作用下,腔内振荡的基频光 λ 的纵模数减小,纵模竞争趋缓,振荡纵模的增益增加。故 556.31 nm、558.35 nm 和 561.62 nm 黄绿激光分别独立输出时,LD 泵浦阈值均仅为 0.8 W 左右。LD 泵浦功率为 8.0 W 时,556.31 nm、558.35 nm 和 561.62 nm 黄绿激光的最大输出功率分别达到 678 mW、653 mW 和 606 mW,对应的光光转换效率分别为 8.47%、8.16% 和 7.58%,谱线宽度分别仅为 0.34 nm、0.42 nm 和 0.37 nm。

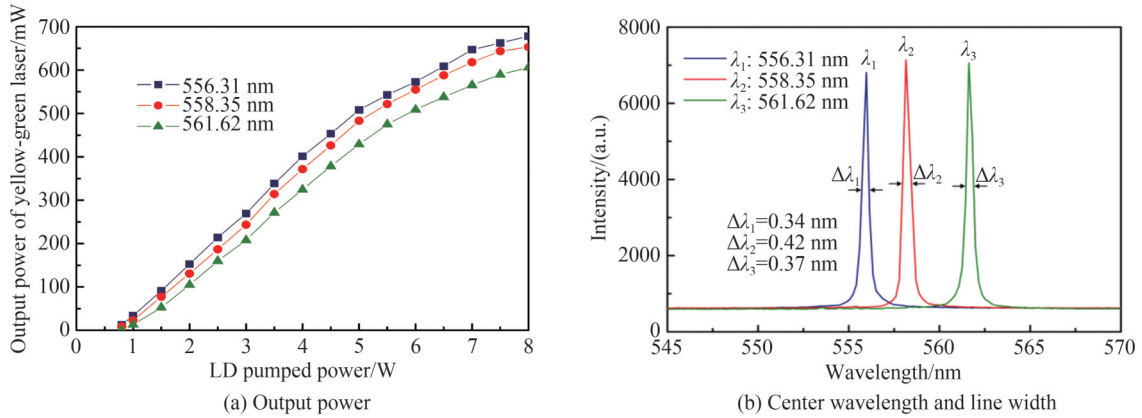


图 4 波长可调的全固态黄绿激光束的输出特性

Fig.4 Output characteristics of wavelength-adjustable all-solid-state yellow-green laser

输出功率均为 500 mW 时,利用一个 550~570 nm 分光镜将黄绿激光分为两束(90% 透射、10% 反射),使用功率计探测透射光的功率不稳定性 ρ ,硅基光电二极管(Silicon Photo Diode, SPD)探测反射光的噪声。同时,将 SPD 产生的光电信号一份为二,一路光电信号输入至示波器通道 C1,以 DC 直流耦合模式探测激光的绝对强度,另一路光电信号输入至示波器通道 C2,以 AC 交流耦合模式探测激光相对于绝对强度的峰峰强度波动量。测量时长 1 h、测量间隔 1 s。黄绿激光输出连续功率和噪声测试分别如图 5、图 6 和表 3 所示。当激光器与 SPD 之间放置一个光阑时,功率为 P 的激光束被光阑阻挡,图 6 中 C1 通道的激光绝对强度为零,C2 通道的光电信号实际为 SPD 和示波器的总本底噪声(A 区域,红色标记的电信号强度);当光阑被快速撤掉,则 C1 通道的光电信号为激光束的绝对强度(C 区域,黄色标记的电信号强度),而 C2 通道的光电信号为激光束噪声与总本底噪声之和(B 区域,红色标记的电信号强度),即总噪声。对 C1、C2 通道测量的电信号强度数据分别求均方根(Root Mean Square, RMS),得到 A 区域的总本底 RMS 噪声 N_{AC} 、B 区域的总 RMS 噪声(N_{T-AC})和 C 区域的激光绝对强度的 SMR 值 I_{DC} ,则激光 SMR 噪声 N_{SMR} 可表示为

$$N_{SMR} = \frac{N_{T-AC} - N_{AC}}{I_{DC}} \quad (7)$$

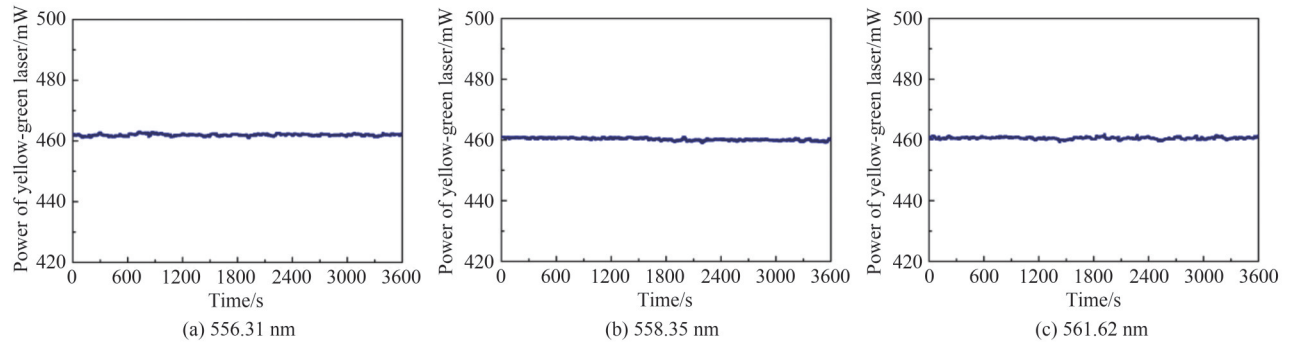


图5 波长可调的全固态黄绿激光的功率稳定性测试

Fig.5 Output power stability tests for wavelength-adjustable all-solid-state yellow-green laser

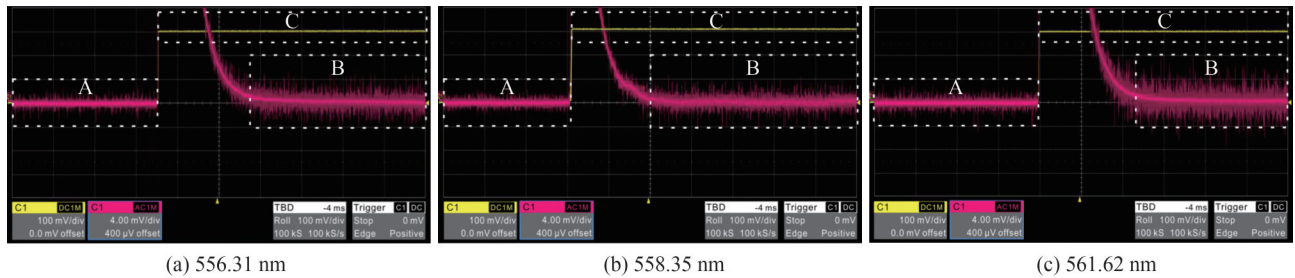


图6 波长可调的全固态黄绿激光的噪声测试

Fig.6 Noise tests for wavelength-adjustable all-solid-state yellow-green laser

表3 波长可调的全固态黄绿激光的不稳定性和噪声参数

Table 3 Instability and noise parameters of wavelength-adjustable all-solid-state yellow-green laser

λ_i/nm	I_{DC}/mV	N_{T-AC}/mV	N_{AC}/mV	ρ	N_{SMR}
556.31	305.3	4.82	2.69	$\pm 0.42\%$	0.69%
558.35	311.1	4.27	2.69	$\pm 0.38\%$	0.51%
561.62	306.4	5.64	2.69	$\pm 0.49\%$	0.96%

由于 I 类角度相位匹配的 LBO 晶体是按照 116.70 nm 波长对应的相位匹配角切割的,通过 BP 与 LBO 晶体配合,能够最大程度地解决纵模之间的交叉饱和效应、和频效应等非线性效应所导致的“绿光问题”对倍频黄绿激光输出稳定性的影响^[21]。故 558.35 nm 黄绿激光的功率不稳定性 ρ 和噪声 N_{SMR} 均最小($\rho = \pm 0.38\%$, $N_{SMR} = 0.51\%$),其次为 556.31 nm($\rho = \pm 0.42\%$, $N_{SMR} = 0.69\%$)和 561.62 nm($\rho = \pm 0.49\%$, $N_{SMR} = 0.91\%$)。

此外,使用激光光束质量分析仪(ModeScan1740)测得的 556.31 nm、558.35 nm 和 561.62 nm 黄绿激光的光束质量 M^2 因子分别为($M^2_{x-556.31} = 3.943$, $M^2_{y-556.31} = 4.301$), ($M^2_{x-558.35} = 3.409$, $M^2_{y-558.35} = 3.584$)和($M^2_{x-561.62} = 3.732$, $M^2_{y-561.62} = 3.971$),光束实际光斑和近场光束轮廓的 2D 和 3D 图像如图 7。较小光束质量 M^2 因子进一步验证了通过谐振腔结构的优化设计补偿像散,有助于提供倍频黄绿激光的光束质量^[22]。然而,受到空间

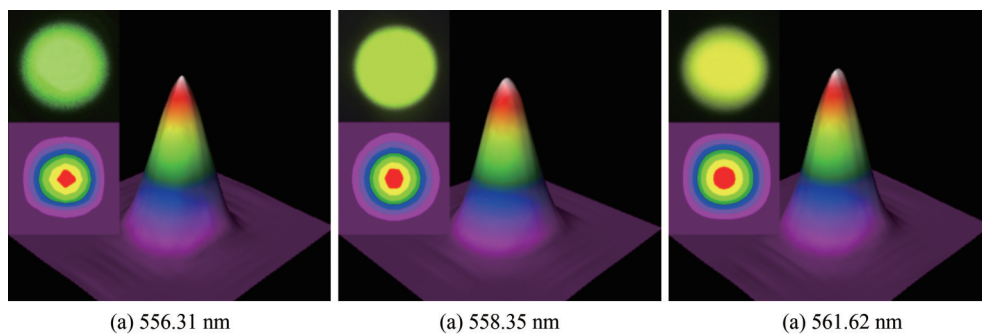


图7 波长可调的全固态黄绿激光的光斑照片、2D 和 3D 近场光束强度分布

Fig.7 Real spot photos, 2D and 3D near field beam profiles of wavelength-adjustable all-solid-state yellow-green laser

传输的LD泵浦光的光束质量较差和未考虑LBO倍频晶体热效应的影响,实验测得的三个波长的倍频黄绿激光的光束质量未能接近于 $M^2=1$ 的基横模。因此,后续实验通过改善LD泵浦光的光束质量,在谐振腔结构优化设计中引入LBO倍频晶体的热透镜焦距,可进一步提高倍频黄绿激光的光束质量。

3 结论

采用808 nm LD端面泵浦Nd:YAG晶体、I类角度相位匹配LBO晶体腔内倍频和优化设计的L型折叠谐振腔结构,以BP选频协同BC滤波,实现了556.31 nm、558.35 nm和561.62 nm三个波长可调、高稳定性、低噪声的黄绿激光连续输出。在8 W的最高LD泵浦功率下,556.31 nm、558.35 nm和561.62 nm黄绿激光独立输出的最大连续功率分别达到了678 mW、653 mW和606 mW,光光转换效率分别为8.47%、8.16%和7.58%,谱线宽度分别为0.34 nm、0.42 nm和0.37 nm;在输出功率均为500 mW时,功率不稳定性仅分别为±0.42%、±0.38%和±0.49%,对应激光SMR噪声仅分别为0.69%、0.51%和0.96%。实验结果表明,“BP+BC”协同配合的选频滤波方式是一种实现中高功率、高稳定性、低噪声、波长可调黄绿激光的有效方法,可很好地应用于生物医学、激光测量、污染监测和光谱分析等领域。

参考文献

- [1] LÜ Yanfei, ZHANG Xihe, TAN Huiming. 555nm all solid-state continuous-wave yellow-green laser [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(5): 674-677.
吕彦飞, 张喜和, 檀慧明. 全固态连续波555nm黄-绿光激光器[J]. 光学精密工程, 2007, 15(5): 674-677.
- [2] GAO J, ZHANG L, SUN H X, et al. High-power continuous-wave yellow-green laser at 558nm under in-band pumping [J]. Optics Communications, 2014, 319: 110-112.
- [3] ZHU P F, ZHANG C M, SONG P, et al. All-solid-state dual end pumped Nd: YAG/LBO yellow green laser with 10.8 W output power at 561 nm [J]. Optics and Spectroscopy, 2015, 118(4): 623-626.
- [4] TELFORD W, MURGA M, HAWLEY T, et al. DPSS yellow-green 561-nm lasers for improved fluorochrome detection by flow cytometry [J]. Cytometry Part A, 2005, 68A(1): 36-44.
- [5] MA Wei, GAO Lanlan, ZHU Xinyu. Research on 561 nm 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.
- [6] ZHANG Kuanshou, LU Huadong, LI Yuanji, et al. Progress on high-power low-noise continuous-wave single-frequency all-solid-state lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(5): 05010002.
张宽收, 卢华东, 李渊骥, 等. 高功率低噪声全固态连续波单频激光器研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(5): 05010002.
- [7] WANG YaJun, GAO Li, ZHANG Xiaoli, et al. Recent development of low noise laser for precision measurement (Invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(12): 109-121.
王雅君, 高丽, 张晓莉, 等. 用于精密测量的低噪声激光器研究进展(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(12): 109-121.
- [8] ZHAO J, GUIRAUD G, PIERRE C, et al. High-power all-fiber ultra-low noise laser [J]. Applied Physics B, 2018, 124(6): 114.
- [9] LIU Yang, LIU Zhaojun, CONG Zhenhua, et al. A diode pumped passively Q-switched Nd: LuYAG laser emitting at 1 123 nm [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(17): 174203.
刘杨, 刘兆军, 丛振华, 等. Nd:LuYAG混晶1 123 nm被动调Q激光器[J]. 物理学报, 2015, 64(17): 174203.
- [10] ZHANG Xue, GE Wenqi, YU Jin, et al. Accuracy and longitudinal-mode-selection performance of etalon in pulsed single longitudinal laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, 29(4): 041004.
张雪, 葛文琦, 余锦, 等. 脉冲单纵模激光器中标准具精度与选模性能[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29(4): 041004.
- [11] ZHANG Fan, GAO Lanlan, MA Wei, et al. Research on 561 nm single-line all-solid-state laser [J]. Laser & Infrared, 2015, 45(5): 496-499.
张帆, 高兰兰, 马威, 等. 全固态561 nm单谱线激光器研究[J]. 激光与红外, 2015, 45(5): 496-499.
- [12] YANG Fei, LI Mengmeng, GAO Lanlan. Single longitudinal mode 589 nm laser in composite-cavity [J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(5): 0514004.
杨飞, 李萌萌, 高兰兰. 基于复合腔的单纵模589 nm激光器[J]. 光子学报, 2021, 50(5): 0514004.
- [13] SINGH S, SMITH R G, VAN UITERT L G. Stimulated-emission cross section and fluorescent quantum efficiency of Nd³⁺ in yttrium aluminum garnet at room temperature [J]. Physical Review B, 1974, 10(6): 2566-2572.
- [14] WANG Dan, HAN Qun, NIU Panpan, et al. Experimental research on high power cascade co-pumping Erbium-Ytterbium co-doped fiber laser [J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(6): 0614001.
王丹, 韩群, 钮盼盼, 等. 辅腔泵浦高功率铒镱共掺光纤激光器实验研究[J]. 光子学报, 2021, 50(6): 0614001.

- [15] YAO Yucheng, LIU Danlin, HUANG Chuyun, et al. Crystal thermal effect simulation of Tm: YAG laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(7): 0714001.
姚育成, 刘丹琳, 黄楚云, 等. Tm: YAG 激光器晶体热效应数值模拟 [J]. *光子学报*, 2016, 45(7): 0714001.
- [16] 白杨. LD 侧面泵浦多晶 Nd: YAG 陶瓷 BBO 电光调 Q 窄脉宽绿光、紫外光激光器研究 [D]. 西安: 西北大学, 2010.
- [17] LI Jianlin, LEI Guangzhi, BAI Yang, et al. Active-passive double Q-switched 946 nm laser with MgO: LiNbO₃ electro-optic crystal and MoSe₂ saturable absorber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(5): 0514002.
李建林, 雷广智, 白杨, 等. 电光-MoSe₂ 主被动双调 Q946 nm 全固态激光器 [J]. *光子学报*, 2018, 47(5): 0514002.
- [18] BAI Y, BAI B, LI D, et al. Pulsed LD side-pumped MgO: LN electro-optic cavity-dumped 1123 nm Nd: YAG laser with short pulse width and high peak power [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2018, 6(1): e4.
- [19] YANG B, LI J L, LEI G Z, et al. A wavelength tunable CW orange-red laser source based on magnesium oxide-doped periodically-poled LiNbO₃ in an intracavity sum-frequency generation [J]. *Materials Science*, 2020, 26(4): 381-386.
- [20] WU Wendi, WANG Huili, ZHOU Tianhua, et al. Research on the filter performance with crystal thickness accuracy in the birefringent filters [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(12): 1208009.
吴闻迪, 王会丽, 周田华, 等. 双折射滤波器晶体片厚度精度与滤波性能的研究 [J]. *中国激光*, 2014, 41(12): 1208009.
- [21] WANG Pengfei, JIANG Dongsheng, LÜ Baida, et al. Experimental study of suppressing green noise in a diode-pumped intracavity-frequency-doubled laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(2): 141-144.
王鹏飞, 姜东升, 吕百达, 等. 二极管泵浦内腔倍频抑制绿光噪声的实验研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(2): 141-144.
- [22] YAN Hongyu, GAO Xin, SONG Jian, et al. Evaluation of beam quality M^2 for 976 nm wide stripe high power semiconductor laser [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, 40(2): 196-203.
闫宏宇, 高欣, 宋健, 等. 976 nm 宽条形高功率半导体激光器的光束质量 M^2 评价 [J]. *发光学报*, 2019, 40(2): 196-203.

Wavelength-adjustable All-solid-state Yellow-green Laser with Low Noise (Invited)

YANG Shunyu^{1,2,3}, ZHOU Jingfeng^{1,2,3}, LI Ben^{1,2,3}, BAI Yang^{1,2,3}

(1 *Institute of Photonics & Photon-Technology, Northwest University, Xi'an 710127, China*)

(2 *State Key Laboratory of Photon-Technology in Western China Energy, Xi'an 710127, China*)

(3 *Shaanxi Engineering Technology Research Center for Solid State Lasers and Application, Xi'an 710127, China*)

Abstract: A Laser Diode (LD) pumped Nd: YAG crystal low-noise all-solid-state yellow-green laser in the wavelength range of 555~561 nm is reported, which becomes as a research hotspot because of its great application potential in industry, atmospheric remote sensing, communication, information storage, food and drug detection and other fields. As we all know, noise is one of the key indicators to measure the stability of laser output. The power stability of the low noise laser beam is higher because there are no power transient spikes. However, the Nd: YAG crystal excites three spectral lines simultaneously at 1 112.62 nm, 1 116.70 nm and 1 123.24 nm. The mode competition among the three spectral lines, the mode competition among the different longitudinal modes in each spectral line and the three-wave coupling effect of the frequency doubling process all make that the frequency doubled yellow-green laser has strong noise and low power stability. It is very difficult to realize that any one of the above-mentioned three spectral lines with very short wavelength interval oscillates individually in the cavity by the method of coating a narrow-band reflective film. At present, the common method to reduce the noise of all-solid-state yellow-green laser is to insert an etalon with the function of selecting a single longitudinal mode or a Birefringent Crystal (BC) with a filtering function into the linear cavity. However, the fundamental frequency laser oscillating in the linear cavity has the inherent defect of small mode volume, which is not conducive to obtaining high power frequency doubled yellow-green laser. The use of etalons to eliminate mode competition among multiple longitudinal modes usually comes at the expense of the output power and the optical-to-optical conversion efficiency of the laser. When performing frequency selection and filtering with a BC placed according to the Brewster angle, it is usually necessary to precisely adjust the size of

Brewster angle and the angle between the optical axis of the fundamental frequency laser and the surface of BC. Therefore, it is extremely difficult to obtain a high-power yellow-green laser using a compact cavity.

In this paper, an all-solid-state yellow-green laser with wavelength-adjustable in the range of 555~561 nm, high power and low noise is reported. A folded cavity structure based on an 808 nm LD end-pumped Nd: YAG crystal and a type-I angle-matched LBO crystal intracavity frequency-doubling is used. After optimizing the structural parameters of the cavity, the coupling rate between the mode volume of the fundamental frequency laser and the mode volume of the LD pump laser is improved, and the cavity had the thermal insensitivity to the dynamic change of thermal focal length. In addition, the beam astigmatism caused jointly by the folded cavity structure and the concave mirror is also effectively compensated. A Brewster Polarizer (BP) and a BC are successively inserted into the cavity to form a Birefringent Filter (BF). After precisely adjusting the corresponding Brewster angle of the BP, respectively, the frequency selection for the three spectral lines with wavelengths of 1 112.62 nm, 1 116.70 nm and 1 123.24 nm generated by Nd: YAG crystal is completed. Meanwhile, the oscillation of a single wavelength fundamental frequency laser is realized in the cavity on the basis of precisely controlling the pitch angle of the cavity mirror. Then, the filtering of the fundamental frequency laser (i.e. the number of compressed longitudinal modes) is realized by adjusting the angle between the p-polarization direction of the fundamental frequency laser and the optical axis of BC. Finally, high-power, high-stability, and low-noise yellow-green laser with central wavelengths of 556.31 nm, 558.35 nm, and 561.62 nm is obtained, respectively, which is based on the I-type angle-matched LBO crystal intracavity frequency doubling. When the highest pumped power of LD is 8.0 W, the maximum independent CW output powers of the yellow-green laser beams with central wavelengths of 556.31 nm, 558.35 nm and 561.62 nm reach 678 mW, 653 mW and 606 mW, respectively, corresponding to the optical-to-optical conversion efficiency are 8.47%, 8.16% and 7.58%, and the line widths are 0.34 nm, 0.42 nm and 0.37 nm, respectively. At an output power of 500 mW, the power instability of the three yellow-green laser beams at 556.31 nm, 558.35 nm and 561.62 nm are $\pm 0.42\%$, $\pm 0.38\%$ and $\pm 0.49\%$, respectively, the corresponding SMR noise are 0.69%, 0.51% and 0.96%. Meanwhile, the beam quality factor are ($M^2_{x-556.31} = 3.943$, $M^2_{y-556.31} = 4.301$), ($M^2_{x-558.35} = 3.409$, $M^2_{y-558.35} = 3.584$) and ($M^2_{x-561.62} = 3.732$, $M^2_{y-561.62} = 3.971$), respectively.

The experimental results show that the frequency selective filtering of “BP+BC” is an effective method to realize high-power, high-stability, low-noise, wavelength-adjustable yellow-green laser. Our research provides a novel source for future potential applications in biomedicine, laser measurement, pollution monitoring and spectral analysis.

Key words: All-sole-state; Yellow-green laser; Wavelength-adjustable; Low noise; Brewster polarizer frequency selection; Birefringent crystal filtering

OCIS Codes: 140.3480; 140.3515; 140.3580; 140.7300