

文章编号: 1000-7032(2023)08-1463-08

## 基于新型Nd:Gd<sub>0.1</sub>Y<sub>0.9</sub>AlO<sub>3</sub>晶体的540 nm倍频绿光激光器

陈邱笛<sup>1,2,3</sup>, 郑为比<sup>1,2,3</sup>, 张沛雄<sup>1,2,3\*</sup>, 李真<sup>1,2,3</sup>, 陈振强<sup>1,2,3</sup>

(1. 广东省晶体与激光技术工程研究中心, 广东广州 510632;  
2. 广东省光纤传感与通信重点实验室, 广东广州 510632; 3. 暨南大学光电工程系, 广东广州 510632)

**摘要:** 本工作首次在新型Nd:Gd<sub>0.1</sub>Y<sub>0.9</sub>AlO<sub>3</sub>(Nd:GYAP)晶体上实现了540 nm倍频绿光激光器。Nd:GYAP晶体产生在1 μm波段的基频激光中心波长为1 079.4 nm,在此基础上利用LBO晶体产生的倍频绿色激光的中心波长为539.4 nm,阈值为46 mW,最大输出功率为65 mW。这一激光系统产生的约为540 nm的绿色激光相较于传统Nd离子掺杂的晶体1 064 nm激光倍频而来的532 nm绿色激光,可以有效地避开Nd<sup>3+</sup>位于530 nm附近的吸收峰。因此,具有更长波长、发射峰位于约540 nm处的绿色激光器可以使激光输出更有效,并扩展绿色激光器的应用。

**关键词:** LBO; Nd:GYAP; 倍频; 540 nm激光; 绿色激光器

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20230089

## 540 nm Frequency-doubled Green Laser Realized by A Novel Nd:Gd<sub>0.1</sub>Y<sub>0.9</sub>AlO<sub>3</sub> Crystal

CHEN Qiudi<sup>1,2,3</sup>, ZHENG Weibi<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Peixiong<sup>1,2,3\*</sup>, LI Zhen<sup>1,2,3</sup>, CHEN Zhenqiang<sup>1,2,3</sup>

(1. Guangdong Provincial Engineering Research Center of Crystal and Laser Technology, Guangzhou 510632, China;  
2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, Guangzhou 510632, China;  
3. Department of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

\* Corresponding Author, E-mail: pxzhang@jnu.edu.cn

**Abstract:** The 540 nm frequency-doubled green laser was first realized on a novel Nd:Gd<sub>0.1</sub>Y<sub>0.9</sub>AlO<sub>3</sub>(Nd:GYAP) crystal. The fundamental-frequency wavelength that was generated by Nd:GYAP crystal centered at 1 079.4 nm, and the frequency-doubled green laser was centered at 539.4 nm with a threshold of 46 mW and a maximum output power of 65 mW. An LBO was selected as the frequency-doubling crystal. The ~540 nm green laser can avoid the absorption peak of Nd<sup>3+</sup> at near 530 nm. The green laser with longer wavelengths at approximately 540 nm can make the output more efficient, and expand the application of the green laser.

**Key words:** LBO; Nd:GYAP; frequency doubling; 540 nm laser; green laser

### 1 引 言

激光二极管(LD)泵浦的固态激光器可以通过腔内二次谐波(SHG)倍频的方式将红外波段激光转换为可见光波段激光<sup>[1-3]</sup>。以这种方式生产的固态绿色激光源高效且紧凑,这使其广泛应用于

各个领域,在过去一段时间内得到了快速发展<sup>[4-5]</sup>。1 080 nm左右的激光在地球探测、医疗和科学研究等领域具有重要意义<sup>[6-8]</sup>。通过进一步SHG倍频,可以获得540 nm左右的绿色激光,在血液检测和医疗美容等方面具有重要应用<sup>[9-10]</sup>。

众所周知,由Nd离子掺杂的激光晶体可以发

收稿日期: 2023-04-13; 修订日期: 2022-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(51972149,61935010,51872307,51702124,62175091); 广东省重点领域研究发展计划(2020B0090922006) Supported by National Natural Science Foundation of China (51972149, 61935010, 51872307, 51702124, 62175091); Research and Development Plan for Key Fields in Guangdong Province(2020B0090922006)

射波长为 $\sim 1.06 \mu\text{m}$ 基频激光,通过SHG倍频即可获得波长为 $\sim 532 \text{ nm}$ 的绿色激光。在这一过程中, $\text{LiB}_3\text{O}_5$ (LBO)作为一种常见的倍频晶体,可以在强激光的作用下利用其二次非线性效应将长波长激光的频率加倍,并输出短波长激光<sup>[11-13]</sup>。LBO可以有效地将Nd离子激光系统的频率提高一倍或三倍,还可以应用于光学参数啁啾放大、高功率和短脉冲激光输出等领域<sup>[14-17]</sup>。因此,LBO是实现绿色激光输出的重要倍频晶体。在已有的研究中,Li等使用高脉冲能量电光调Q MOPA激光系统,利用Nd:YAG激光器进行倍频,在532 nm处获得脉冲能量为13.2 mJ、脉宽为6.4 ns的激光脉冲<sup>[18]</sup>。Meier等通过Nd:YAG激光器的倍频实现了134 W高功率532 nm连续激光输出<sup>[19]</sup>。Guo等报道了一种基于Nd:YVO<sub>4</sub>晶体、在确保激光器在532 nm处单纵模(SLM)工作的条件下,最大化倍频激光器的输出功率的方法<sup>[20]</sup>。然而,不难发现,由于通常使用商用Nd:YAG或Nd:YVO<sub>4</sub>晶体作为基频激光器的增益介质,倍频绿色激光器的波长由于Nd:YAG和Nd:YVO<sub>4</sub>在1 064 nm的输出波长而被限制在532 nm<sup>[21-22]</sup>。然而,532 nm处的激光位于Nd<sup>3+</sup>离子约为530 nm的吸收峰附近,这严重影响激光输出效率,因而大大限制了其应用范围<sup>[23-24]</sup>。因此,开发新的激光晶体对于实现波长约540 nm的绿色激光具有重要意义。

Nd:Gd<sub>0.1</sub>Y<sub>0.9</sub>AlO<sub>3</sub>(Nd:GYAP)是一种新型激光晶体,其特性与YAP晶体相似<sup>[25-26]</sup>。这种晶体可以用提拉法(Czochralski (Cz) method)生长,具有优良的物理和化学特性。GYAP晶体具有500~600 cm<sup>-1</sup>范围内的低声子能量,因此可以减少多光子去激发过程,并提高量子发光效率<sup>[27-29]</sup>。同时,GYAP晶体实现了Y<sup>3+</sup>离子和Gd<sup>3+</sup>离子的共同掺杂,这可以有效地提高晶体分离系数和晶体生

长质量,因为掺杂的Gd<sup>3+</sup>离子(0.093 8 nm)和激活离子Nd<sup>3+</sup>离子(0.099 5 nm)的半径相似<sup>[30]</sup>,从而导致发射截面减小和荧光寿命增加<sup>[31-34]</sup>。由于这些原因,Nd:GYAP晶体是理想的1  $\mu\text{m}$ 波段激光材料。在先前的研究中,已经利用Nd:GYAP晶体实现了在 $\sim 1 \mu\text{m}$ 波段超过8 W的连续波(CW)激光输出<sup>[35]</sup>。通过在激光腔中插入可饱和吸收体,本课题组也已经成功搭建了调Q激光器<sup>[36-37]</sup>。在这些研究中,Nd:GYAP晶体显示了其优异的激光性能。值得注意的是,这些研究中Nd:GYAP晶体的发射光谱位于1 080 nm附近<sup>[25,35-37]</sup>。因此,在1 080 nm处的基频激光器的SHG倍频激光器的发射波长将位于大约540 nm处,从而可以有效地避免Nd<sup>3+</sup>离子自吸收的影响。

本工作首次在新型Nd:GYAP晶体上实现了540 nm倍频绿光激光器。以Nd:GYAP晶体为增益介质,LBO为倍频晶体,建立了一种线性腔内倍频激光器,成功地实现了65 mW的绿光输出。主峰在1 079 nm的激光被成功地倍频到539.4 nm。与Nd:GYAP激光晶体的吸收光谱和发射光谱相比,可以发现该波长的输出激光成功避开了Nd:GYAP晶体在528 nm处的吸收峰。除此之外,本工作还研究了基频激光和倍频激光的偏振特性。如表1所示,与传统532 nm倍频激光器相比,本工作中的Nd:GYAP晶体倍频产生的绿色激光尽管输出功率较低,但却拥有少见的540 nm输出波长和更低的激光阈值。更低的阈值可能正是由于540 nm的发射峰避免了Nd<sup>3+</sup>离子的自吸收使得吸收效率得到提升。这一结果表明,新型Nd:GYAP晶体可以有效地实现约540 nm的绿色倍频激光输出。这也为避开Nd<sup>3+</sup>离子的自吸收提供了有效的途径,从而扩大绿色激光器的应用范围。

表1 Nd:GYAP与其他倍频绿光特性对比

Tab. 1 Comparison of Nd:GYAP with other SHG green laser characteristics

激光晶体	倍频晶体	激光阈值/W	输出功率/W	中心波长/nm	Ref.
Nd:YVO <sub>4</sub>	KTP	$\sim 2.5$	5.6	532	[38]
Nd:YVO <sub>4</sub>	GTR-KTP	$\sim 5$	7.2	532	[39]
Nd:YAG	LBO	1.5	3.2	532	[40]
Nd:GYAP	LBO	0.046	0.065	540	This work

## 2 实 验

### 2.1 Nd:GYAP光谱特性测试

Nd:GYAP是通过提拉法(Cz)生长并按 $Pnma$

空间群定向后沿 $b$ 轴切割的。晶体的吸收光谱和荧光光谱分别通过UV-VIS-NIR光谱仪(Perkin Elmer, Lambda 900)和分光光度计(Edinburgh Instruments, FLS920)测量。同时,本工作对其发射与吸

收截面进行了计算。

### 2.2 激光实验装置

将 Nd:GYAP 晶体沿 *b* 轴加工成 4 mm×4 mm×5 mm 的尺寸,以产生约 1 μm 的基频激光,图 1 插图 为激光样品照片。为了实现绿色激光输出,设计了一个直腔来实现~1 μm 激光器的倍频操作,如图 1 所示。该装置的泵浦源是一种连续波(CW)工作的光纤耦合激光二极管(LD),发射波长为 808 nm,纤芯直径为 400 μm,数值孔径(NA)为 0.22。泵浦光束通过 1:1 耦合透镜系统聚焦在 Nd:GYAP 晶体的端面,以激发晶体发射~1 μm 的基频激光。输入镜 M1 曲率半径为 200 mm,在 808 nm 处高透( $R < 0.2\%$ ),在 1 080 nm 处高反( $R > 99.8\%$ )。位于腔内的平面

镜 M2 在 1 080 nm 处高透( $T > 99.5\%$ )以使基频光通过,在 540 nm 处具有高反涂层( $R > 99.5\%$ ),使绿光集中输出,从而提高输出绿色激光器的效率。输出耦合镜(OC)M3 具有 200 mm 的曲率半径,并且在 1 080 nm 处高反( $R > 99.5\%$ ),其与 M1 一起对基频光形成振荡。M3 同时对 540 nm 具有高透过率,这有效地实现了 540 nm 绿色激光输出。选择沿  $\theta = 90^\circ$ 、 $\Phi = 0^\circ$  切割的 LBO 晶体作为倍频晶体,其尺寸为 3 mm×3 mm×20 mm。LBO 晶体的两个端面均涂覆 1 030~1 230 nm 和 530~620 nm 波段的防反射膜。Nd:GYAP 和 LBO 均包裹在铝箔中,并放置在水冷铜块中,冷却水温度为 18 °C。整个装置放置得尽可能紧凑,整个腔长约为 50 mm。

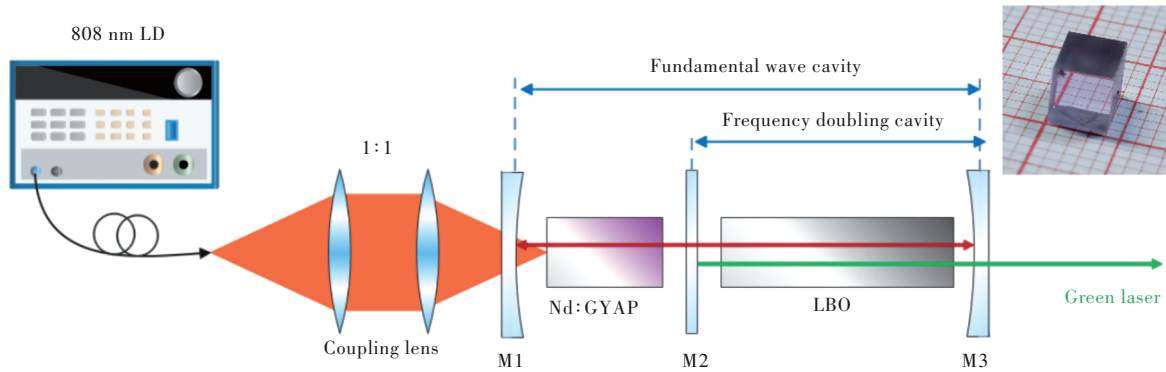


图 1 基于 Nd:GYAP 的腔内倍频绿光激光器装置图。插图:Nd:GYAP 激光样品照片。

Fig.1 Device diagram of intracavity frequency doubling green laser based on Nd:GYAP. Insert: photo of Nd:GYAP.

## 3 结果与讨论

### 3.1 Nd:GYAP 光谱特性

与 YAP 晶体一样,GYAP 晶体由于其各向异性的晶体结构,其光谱特性由于不同的轴向而区别很大。*a* 切和 *c* 切晶体具有更大的发射截面和更小的荧光寿命,因此它们具有更高的存储能量,

适合进行脉冲激光操作<sup>[41]</sup>。*b* 切晶体具有更高的增益,因此更适合于连续激光操作。因此,为了获得更高效的绿色激光器,本研究选择了 *b* 切 Nd:GYAP 晶体。图 2(a)展示了 300~1 000 nm 范围内的 *b* 切 Nd:GYAP 晶体的吸收截面,其位于 804 nm 处的峰值可以与商用 808 nm 激光二极管(LD)匹配良好。这一峰位是由于 Nd<sup>3+</sup> 离子从基态跃迁

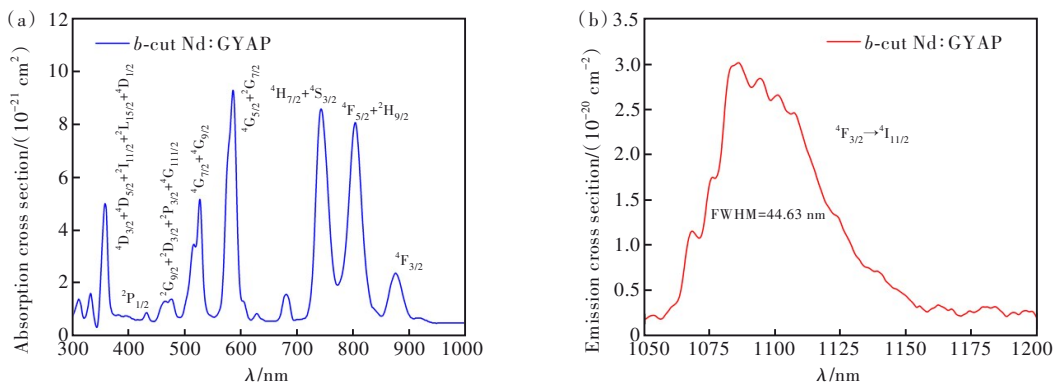


图 2 *b* 切 Nd:GYAP 晶体光谱特性。(a)吸收截面;(b)发射截面。

Fig.2 Spectral characteristics of the *b*-cut Nd:GYAP crystal. (a)Absorption cross section. (b)Emission cross section.

到 ${}^4F_{5/2}+{}^4I_{9/2}$ 能级,在804 nm处, $b$ 切Nd:GYAP晶体具有 $8.07\times 10^{-21}$  cm<sup>2</sup>的大吸收截面。同时我们也注意到,在中心波长为528 nm也存在一个吸收峰,与常见的532 nm倍频激光波长相重合。使用波长为808 nm的光泵浦测量了1 050~1 200 nm范围内的荧光光谱,并计算了发射截面,如图2(b)所示。该发射与 ${}^4F_{3/2}$ 到 ${}^4I_{11/2}$ 能级的跃迁有关,其峰值位于1 086 nm,最大发射截面为 $3.03\times 10^{-20}$  cm<sup>2</sup>。由于引入了Gd<sup>3+</sup>离子, $b$ 切Nd:GYAP晶体发射峰具有极宽的半高宽,为44.63 nm。值得注意的是,倍频操作后的发射波长可以避免528 nm的吸收峰,从而可以有效地避免Nd<sup>3+</sup>离子自吸收的影响。

### 3.2 Nd:GYAP晶体~1 μm波段激光器

本工作首先研究了Nd:GYAP晶体的~1 μm

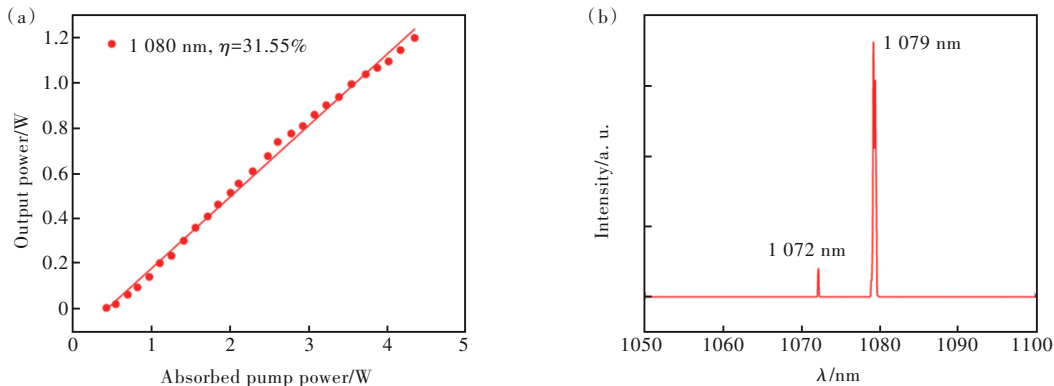


图3 Nd:GYAP激光器1 μm波段激光特性。(a)输出功率;(b)激光光谱。

Fig.3 1 μm-band laser characteristics of Nd:GYAP. (a)Output power. (b)Laser spectrum.

如图3(b)所示,本工作利用光谱分析仪(YOKOGAWA,AQ6374)测量了Nd:GYAP在~1 μm处的激光光谱。连续激光器的激光光谱具有以1 079 nm为中心的发射峰,并且在1 072 nm处也存在峰值。这与Nd:GYAP晶体的荧光发射光谱一致。1 079 nm处的主峰将在倍频操作中发挥作用,因此在添加LBO晶体后,可以实现~540 nm的绿色激光输出。

### 3.3 倍频绿光激光器特性

当LBO晶体置于激光腔中时,本工作首次在Nd:GYAP上通过倍频操作成功地获得了约540 nm的绿色激光输出。如图4(a)所示,通过实验可以获得绿色激光器的输出功率与Nd:GYAP晶体的吸收泵浦功率之间的关系,也几乎呈线性增加。当吸收泵浦功率仅为0.046 W时,可以获得输出功率为0.002 W的绿色激光器。这种极低的阈值低于之前的1 μm激光器。这可能是由于M3在1 080 nm的高反射率,导致1 080 nm的激光被完全限制在激光腔

激光特性。在图2所示的装置中,在没有置入LBO晶体的情况下,M3被具有曲率半径同样为200 mm但在1 080 nm处透射率为95%的输出耦合镜代替,从而实现了约1 080 nm激光输出。

如图3(a)所示, $b$ 切Nd:GYAP晶体作为增益介质时,激光输出功率和吸收泵浦功率之间几乎呈线性关系。尽管为了与后续的绿色激光器保持一致而使用了一个长腔,Nd:GYAP晶体的激光输出仍然表现出31.5%的良好斜率效率和0.427 W的低阈值。当吸收泵浦功率为4.36 W时,最大输出功率达到1.197 W。之后,由于晶体的热效应,当泵浦功率继续增加时,输出功率不再显著变化。这证明Nd:GYAP晶体具有优异的激光性能,适用于~1 μm波段的激光材料,为后续倍频操作提供了重要基础。

内,从而提高了激光腔内1 080 nm激光的效率。与吸收泵浦功率相比,本研究获得的绿光输出具有2.02%的斜率效率。当泵浦功率达到3.083 W时,可以获得65 mW的最大绿光输出。之后,由于晶体的热效应,输出功率开始降低。这也是Nd:GYAP激光晶体首次通过倍频操作实现绿色激光输出。

采用同样的光谱分析仪(YOKOGAWA,AQ6374)测量倍频后的绿色激光发射光谱,如图4(b)所示。绿光的发射峰位于539.4 nm处,将其乘以2后可以发现,与Nd:GYAP晶体的1 079 nm激光发射峰非常一致。该发射峰的半高宽为0.379 nm。由于基频光中的1 072 nm波长成分较弱,在倍频操作中被LBO晶体损耗后未能实现倍频输出。与传统532 nm激光器相比,Nd:GYAP晶体获得的倍频激光器可以在约540 nm处实现更长波长的绿色激光输出。该波长还避免了Nd:GYAP晶体在528 nm处的吸收峰,从而避免了Nd离子的

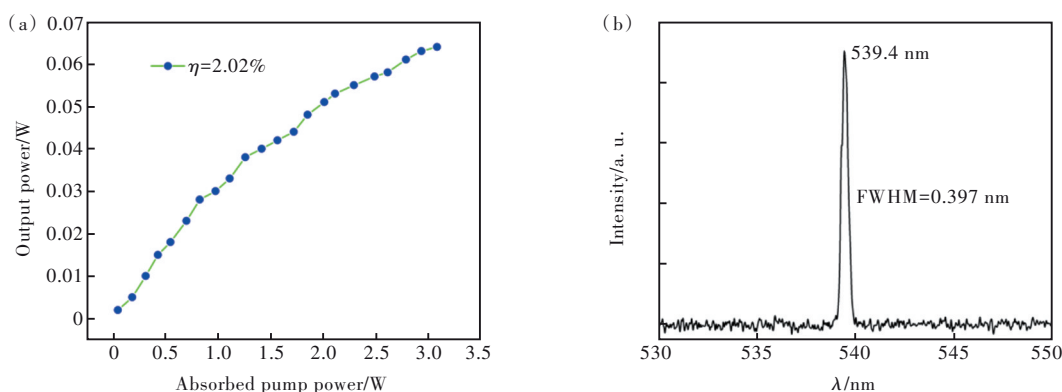


图 4 绿光激光特性。(a)输出功率;(b)激光光谱。

Fig.4 Green laser characteristics. (a)Output power. (b)Laser spectrum.

自吸收效应。

### 3.4 1 080 nm 激光器和 540 nm 激光器的偏振特性

通过在整个装置的末端放置格兰-泰勒棱镜,可以分别研究 1 080 nm 激光器和倍频 540 nm 激光器的偏振特性。格兰泰勒棱镜是一种由天然方解石晶体制成的双折射偏光器件,当光入射时可以对偏振方向进行分解。旋转棱镜,每 10°记录一次功率值,具有最大功率的角度对应于其偏振方向。图 5(a)、

(b)分别显示了在 2.239 W 泵浦功率下功率归一化后 1 080 nm 激光器和 540 nm 激光器的偏振特性。可以发现,基频激光器和 SHG 激光器都是线性偏振的,偏振方向分别为 45°和 90°。众所周知,在 I 型相位匹配中存在  $o+o \rightarrow e$  的变化。然而,在这项研究中,由于基频激光具有 45°偏振,当通过 LBO 时,由于晶体的光学旋转,偏振方向会发生偏转。此时,具有不同偏振方向的基频激光器在振荡过程中被组合,影响了倍频激光器的偏振方向。

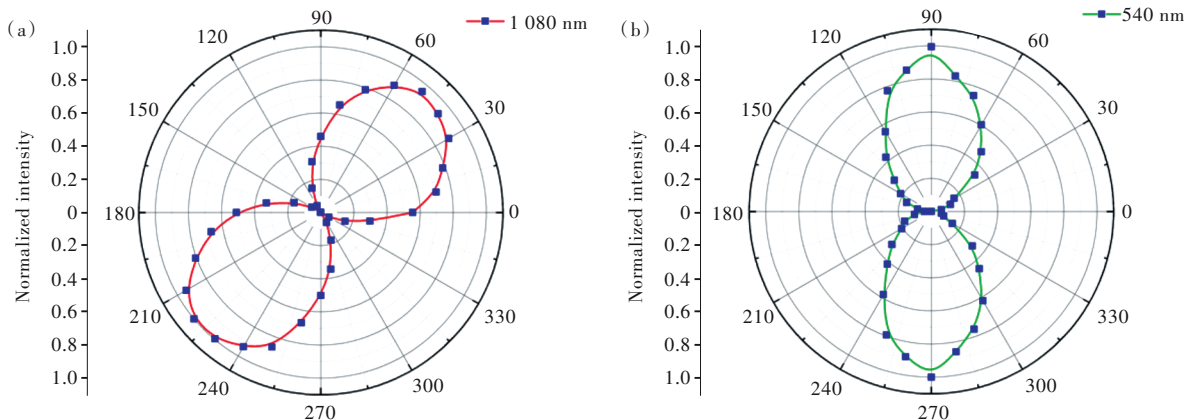


图 5 激光偏振特性。(a)基频 1 080 nm 激光的偏振;(b)倍频 540 nm 激光器的偏振。

Fig.5 Polarization characteristics. (a)Polarization of the 1 080 nm laser. (b)Polarization of the 540 nm laser.

## 4 结 论

本工作首次在新型 Nd:GYAP 晶体上实现了 ~ 540 nm 倍频绿光激光器。在本研究中,使用 LBO 晶体实现腔内倍频操作,并成功获得了中心波长为 539.4 nm 的绿色激光器。激光阈值为 0.046 W,最大输出为 65 mW。该激光器还具有 90°偏振特性。通过对光谱和基频激光的分析,可以发现~540 nm 激光来自 Nd:GYAP 晶体在 1 079 nm 的激光输出,这可以避免 Nd<sup>3+</sup>离子在 528 nm 的

吸收峰。这一结果表明,新型 Nd:GYAP 晶体可以有效地实现约 540 nm 的绿色倍频激光输出。尽管当前输出功率仍然很低,但是这为解决 Nd<sup>3+</sup>离子自吸收问题提供了新的思路。同时,这一新波长也完全可以胜任传统 532 nm 绿色激光在显示、医疗等多领域的应用。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:  
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20230089>.

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] HE C J, YU H J, ZHANG J Y, *et al.* High efficiency single-pass SHG of low power CWML and QML laser in an MgO:PPLN [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2018, 106: 197-201.
- [ 2 ] 张雨彤, 朱梦洪, 王彪, 等. 碳酸钙镁石家族非线性光学晶体研究进展 [J]. 人工晶体学报, 2022, 51(S1): 1608-1625.  
ZHANG Y T, ZHU M Q, WANG B, *et al.* Research progress of huntite family nonlinear optical crystals [J]. *J. Synth. Cryst.*, 2022, 51(S1): 1608-1625. (in Chinese)
- [ 3 ] ZHAO J, MEI D J, WANG W K, *et al.* Recent advances in nonlinear optical rare earth structures [J]. *J. Rare Earths*, 2021, 39(12): 1455-1466.
- [ 4 ] ZHANG B, XU C Q. Compact, and efficient continues wave intra-cavity frequency doubling Nd:YVO<sub>4</sub>/MgO:PPLN 542/543 nm green lasers [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2020, 122: 105885-1-4.
- [ 5 ] CHEN Y F, PAN Y Y, LIU Y C, *et al.* Efficient high-power continuous-wave lasers at green-lime-yellow wavelengths by using a Nd:YVO<sub>4</sub> self-Raman crystal [J]. *Opt. Express*, 2019, 27(3): 2029-2035.
- [ 6 ] LORENZ S, BEYER J, FUCHS M, *et al.* The potential of reflectance and laser induced luminescence spectroscopy for near-field rare earth element detection in mineral exploration [J]. *Remote Sens.*, 2019, 11(1): 21-1-12.
- [ 7 ] MUHAMMAD N, WHITEHEAD D, BOOR A, *et al.* Comparison of dry and wet fibre laser profile cutting of thin 316L stainless steel tubes for medical device applications [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2010, 210(15): 2261-2267.
- [ 8 ] SHA Y C, JIA Z C, LI Z W, *et al.* Dislocation analysis of germanium wafers under 1 080 nm laser ablation [J]. *Appl. Opt.*, 2020, 59(23): 6803-6808.
- [ 9 ] LAPOTKO D, KUCHINSKY G, ANTONISHINA E, *et al.* Laser viability method for red blood cell-state monitoring [C]. *Proceedings of the SPIE 2628, Optical and Imaging Techniques for Biomonitoring, Barcelona*, 1996: 340-348.
- [ 10 ] HUANG C H, ZHANG G, WEI Y, *et al.* A compact and efficient four-wavelength Q-switched Nd:YAP laser [J]. *Laser Phys.*, 2010, 20(4): 745-749.
- [ 11 ] “中国晶体珍宝”——LBO 晶体 [J]. 人工晶体学报, 2022, 51(8): 1512.  
“Treasure of Chinese crystal”: LBO crystal [J]. *J. Artif. Cryst.*, 2022, 51(8): 1512. (in Chinese)
- [ 12 ] SHANG L J, CAO Z Z, XU H, *et al.* An intracavity frequency doubled Nd:YVO<sub>4</sub> red 671 nm laser based on LBO crystal [J]. *Optics*, 2019, 8(2): 7-10.
- [ 13 ] ZHANG T, ZHENG W X, FENG K, *et al.* Towards power scaling of simple CW ultraviolet *via* Pr:LiYF<sub>4</sub>-LBO laser at 320 nm [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2022, 34(2): 129-132.
- [ 14 ] GALLETI M, OLIVEIRA P, GALIMBERTI M, *et al.* Ultra-broadband all-OPCPA petawatt facility fully based on LBO [J]. *High Power Laser Sci. Eng.*, 2020, 8: e31-1-16.
- [ 15 ] ZOU J Y, ZHOU L B, ZHENG W X, *et al.* An in-band diode-end-pumped high-power and high-efficiency ultrashort pulse Nd:YVO<sub>4</sub> bulk laser mode-locked by a frequency doubling LBO crystal [J]. *Infrared Phys. Technol.*, 2021, 116: 103759-1-5.
- [ 16 ] SONG J J, MENG X H, WANG Z H, *et al.* Generation of femtosecond laser pulse at 1.43 GHz from an optical parametric oscillator based on LBO crystal [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2019, 36(12): 124206-1-4.
- [ 17 ] 范锦涛, 胡明列, 顾澄琳, 等. 基于 LBO 的高功率飞秒绿光抽运的光学参量振荡器 [J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0902009-1-4.  
FAN J T, HU M L, GU C L, *et al.* High power femtosecond green-pumped optical parametric oscillator based on lithium triborate [J]. *Chin. J. Lasers*, 2014, 41(9): 0902009-1-4. (in Chinese)
- [ 18 ] LI X D, ZHOU Y P, XU H B, *et al.* High-stability, high-pulse-energy MOPA laser system based on composite Nd:YAG crystal with multiple doping concentrations [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2022, 152: 108080-1-5.
- [ 19 ] MEIER T, WILLKE B, DANZMANN K. Continuous-wave single-frequency 532 nm laser source emitting 130 W into the fundamental transversal mode [J]. *Opt. Lett.*, 2010, 35(22): 3742-3744.
- [ 20 ] GUO Y R, SU J, LU H D. Optimization of the nonlinear crystal length for high-power single-frequency intracavity frequency-doubling lasers [J]. *Appl. Opt.*, 2022, 61(26): 7565-7570.
- [ 21 ] 付鑫鹏, 付喜宏, 姚聪, 等. 基于超薄层 MoS<sub>2</sub> 可饱和吸收体的被动调 Q 固体 Nd:YAG 激光器 [J]. 发光学报,

- 2021, 42(5): 668-673.
- FU X P, FU X H, YAO C, *et al.* Passive Q-switched solid-state Nd:YAG laser based on ultrathin MoS<sub>2</sub> saturable absorber [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(5): 668-673. (in Chinese)
- [ 22 ] 张恒利, 徐浏, 毛叶飞, 等. 880 nm LD 端面泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条激光实验研究 [J]. 量子电子学报, 2014, 31(1): 117.
- ZHANG H L, XU L, MAO Y F, *et al.* 880 nm LD end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> experimental research on flat noodles laser [J]. *J. Quantum Electron.*, 2014, 31(1): 117. (in Chinese)
- [ 23 ] BENSALID B, RAYMOND F, LEROUX M, *et al.* Influence of luminescence self-absorption on photoluminescence decay in GaAs [J]. *J. Appl. Phys.*, 1989, 66(11): 5542-5548.
- [ 24 ] WANG W, SUN L X, ZHANG P, *et al.* Reducing self-absorption effect by double-pulse combination in laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Microchem. J.*, 2022, 172: 106964.
- [ 25 ] LI D, LIU Q, ZHANG P X, *et al.* Crystal growth, optical properties and laser performance of new mixed Nd<sup>3+</sup> doped Gd<sub>0.1</sub>Y<sub>0.9</sub>AlO<sub>3</sub> crystal [J]. *J. Alloys Compd.*, 2019, 789: 664-669.
- [ 26 ] 丁言国, 叶崇志. YAlO<sub>3</sub>:Ce 晶体的生长及性能研究 [J]. 人工晶体学报, 2022, 51(6): 965-972.
- DING Y G, YE C Z. Growth and properties of YAlO<sub>3</sub>:Ce crystal [J]. *J. Synth. Cryst.*, 2022, 51(6): 965-972. (in Chinese)
- [ 27 ] ZHANG P X, WANG R, HUANG X B, *et al.* Sensitization and deactivation effects to Er<sup>3+</sup> at ~2.7 μm mid-infrared emission by Nd<sup>3+</sup> ions in Gd<sub>0.1</sub>Y<sub>0.9</sub>AlO<sub>3</sub> crystal [J]. *J. Alloys Compd.*, 2018, 750: 147-152.
- [ 28 ] WANG Y H, CHEN X G, ZHANG P X, *et al.* Growth, spectroscopic features and efficient 2 μm continuous-wave laser output of a Tm<sup>3+</sup>:Gd<sub>0.1</sub>Y<sub>0.9</sub>AlO<sub>3</sub> disordered crystal [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2020, 131: 106421-1-6.
- [ 29 ] 谭慧瑜, 张沛雄, 牛晓晨, 等. 可见光激光晶体 Sm<sup>3+</sup>:CaDyAlO<sub>4</sub> 的光学性能 [J]. 发光学报, 2022, 43(11): 1741-1749.
- TAN H Y, ZHANG P X, NIU X C, *et al.* Optical properties of visible laser crystal Sm<sup>3+</sup>:CaDyAlO<sub>4</sub> [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(11): 1741-1749. (in Chinese)
- [ 30 ] XIA W S, ZHAO X B, YUE L, *et al.* Microstructural evolution and creep mechanisms in Ni-based single crystal superalloys: a review [J]. *J. Alloys Compd.*, 2020, 819: 152954-1-17.
- [ 31 ] CHEN Q D, CHEN Y, ZHANG P X, *et al.* Crystal growth, spectra properties, and 2-μm laser performance of a novel "mixed" Tm<sup>3+</sup>-doped CaY<sub>0.65</sub>Gd<sub>0.35</sub>AlO<sub>4</sub> crystal [J]. *J. Alloys Compd.*, 2022, 928: 167174.
- [ 32 ] WU G D, YIN X Q, FAN M D, *et al.* Nd-doped structurally disordered YSr<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> single crystal: growth and laser performances [J]. *J. Rare Earths*, 2021, 39(12): 1540-1546.
- [ 33 ] 于浩海, 潘忠奔, 张怀金, 等. 无序激光晶体及其超快激光研究进展 [J]. 人工晶体学报, 2021, 50(4): 648-668.
- YU H H, PAN Z B, ZHANG H J, *et al.* Development of disordered laser crystals and their ultrafast lasers [J]. *J. Synth. Cryst.*, 2021, 50(4): 648-668. (in Chinese)
- [ 34 ] 宋振, 刘泉林. 正多面体中的晶体场劈裂 [J]. 发光学报, 2022, 43(9): 1428-1435.
- SONG Z, LIU Q L. Crystal-field splitting in regular polyhedron [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(9): 1428-1435. (in English)
- [ 35 ] ZHOU H Q, ZHU S Q, LI Z, *et al.* Investigation on 1.0 and 1.3 μm laser performance of Nd<sup>3+</sup>:GYAP crystal [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2019, 119: 105601-1-5.
- [ 36 ] WANG Y H, CHEN Q D, ZHANG P X, *et al.* Fabrication of Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> by an improved chemical reaction assisted vertical micro sublimation method and its saturable absorber performance [J]. *Opt. Mater. Express*, 2022, 12(4): 1337-1346.
- [ 37 ] HONG H, CHEN Q D, WANG Y H, *et al.* An effective 2D saturable absorber In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> to realize passively Q-switched laser output [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2022, 155: 108375.
- [ 38 ] BAI J T, CHEN G F. Continuous-wave diode-laser end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP high-power solid-state green laser [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2002, 34(4): 333-336.
- [ 39 ] ZHUANG F J, ZHENG Y Q, HUANG C H, *et al.* Efficient and compact intracavity-frequency-doubled YVO<sub>4</sub>/Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP laser through analysis of the interaction length [J]. *Opt. Commun.*, 2010, 283(17): 3324-3327.
- [ 40 ] PAVEL N, SAIKAWA J, TAIRA T. Diode end-pumped passively Q-switched Nd:YAG laser intra-cavity frequency doubled by LBO crystal [J]. *Opt. Commun.*, 2001, 195(1-4): 233-240.

[41] 谭慧瑜, 汪瑞, 张沛雄, 等. 钆镱共掺杂铝酸钇晶体的生长及性能研究 [J]. 人工晶体学报, 2021, 50(11): 2013-2018.

TAN H Y, WANG R, ZHANG P X, *et al.* Growth and properties of Gd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> co-doped yttrium aluminate crystals [J]. *J. Synth. Cryst.*, 2021, 50(11): 2013-2018. (in Chinese)



陈邱笛(2001-),男,江苏如东人,硕士研究生,2022年于暨南大学获得学士学位,主要从事激光与光电功能晶体材料的研究。

E-mail: Cqd596918045@163.com



张沛雄(1987-),男,广东潮州人,博士,教授,2016年于中国科学院上海光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事激光与光电功能晶体材料的研究。

E-mail: pxzhang@jnu.edu.cn