

文章编号: 1000-7032(XXXX)XX-0001-09

基于Nd:GSAG晶体1112 nm倍频的557 nm黄绿光激光器

李雪琪^{1,2,3}, 张雅馨^{1,2,3}, 卢思亮^{1,2,3}, 李善明^{4*},
张沛雄^{1,2,3*}, 杭 寅⁴, 陈振强^{1,2,3}

(1. 广东省晶体与激光工程技术研究中心, 广州 510632, 中国;
2. 广东省光纤传感与通信重点实验室, 广州 510630, 中国;
3. 广州暨南大学物理与光电工程学院, 广州 510632, 中国;
4. 中国科学院上海光学精密机械研究所激光晶体研究中心, 上海 201800, 中国)

摘要: 与传统Nd掺杂石榴石晶体相比,具有多种阳离子占位和局域晶体场差异的Nd掺杂石榴石晶体有利于Nd³⁺发射谱线的非均匀展宽,从而为1 μm波段长波长激光输出及后续可见光频率转换提供了基础。本文基于Nd:Gd₃Sc₂Al₃O₁₂(Nd:GSAG)晶体实现了1112 nm长波基频激光输出,并利用LBO晶体开展腔内倍频,获得了约557 nm的黄绿光激光输出。在未插入非线性晶体时,1112 nm基频激光的最大输出功率为1.501 W。引入满足I类相位匹配条件的LBO晶体后,获得最大功率为2.3 mW,主峰为557 nm的黄绿光输出。该结果验证了Nd掺杂晶体在1100 nm以上长波基频振荡及其直接倍频产生黄绿光方向的可行性。后续通过优化腔镜镀膜、降低非线性晶体插入损耗以及改善腔内模式匹配,有望进一步提升该波段黄绿光激光输出性能。

关 键 词: Nd晶体; LBO晶体; 1112 nm激光; 腔内倍频; 黄绿光激光器

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

DOI: 10.3724/CJL.20260235

CSTR: 32170.14.CJL.20260235

557 nm Yellow-Green Laser Based on Frequency Doubling of a 1112 nm Nd:GSAG Laser

LI Xueqi^{1,2,3}, ZHANG Yaxin^{1,2,3}, LU Siliang^{1,2,3}, LI Shanming^{4*}, ZHANG Peixiong^{1,2,3*},
HANG Yin⁴, CHEN Zhenqiang^{1,2,3}

(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. College of Physics & Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China;
4. Research Center of Laser Crystal, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

* Corresponding Authors, E-mail: pxzhang@jnu.edu.cn E-mail: lishanming@siom.ac.cn

Abstract: Compared with conventional Nd-doped garnet crystals, Nd-doped garnet crystals with multiple cation occupations and local crystal-field variations are favorable for the inhomogeneous broadening of Nd³⁺ emission spectra, thereby providing a basis for long-wavelength laser operation in the 1 μm region and subsequent visible frequency conversion. In this work, long-wavelength fundamental laser output at 1112 nm was realized based on an Nd:Gd₃Sc₂Al₃O₁₂ (Nd:GSAG) crystal, and yellow-green laser output at approximately 557 nm was obtained by intracavity frequency doubling with an LBO crystal. Without the nonlinear crystal inserted into the cavity, a maximum fundamental output power of 1.501 W at 1112 nm was achieved. After the Type-I phase-matched LBO crystal was introduced, a maximum yellow-green output power of 2.3 mW was obtained, with the dominant spectral peak located near 557 nm. These results verify the feasibility of long-wavelength fundamental oscillation above 1100 nm in Nd-

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家自然科学基金(62375106, 51972149, 51872307, 51702124);

Supported by National Natural Science Foundation of China(62375106, 51972149, 51872307, 51702124)

doped crystals and its direct frequency doubling for yellow-green laser generation. Further improvement of the yellow-green laser output performance in this spectral region is expected through optimization of cavity mirror coatings, reduction of insertion loss from the nonlinear crystal, and improvement of intracavity mode matching.

Keywords: Nd crystal; LBO crystal; 1112 nm laser; intracavity frequency doubling; yellow-green laser

1 引 言

LD泵浦技术、增益介质优化和非线性频率转换技术的发展,推动了Nd掺杂固体激光器在近红外及可见光领域的应用^[1-3]。近红外基频光可经二次谐波(Second Harmonic Generation, SHG)转换为可见光输出,从而获得绿光、黄绿光、蓝光等不同波段激光^[4-6]。其中, Nd³⁺离子具有较成熟的808 nm泵浦方案和较丰富的能级跃迁, $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ 跃迁可产生~1 μm 激光,是构建连续、脉冲及可调谐固体激光器的重要激活离子^[7-10]。目前, ~1.06 μm 基频光及其532 nm倍频绿光输出已得到较充分研究^[11-15],进一步拓展540-560 nm附近的黄绿光及1100 nm以上长波基频转换,可为丰富全固态可见光源提供更多选择。其中, ~557 nm黄绿光在部分生物荧光检测场景中可与特定荧光团的吸收带实现更高的光谱匹配,形成区别于常规绿光和更长波长黄光的应用优势。已有研究将561 nm黄绿光应用于共聚焦显微、流式细胞术等生物成像系统^[19]。C-藻红蛋白(C-phycoerythrin, C-PE)的吸收峰约位于564 nm^[17],因此从波长匹配角度看,黄绿光与其吸收峰的光谱重叠优于绿光,相较更长波长的黄光有利于PE标记物的有效激发。说明黄绿光并非仅是532 nm绿光的简单波长延伸,而在荧光标记检测和生物成像等领域中具有明确的波长选择性优势^[16-20]。

已报道的Nd掺杂晶体倍频可见光输出多集中于1060 nm附近,经LBO、KTP等非线性晶体二次谐波转换产生532 nm绿光,其中LiB₃O₅(LBO)具有宽透光范围、高损伤阈值和良好热稳定性,是Nd激光体系中常用的非线性晶体^[21-25]。但Nd³⁺在530 nm附近存在吸收带,532 nm绿光在部分介质中可能引入再吸收损耗与附加热效应,对输出产生不利影响^[26-29]。目前,540-560 nm黄绿光通常很少由常规基频光直接倍频获得,黄绿光的产生途径主要包括自拉曼激光倍频、Stokes光与基频光和频以及多波段耦合等,通常需要协同调控多个波段的相位匹配条件且腔内过程相对复杂。围绕

Nd掺杂晶体的绿光倍频输出, Meier等采用外部LBO倍频谐振腔,将1064 nm基频光转换为532 nm绿光^[11]。Cheng W等采用Nd:YAG晶体倍频实现了3.75 W的532 nm绿光输出^[29]。在540-560 nm附近黄绿光激光器多通过间接或复合变频方案获得:Y. T. Chang等利用复合Nd:YVO₄晶体实现自拉曼转换产生1176 nm第一Stokes光,并将1064 nm基频光与1176 nm Stokes光和频获得559 nm输出^[30]。Liu等利用Nd:YVO₄自拉曼体系实现黄-青-绿多色输出,其波长选择依赖基频、Stokes光及倍频/和频过程的协同调控^[26]。这些研究说明长波黄绿光在Nd掺杂固体激光中具有可行性,但也表明该波段输出往往依赖多物理过程耦合,对腔型、拉曼增益、偏振与多波段相位匹配提出较高要求。因此,若先建立1100 nm以上长波基频,再利用LBO在谐振腔内直接倍频,可在保持结构紧凑的同时将可见输出由532 nm拓展至黄绿光区域。但长波基频通常增益较低,黄绿光输出仍受腔内损耗、镀膜、相位匹配、模式重叠和热效应限制等因素限制^[30-31]。

GSAG是一种钇铝石榴石型激光晶体,具有较好的光学质量和热学稳定性, Gd³⁺、Sc³⁺和Al³⁺等多阳离子构型可形成局域晶场差异,为Nd³⁺长波端激光输出提供基础^[32-34]。这种由多阳离子构型引起的局域晶场差异,有利于增强发射谱线的非均匀展宽,为多波长运转、宽带调谐以及长波端激光输出提供材料基础^[35-37]。文献报道Nd:GSAG在808 nm附近具有1 nm吸收带宽和 $8.1 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 的吸收截面,在1060 nm的受激发射截面约为 $7.0 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$,在1111.6 nm的受激发射截面约为 $1.6 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$,荧光寿命约269.4 μs ^[9-10]。

本工作围绕2 at. % Nd:GSAG的长波基频振荡及可见光频率转换开展研究,建立了1112 nm基频激光输出,并通过LBO晶体腔内倍频实现了约557 nm黄绿光输出。相较于1064 nm倍频产生的532 nm绿光,该波长向长波方向移动,可在一定程度上避开Nd³⁺在约530 nm的吸收带^[38]。与复杂的黄绿光获得方式相比,本工作直接倍频路线

结构更简单,能够减少多级非线性过程引入的腔内损耗和调控难度。实验获得了最大功率为 1.501 W 的 1112 nm 基频光和最大功率为 2.3 mW 的黄绿光输出。同时,利用格兰-泰勒棱镜对连续波激光偏振态进行测量,结果表明高泵浦功率下晶体内部可能存在热致双折射效应。

2 实 验

Nd:GSAG 晶体激光实验装置如图 1 所示,谐振腔为 V 型折叠结构。实验以商用 808 nm 光纤耦合半导体激光器作为泵浦源,光纤芯径为 400 μm ,数值孔径为 0.22。泵浦光经两片曲率半径为 50 mm 的耦合透镜后,以 1:1 比例聚焦到晶体端面。增益介质采用 $3\times 3\times 7\text{ mm}^3$ 的未镀膜 Nd:GSAG 晶体,对泵浦光具有良好的吸收率,实测吸收率约为 96%。为降低热效应影响,晶体侧面包裹铝箔后固定于 17 $^{\circ}\text{C}$ 循环水冷的紫铜热沉中进行温度控制,以增强散热效果。

为抑制 1100 nm 以下非目标波段振荡并获得长波长基频输出,腔镜镀膜参数进行了选择性设计。平面输入镜 M1 在 808 nm 处高透 ($T>99.9\%$),在 1030-1230 nm 波段高反 ($R>99.9\%$)。平面输出镜 M2 对小于 1100 nm 的激光高透,对大于 1100 nm 的基频光透过率为 2%。转折镜 M3 为曲率半径 300 mm 的平凹镜,在 1030-1230 nm 波段高反,并在 530-620 nm 波段高透。

基于 ReZonator 仿真与 ABCD 矩阵计算,设定 Nd:GSAG 的热焦距大约为 96 mm。仿真得到 1112 nm 束腰位于平面镜 M1 附近,束腰半径约 98 μm 、瑞利长度约 27 mm。实验中 Nd:GSAG 置于 M1 后 8 mm,晶体内的腔模半径约为 100 μm ,因此晶体位于束腰近场,可使振荡光集中于主要泵浦增益区。长臂束腰位于 M2 附近,从仿真结果可知约 260 μm ,因此 LBO 尽量靠近 M2 放置。

在倍频实验中,反射镜 M4 对 530-620 nm 波段的黄绿光具有高反射率,对 1030-1230 nm 的基频光具有高透过率,用于实现倍频光的分离与输出。非线性晶体选用尺寸为 $3\times 3\times 20\text{ mm}^3$ 的 LBO 晶体,根据相位匹配计算确定其切割角为 $\theta=90^{\circ}$ 、 $\varphi=8.8^{\circ}$,满足 I 类相位匹配条件。为保证实验过程中晶体温度稳定,LBO 晶体同样采用铝箔包覆,并固定于铜制水冷座内,工作温度维持在约 17.5 $^{\circ}\text{C}$ 。实验中 M1 与 M3 间距约为 210 mm, M3 与 M2 间距约为 480 mm,总腔长约 690 mm。

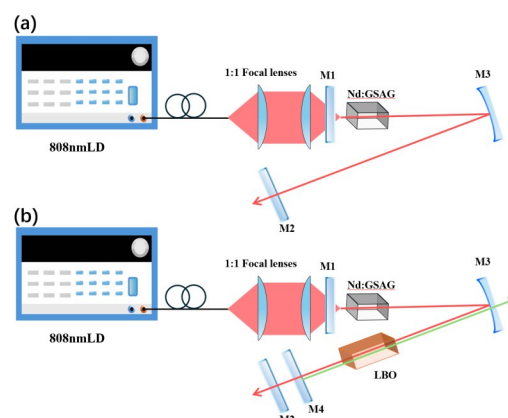


图 1 Nd:GSAG 激光器实验装置示意图。(a)基频光结构; (b)腔内倍频结构。

Fig. 1 Schematic of the experimental setup of the Nd:GSAG laser. (a) fundamental-wave configuration; (b) intracavity frequency-doubling configuration.

3 结果与讨论

3.1 Nd:GSAG 晶体基频波段特性

为获得用于黄绿光倍频的长波长基频激光,实验采用选择性镀膜输出镜抑制短波段振荡,使谐振腔优先在 1100 nm 以上波段建立激光振荡。当输出镜透过率为 $T=2\%$ 时,激光器在吸收泵浦功率为 2.369 W 时达到阈值,对应输出功率为 16 mW。随着吸收泵浦功率增加,输出功率整体呈上升趋势,最大基频输出功率达到 1.501 W,斜率效率为 41.07%,结果如图 2 所示。图 2 中,1112 nm 输出在 4-6 W 吸收泵浦区间出现局部斜率效率下降,而非持续功率饱和。随着热负载增加,热透镜增强导致腔模尺寸及泵浦光-振荡光重叠发生变化。同时,长波端增益较低及邻近波长间的模式竞争引起功率重新分配。高泵浦功率端输出功率重新上升表明,更高增益可能补偿部分热致损耗,并使模式竞争和空间匹配重新调整。

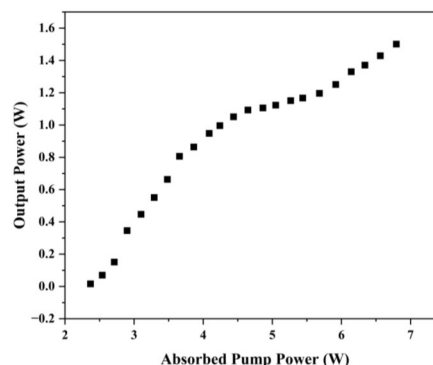


图 2 Nd:GSAG 激光器基频波段输出功率。

Fig. 2 Output power of the fundamental Nd:GSAG laser.

采用光谱仪(YOKOGAWA,AQ6374)测量,光谱如图3所示,基频激光中心位于1112 nm附近,半高宽约为5.19 nm,表现出相对较宽的谱线特征。这与Nd:GSAG晶体中局域晶场差异引起一定的非均匀展宽有关,也说明该晶体在长波端仍具有可利用的增益。

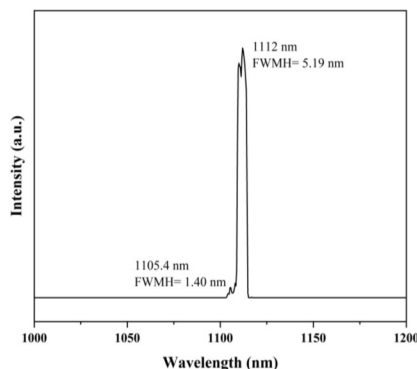


图3 Nd:GSAG激光器基频波段激光光谱。

Fig. 3 Spectrum of the fundamental Nd:GSAG laser.

相较于常规主增益波段,1112 nm位于发射谱长波段,受激发射截面较小,因此激光阈值相对较高、输出效率较低。但通过腔镜镀膜选择性抑制竞争振荡后,仍可获得瓦级长波基频输出,说明Nd:GSAG晶体具备直接产生557 nm附近黄绿光所需基频光的能力。该结果为后续LBO腔内倍频提供了必要的功率基础,也证明了该晶体在长波基频选择和特定可见光波段拓展方面的应用潜力。

3.2 1112 nm激光器的偏振特性

为分析基频光的偏振状态及其对后续倍频过程的影响,采用格兰-泰勒棱镜对1112 nm激光的偏振态进行测量。旋转棱镜,每10°记录一次功率值,得到图4所示图像。结果表明,输出激光整体表现出较为稳定的偏振取向,但仍存在一定程度的偏振起伏与分量变化。Nd:GSAG属于立方石榴石结构晶体,在理想情况下具有较强各向同性,不存在明显本征双折射。

图4中曲线的不规则变化主要与Nd:GSAG晶体内部的光学不均匀、热应力双折射及基频宽谱有关。晶体生长过程中形成的局部晶格应变会造成折射率和增益分布不均。端面泵浦产生的非均匀温度场通过热应力和光弹效应,使不同区域及偏振方向的折射率、相位延迟和损耗发生变化,导致偏振分量重新分配。此外,约5.19 nm的基频谱宽表明输出包含多个纵模或邻近谱分量,不同

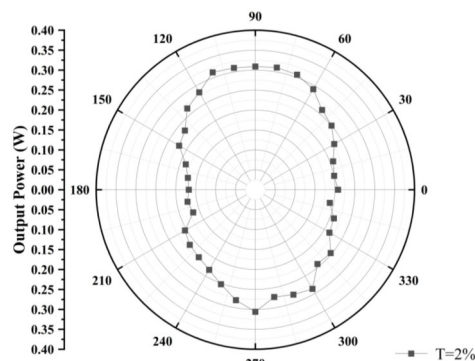


图4 基频1112 nm激光偏振特性。

Fig. 4 Polarization characteristics of the fundamental 1112 nm laser.

模式偏振态的叠加进一步造成输出功率随检偏角度呈现不规则变化。

这一偏振特性对后续倍频效率有一定的影响。LBO晶体采用I类相位匹配方式,其过程可表示为 $o(\omega)+o(\omega)\rightarrow e(2\omega)$,即参与非线性作用的两个基频光子具有相同偏振态,而产生的倍频光具有与基频光不同的偏振态。该偏振关系利用LBO晶体的双折射特性补偿基频光与倍频光之间的色散差异,从而满足相位匹配条件。因此,若基频光中存在热致退偏或偏振分量波动,则真正满足相位匹配条件的有效腔内基频功率会降低,从而限制黄绿光输出。由此可见,瓦级长波基频输出为倍频提供了功率基础,而偏振稳定性对倍频效率有一定影响。后续可通过优化晶体散热、减小热梯度或引入偏振选择元件,提高基频光偏振纯度,为提升倍频效率提供进一步空间。

3.3 倍频黄绿光激光器特性

在获得1112 nm附近基频激光输出后,经过SNLO软件对实验所用的LBO晶体的切割角进行计算,设置温度为17.5℃时得到仿真结果: $\theta=90^\circ$ 、 $\varphi=8.8^\circ$ 。为减少转折镜M3处泄露基频光及杂散光对测试结果的影响,采用微瓦计在远离M3的位置对黄绿光功率进行测量。图5给出了倍频光输出功率随吸收泵浦功率的变化关系。随着吸收泵浦功率增加,黄绿光呈近似线性上升趋势。当吸收泵浦功率为6.339 W时,获得最大倍频光输出功率2.3 mW,斜率效率为0.05%。图5中黄绿光功率的局部起伏主要源于腔内基频功率、偏振状态及LBO相位匹配条件的微小变化。由于倍频功率近似与有效基频功率的平方成正比且倍频功率较低,这些微小波动会在毫瓦级倍频输出

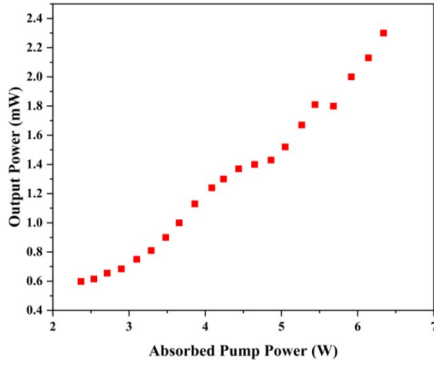


图5 黄绿光激光输出功率。

Fig. 5 Output power of the yellow-green laser.

中被进一步放大。在各自最大输出工作点,计算出 1112 nm 基频光的光-光转换效率约为 22.1%,黄绿光的总光-光转换效率约为 0.0363%。若以未插入 LBO 时的最大基频输出功率为参照,按照公式:

$$\eta_{\text{app}} = \frac{P_{2\omega}}{P_{\omega, \text{ref}}} \times 100\% \quad (1)$$

估算得出的表观倍频转换比约为 0.153%,该比值只是量级上的比较,不能等同于 LBO 晶体内部的实际倍频效率。

倍频光谱如图 6 所示,在 554.2 nm、557 nm 和 558.4 nm 处呈现三个峰值,主峰位于 557 nm 附近。图 3 中 1112 nm 为半高宽 5.19 nm 宽谱基频中心,并非单一振荡波长,557 nm 对应 1114 nm,该分量位于基频有效谱带内。宽谱倍频的输出谱由基频谱强度与 LBO 相位匹配共同决定,晶体色散、有限光谱接受带宽及角度、温度条件对各谱分量进行选择筛选,会使不同基频分量获得不同的转换效率,故主峰不位于 556 nm,并形成多峰^[41-42]。经选模和稳定化后,三波长输出可扩展光谱采样范围,有望为多谱线光谱检测和气体识别提供光源基础^[43]。由于基频光本身具有一定谱宽,倍频光也呈现出相应的光谱展宽,而非单一窄线宽输出。

根据二次谐波理论,倍频光强可表示为:

$$I_{2\omega} = \frac{2\omega^2 d_{\text{eff}}^2 L^2}{\epsilon_0 c^3 n_{2\omega} n_{\omega}^2} I_{\omega}^2 \text{sinc}^2\left(\frac{\Delta k L}{2}\right) \quad (2)$$

其中, $I_{2\omega}$ 和 I_{ω} 分别为倍频光强和基频光强, d_{eff} 为有效非线性系数, L 为非线性晶体长度, Δk 为波矢失配量。由上式可知,二次谐波强度与基频光强的平方成正比,并受到相位匹配因子 $\text{sinc}^2(\Delta k L/2)$ 的控制。进一步定义转换效率为:

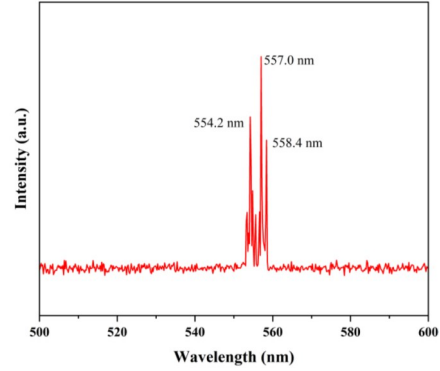


图6 黄绿光激光光谱。

Fig. 6 Spectrum of the yellow-green laser.

$$\eta_{2\omega} = \frac{I_{2\omega}}{I_{\omega}} = \frac{2\omega^2 d_{\text{eff}}^2 L^2}{\epsilon_0 c^3 n_{2\omega} n_{\omega}^2} I_{\omega} \text{sinc}^2\left(\frac{\Delta k L}{2}\right) \quad (3)$$

式(3)表明,在晶体参数和相位匹配条件一定的情况下,倍频效率取决于有效基频功率密度及其与非线性晶体的空间、光谱和偏振重叠。因此,腔内基频功率密度的任何下降都会被直接反映到倍频效率中。实验中虽然获得了稳定的 557 nm 黄绿光输出,但整体转换效率仍偏低,说明真正参与 I 类相位匹配的有效基频光强有限。

二次谐波功率影响因素可概括表示为:

$$P_{2\omega} \propto d_{\text{eff}}^2 P_{\omega, \text{cav}}^2 h(\xi|B) \text{sinc}^2\left(\frac{\Delta k L}{2}\right) \quad (4)$$

式(4)中, $P_{\omega, \text{cav}}$ 为 LBO 中的腔内基频功率, $h(\xi|B)$ 反映聚焦和双折射走离的影响^[44]。本文较低的黄绿光输出首先与 1112 nm 位于 Nd:GSAG 发射谱低增益长波段有关。同时,基频光半高宽约为 5.19 nm,总功率分散于多个纵模和邻近波长分量,只有部分谱分量能够落入 LBO 的有效相位匹配范围。M2 在 1112 nm 处具有 2% 的透射率,该设计用于抑制短波竞争振荡和表征基频性能,但在倍频状态下会形成固定的基频输出耦合,与非线性转换竞争腔内循环功率。未镀膜 Nd:GSAG 和 LBO 端面及其他腔内元件引入的反射、散射和插入损耗,也会进一步降低实际到达 LBO 的基频功率。如图 4 所示,基频光偏振纯度不足会降低实际非线性转换所利用的有效腔内功率。由于倍频功率与腔内有效基频功率平方近似成正比,上述线性损耗会在黄绿光输出中产生更显著的影响。此外,理论上应使 LBO 尽量接近腔内聚焦区域,以获得较高的基频功率密度。然而,受 LBO 水冷座尺寸、M4 分光镜、黄绿光提取方向以及机械安装和调节空间限制,实验中

LBO无法与理论聚焦位置充分接近,其实际光斑尺寸和空间模式匹配条件尚未达到最佳状态。过度靠近聚焦点还可能使晶体端面功率密度升高、角度调节容差减小并增强热敏感性,因此实际布置还需在转换效率、稳定性和机械可实现性之间进行平衡。因此,当前低倍频效率是1112 nm长波端增益较弱、M2基频输出耦合、宽谱与LBO相位匹配范围不完全重合、偏振纯度不足、腔内附加损耗以及LBO聚焦位置受实验结构限制等因素共同作用的结果,而不能归因于单一损耗机制。因测试仪器条件所限,本文未对光束质量因子及输出稳定性做定量测量,这部分工作有待后续补充。本实验更适合作为长波基频直接腔内倍频的可行性验证,后续应重点围绕上述问题进行优化。

为进一步比较557 nm附近不同黄绿光产生方案的输出特性,表1列出了Raman结合和频

(SFG)、倍频(SHG)方案的实验结果。已有Raman方案在输出功率和转换效率方面具有明显优势,并可实现多波长输出,但通常需要同时建立基频光和Stokes光,并进一步进行倍频或和频,对腔内多波段调控及相位匹配要求较高。长波基频直接倍频则减少了中间频率转换过程。本工作利用Nd:GSAG晶体直接产生1112 nm基频光,并通过单块LBO实现约557 nm输出,频率转换路径较为直接,所需中间波长转换环节和非线性元件较少,因此在后续腔型优化和元件集成后具有进一步缩短光路、减小系统空间占用的潜力。当前输出功率和转换效率仍较低,主要受1112 nm长波端增益较弱、腔内损耗、偏振和相位匹配条件尚未充分优化等因素限制。因此,本工作的主要意义在于验证Nd:GSAG长波发射端直接倍频产生557 nm附近黄绿光的可行性,并为后续进行功率和效率优化提供实验基础。

表1 557 nm附近不同全固态黄绿光方案的比较

Tab. 1 Comparison of different all-solid-state yellow-green laser schemes around 557 nm

增益介质/非线性晶体	实验方法	运转方式	入射泵浦 功率/W	黄绿光 功率/W	黄绿光 波长/nm	光-光转换 效率	Ref.
Nd:YVO ₄ /LBO	自拉曼+SHG/ SFG	CW	30	2.4	559	8%	[26]
Nd:YVO ₄ 复合晶体/BBO	自拉曼+SFG	Q开关	17.5	1.67	559	9.5%	[30]
YVO ₄ /Nd:YVO ₄ /YVO ₄ 复合晶体/LBO	自拉曼+SFG	Q开关	32	3.55	559	11%	[39]
Nd:YVO ₄ -KGW/LBO	SRS+SHG/SFG	CW	40	9.8	559.1	24.5%	[40]
Nd:GSAG/LBO	SHG	CW	6.6	0.0023	557	0.0348%	This work

4 结 论

本工作以2 at. % Nd:GSAG晶体为增益介质,实现了1112 nm长波基频振荡及其LBO腔内倍频。在吸收泵浦功率为6.795 W时,基频光最大输出功率为1.501 W,斜率效率为41.07%;插入LBO晶体后,在吸收泵浦功率为6.339 W时获得总功率2.3 mW的黄绿光输出,斜率效率为0.05%,光谱覆盖554.2-558.4 nm,主峰位于557 nm附近。实验结果验证了Nd:GSAG长波基频直接倍频产生黄绿光的可行性。当前输出性能主要

受长波端增益较低、基频光谱较宽、腔内附加损耗、偏振纯度以及聚焦和相位匹配条件限制。后续可通过优化晶体与腔镜镀膜、加强波长和偏振选择,并调整LBO晶体位置及腔内光斑尺寸,提高有效基频功率密度和倍频效率。该工作拓展了Nd:GSAG晶体在可见光频率转换方面的输出波段,为紧凑型黄绿光源的构建提供了实验依据。随着功率、线宽和稳定性的进一步改善,其可为生物医学仪器中的生物荧光激发、共聚焦成像和流式检测提供光源选择,并且为多基色激光显示系统中的黄绿光通道提供技术参考。

参 考 文 献:

- [1] Zou J, Zhou L, Zheng W, *et al.* An in-band diode-end-pumped high-power and high-efficiency ultrashort pulse Nd:YVO₄ bulk laser mode-locked by a frequency doubling LBO crystal[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2021, 116: 103759.

- [2] Zhang T, Zheng W, Feng K, *et al.* Towards power scaling of simple CW ultraviolet via Pr: LiYF₄-LBO laser at 320 nm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2022, 34(2): 129-132.
- [3] 彭张良, 孙贵华, 张庆礼, 等. 被动调 Q 掺 Nd³⁺ 固体激光器的研究进展[J]. 人工晶体学报, 2026, 55(1): 1-12.
PENG Z L, SUN G H, ZHANG Q L, *et al.* Research progress on passive Q-switched Nd³⁺-doped solid-state laser[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2026, 55(1): 1-12.
- [4] Chen C, Wu Y, Jiang A, *et al.* New nonlinear-optical crystal: LiB₃O₅[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1989, 6(4): 616-621.
- [5] Maker P D, Terhune R W, Nisenoff M, *et al.* Effects of dispersion and focusing on the production of optical harmonics [J]. *Physical Review Letters*, 1962, 8(1): 21.
- [6] Dmitriev V G, Gurzadyan G G, Nikogosyan D N. *Handbook of nonlinear optical crystals*[M]. Springer, 2013.
- [7] Chen L, Wang Z, Zhuang S, *et al.* Dual-wavelength Nd: YAG crystal laser at 1074 and 1112 nm[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(13): 2554-2556.
- [8] Su J, Liu B, Xu L H, *et al.* Effective segregation during Czochralski growth and spectral properties of Nd³⁺ in GSAG crystal[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, 512(1): 230-234.
- [9] Huang C, Lin W F, Fang Q, *et al.* Spectroscopic properties and discrete multi-wavelength tuning lasers of Nd: GSAG [J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 164: 109484.
- [10] Wen S, Su X, Wang Y, *et al.* Dual-wavelength controllable Q-switched Nd: GSAG laser with molybdenum disulfide saturable absorber[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2022, 120: 103970.
- [11] Meier T, Willke B, Danzmann K. Continuous-wave single-frequency 532 nm laser source emitting 130 W into the fundamental transversal mode[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(22): 3742-3744.
- [12] Guo Y, Su J, Lu H. Optimization of the nonlinear crystal length for high-power single-frequency intracavity frequency-doubling lasers[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(26): 7565-7570.
- [13] 陈邱笛, 郑为比, 张沛雄, 等. 基于新型 Nd: Gd_{0.1}Y_{0.9}AlO₃ 晶体的 540 nm 倍频绿光激光器[J]. 发光学报, 2023, 44(8): 1463-1470.
CHEN Q D, ZHENG W B, ZHANG P X, *et al.* 540 nm frequency-doubled green laser realized by a novel Nd: Gd_{0.1}Y_{0.9}AlO₃ crystal[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2023, 44(8): 1463-1470.
- [14] Zhang B, Xu C. Compact, and efficient continues wave intra-cavity frequency doubling Nd: YVO₄/MgO: PPLN 542/543 nm green lasers[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 122: 105885.
- [15] 沈建平, 张峰博, 丁侠, 等. 一种基于无波长选择器的 Nd: YLF/Nd: YAG 复合腔内种子注入技术紧凑型 LED 泵浦三波长激光器[J]. 发光学报, 2026, 47(04): 672-679.
SHEN J P, ZHANG F B, DING Y, *et al.* A Compact LED-pumped tri-wavelength laser: intracavity seeding in a hybrid Nd: YLF/Nd: YAG cavity without wavelength selectors[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2026, 47(04): 672-679.
- [16] Cai Y, Ding J, Bai Z, *et al.* Recent progress in yellow laser: principles, status and perspectives[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 152: 108113.
- [17] Tan H T, Yusoff F M, Khaw Y S, *et al.* A review on a hidden gem: Phycoerythrin from blue-green algae[J]. *Marine Drugs*, 2022, 21(1): 28.
- [18] Adam M K, Weinstock B M, Kasi S K, *et al.* Patient comfort with yellow (577 nm) vs. green (532 nm) laser panretinal photocoagulation for proliferative diabetic retinopathy[J]. *Ophthalmology Retina*, 2018, 2(2): 91-95.
- [19] 伍秋林, 冯新凯, 陈怀熹, 等. 基于紧凑型 Nd: YAG/PPMgLN 模组的 561 nm 基模激光器[J]. 人工晶体学报, 2024, 53(9): 1512-1518.
WU L Q, FENG X K, CHEN H X, *et al.* A 561 nm fundamental mode laser based on a compact Nd: YAG/PPMgLN module[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2024, 53(9): 1512-1518.
- [20] Gao J, Zhang L, Sun H, *et al.* High-power continuous-wave yellow-green laser at 558 nm under in-band pumping[J]. *Optics Communications*, 2014, 319: 110-112.
- [21] 刘振, 张益嘉, 程合震, 等. 1064 nm 被动调 Q 皮秒激光器研究进展[J]. 发光学报, 2025, 46(06): 1109-1119.
LIU Z, ZHANG Y J, CHENG H Z, *et al.* Research progress on 1064 nm passively Q-switched picosecond lasers[J]. *Chi-*

- nese *Journal of Luminescence*, 2025, 46(06):1109-1119.
- [22] Lin W, Huang C, Li S, *et al.* Tunable laser operations on Nd-doped strontium and lanthanum aluminate crystals[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2024, 136:105066.
 - [23] Cho C Y, Wang X, Lin C I, *et al.* Design criteria for a wavelength-selectable laser by adjusting birefringence filter temperature for yellow-green adjustable output[J]. *Optics Express*, 2024, 32(18):31120-31129.
 - [24] Riedel R, Rothhardt J, Beil K, *et al.* Thermal properties of borate crystals for high power optical parametric chirped-pulse amplification[J]. *Optics Express*, 2014, 22(15):17607-17619.
 - [25] Hao H, Liang F, Fu Y, *et al.* Phonon engineering in Nd³⁺-doped garnet lasers: filling the yellow gap and boosting fluorochrome excitation[J]. *Advanced Photonics*, 2026, 8(3):036014-036014.
 - [26] Liu Y C, Chen C M, Hsiao J Q, *et al.* Compact efficient high-power triple-color Nd:YVO₄ yellow-lime-green self-Raman lasers[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(5):1144-1147.
 - [27] Yao W, Gao J, Zhang L, *et al.* Continuous-wave yellow-green laser at 0.56 μm based on frequency doubling of a diode-end-pumped ceramic Nd:YAG laser[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(18):5817-5821.
 - [28] Fan M, Wu G, Duan X, *et al.* Preparation and optical properties of Nd:Bi₂Ti₂O₇ laser crystal with disordered structure and attractive multiwavelength emission characteristics[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(39):46074-46084.
 - [29] Cheng W, Zhao S, Zhuo Z, *et al.* Modeling of laser-diode side-pumped continuous wave Nd:YAG/KTP green laser[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, 47(1):169-172.
 - [30] Chang Y T, Chang H L, Su K W, *et al.* High-efficiency Q-switched dual-wavelength emission at 1176 and 559 nm with intracavity Raman and sum-frequency generation[J]. *Optics Express*, 2009, 17(14):11892-11897.
 - [31] Zheng Y H, Wang Y J, Peng K C. A high-power single-frequency 540 nm laser obtained by intracavity frequency doubling of an Nd:YAP laser[J]. *Chinese Physics Letters*, 2012, 29(4):044208.
 - [32] Ding S, Ren H, Zou Y, *et al.* Single crystal growth and property investigation of Dy³⁺ and Tb³⁺ co-doped Gd₃Sc₂Al₃O₁₂ (GSAG): multiple applications for GaN blue LD pumped all-solid-state yellow lasers and UV or blue light chip excited solid-state lighting[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2021, 9(30):9532-9538.
 - [33] Kallmeyer F, Dziedzina M, Wang X, *et al.* Nd:GSAG-pulsed laser operation at 943 nm and crystal growth[J]. *Applied Physics B*, 2007, 89(2):305-310.
 - [34] Shannon R D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides[J]. *Foundations of Crystallography*, 1976, 32(5):751-767.
 - [35] Zhang Y, Li J, Hu Y, *et al.* Temperature tunable lasers with disordered Nd:ABC₃O₇ crystals[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 125:106018.
 - [36] Chen H, Zhang P, Song J, *et al.* Spectral broadening of a mixed Nd:CYGA crystal with tunable laser operation beyond 1100 nm[J]. *Optics Express*, 2022, 30(12):21943-21951.
 - [37] Lin W, Huang C, Li S, *et al.* Efficient discrete tuning lasers of Nd:GYSAG crystal in 1 μm wavelength region[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2025, 145:105682.
 - [38] Zhuang F J, Zheng Y Q, Huang C H, *et al.* Efficient and compact intracavity-frequency-doubled YVO₄/Nd:YVO₄/KTP laser through analysis of the interaction length[J]. *Optics Communications*, 2010, 283(17):3324-3327.
 - [39] Du C, Guo Y, Yu Y, *et al.* High power Q-switched intracavity sum-frequency generation and self-Raman laser at 559 nm[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 47:43-46.
 - [40] Huang H J, Chang X W, Hsieh C L, *et al.* Compact efficient high-power continuous-wave Nd:YVO₄/KGW/LBO Raman lasers for selectable wavelengths within 559-603 nm[J]. *Optics Express*, 2024, 32(8):14133-14142.
 - [41] Regelskis K, Želudevičius J, Gavrilin N, *et al.* Efficient second-harmonic generation of a broadband radiation by control of the temperature distribution along a nonlinear crystal[J]. *Optics Express*, 2012, 20(27):28544-28556.
 - [42] Song S, Lin H Y, Shi W J, *et al.* Small yellow-green Nd:YAG/PPMgLN laser module at 561.3 nm[J]. *Optik*, 2021, 232:166557.
 - [43] Wang Z C, Yang F, Xie S Y, *et al.* Multiwavelength green-yellow laser based on a Nd:YAG laser with nonlinear frequen-

cy conversion in a LBO crystal[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(18):4196-4200.

- [44] Boyd G D, Kleinman D A. Parametric interaction of focused Gaussian light beams[J]. *Journal of Applied Physics*, 1968, 39(8):3597-3639.



李雪琪(2001-),女,广东东莞人,硕士研究生,2023年于东莞理工学院获得学士学位,主要从事激光与光电功能晶体材料的研究。

Email:lxqofficial@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。

Email:pxzhang@jnu.edu.cn



李善明(1992-),男,山东聊城人,博士,副研究员,2020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研究。

Email:lishanming@siom.ac.cn