

## 激光与光电子学进展

## 低热效应高光束质量自倍频黄光激光器

王敖阳<sup>1\*</sup>, 于祥升<sup>2\*\*</sup>, 元光<sup>1\*\*\*</sup><sup>1</sup>中国海洋大学信息科学与工程学部物理与光电工程学院, 山东 青岛 266100;<sup>2</sup>青岛镭创光电技术有限公司, 山东 青岛 266107

**摘要** 自倍频激光器的发展很大程度受到热效应的限制,为了减弱激光器热效应,获得更高光束质量的黄光激光输出,提出了 1020 nm 激光同带泵浦 Yb:YCOB 自倍频晶体的黄光激光器。通过理论分析,对比传统 976 nm 激光二极管泵浦方式,解释了自倍频晶体吸收泵浦光能量所产生的热透镜效应对光学倍频过程中相位匹配条件的影响,阐明了 1020 nm 同带泵浦方式光束质量提升的原因。并通过实验获得了更高光束质量的 570 nm 黄光激光输出,光束质量因子  $M_x^2=1.41$ ,  $M_y^2=1.87$ 。研究结果表明,1020 nm 波长泵浦方式下出射光束质量较传统 976 nm 泵浦方式有明显的提高,且谱宽更窄。该研究对于降低 Yb:YCOB 自倍频激光器热效应,获得光束质量较高、谱宽更窄的高功率黄光激光器具有指导作用。

**关键词** 激光器和激光光学; 自倍频; 固态激光器; 热效应

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223317

## Self-Frequency Doubling Yellow Laser with Low Thermal Effect and High Beam Quality

Wang Aoyang<sup>1\*</sup>, Yu Xiangsheng<sup>2\*\*</sup>, Yuan Guang<sup>1\*\*\*</sup><sup>1</sup>Department of Physical and Optoelectronic Engineering, Faculty of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China;<sup>2</sup>Qingdao Leichuang Optoelectronic Technology Co., Ltd., Qingdao 266107, Shandong, China

**Abstract** The development of self-frequency doubling lasers has been significantly limited owing to the thermal effect. To reduce the thermal effect of lasers and obtain higher beam quality yellow laser output, a Yb:YCOB self-frequency doubling crystal yellow laser pumped by a 1020-nm laser is proposed. The influence of the thermal lens effect, because of the self-frequency doubling crystal-absorbing pump light energy, on the phase matching condition during the process of optical frequency doubling is explained on the basis of a theoretical analysis. Furthermore, the analysis also yields an explanation for the improvement in the quality of the 1020-nm single-band pumping mode beam, as compared with that of the traditional 976-nm laser diode pumping mode. A 570-nm yellow laser with higher beam quality is obtained through experiments. The beam quality factors correspond to  $M_x^2=1.41$  and  $M_y^2=1.87$ . The results indicate that the quality of the outgoing beam at a wavelength of 1020 nm is significantly higher than that at 976 nm, and the spectrum width is narrower. The results of the study play a guiding role in reducing the thermal effect of Yb:YCOB self-frequency doubling lasers and obtaining high-power yellow lasers with higher beam quality and narrower spectrum width.

**Key words** laser and laser optics; self-frequency doubling; solid-state laser; thermal effects

## 1 引言

560~580 nm 波段的黄色激光因其在生物医学和生物技术中的应用潜力而备受关注<sup>[1-4]</sup>。这些光源具有更高的血红蛋白吸收特性,使神经感觉视网膜中的热量分散更少,并且对患者造成的不适更少。因此,该波段的激光在眼科中发挥着重要作用<sup>[5-7]</sup>。目前,由于

黄光波段量子阱较浅且张应力和拉应力较大,尚难直接获得黄光激光的激光二极管输出;随着蓝光半导体技术的发展,使用蓝光泵浦镱(Dy<sup>3+</sup>)离子掺杂晶体也可实现黄光输出,但受到该技术以及材料的限制,其输出功率较低,仍不能投入到实际应用<sup>[8]</sup>。除此之外,利用非线性技术中的倍频、和频及拉曼散射也是输出黄色激光的三种主要方式<sup>[9-10]</sup>,但这些技术方式在结构上

收稿日期: 2022-12-14; 修回日期: 2023-01-20; 录用日期: 2023-02-27; 网络首发日期: 2023-03-09

通信作者: \*way2021@stu.ouc.edu.cn; \*\*xsyu@lasence.com; \*\*\*yuanguang@ouc.edu.cn

需要两块不同功能的晶体,过程和构造设计较为复杂、成本高,并不适合小型化和大规模商业应用。而可以同时完成激光和光学倍频过程的自倍频晶体,具有结构紧凑、体积小、便于调整、稳定性强等其他途径不具备的优点,可满足现代高集成光电器件的需求。

掺 Yb 稀土钙氧硼酸盐晶体的化学式为  $\text{Yb:ReCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3(\text{Yb:ReCOB})$ , 其中的 Re 代表 Y (钇) 和镧系稀土元素 Gd、La。该类晶体具有化学性质稳定、抗损伤阈值高的特点,易于生长大尺寸高光学质量晶体。 $\text{Yb}^{3+}$  受镧系收缩作用影响<sup>[11]</sup>, 具有较小的离子半径,其 5s 和 5p 壳层对 4f 壳层电子屏蔽较小,因此该离子掺杂晶体的电子-声子耦合作用较强,因而产生晶格振动谱线加宽,获得超越荧光光谱的激光发射,并能基于倍频效应输出黄光。 $\text{Yb}^{3+}$  离子掺杂后,可实现 Yb:ReCOB 晶体高功率、高效自倍频黄光激光输出<sup>[12-13]</sup>。

输出高光束质量的固体激光器一直是固体激光技术研究的热点问题<sup>[14-16]</sup>, 随着半导体技术的逐渐成熟,激光二极管泵浦的固体激光器得到迅速发展,输出功率不断提高,这就不可避免地导致热效应对激光器性能的影响更加显著。976 nm 是 Yb:YCOB 晶体主要吸收峰之一,976 nm 激光二极管(LD)是 Yb:YCOB 晶体的常用泵浦源,因为晶体对该波长激光吸收系数较大,所以会在泵浦过程中产生大量的热,较强热效应使得激光光束质量下降。李瑞显等<sup>[17]</sup>曾开展过后向同带泵浦光纤激光器的研究,并获得了接近万瓦量级超大功率同时具有较高光束质量的激光输出。为了减轻激光器热效应,提高输出激光的光束质量,本文采用 1020 nm 激光泵浦 Yb:YCOB 晶体,获得了光束质量更高、谱宽更窄的 570 nm 黄光激光输出。

## 2 理论分析与实验

$\text{Yb}^{3+}(4f^{13})$  离子在具有较低对称性的晶体中吸收光谱有三条电子跃迁线,但由于强电子振荡、非等价格位和有序性, $\text{Yb}^{3+}$  在 YCOB 晶体中的光谱变得稍复杂。从图 1 中可以看出,Yb:YCOB 晶体存在  ${}^2F_{7/2} \rightarrow {}^2F_{5/2}$  的电子能级跃迁,并会弛豫振荡至距离较近的能级。因此 Yb:YCOB 晶体在 900 nm 和 976 nm 处共出现两个吸收峰<sup>[18]</sup>。因目前市场对 900 nm 波长激光的需求小,尚且缺少 900 nm 波长的 LD,所以现存 Yb:YCOB 晶体自倍频激光器都选择 976 nm 波长的 LD 作为泵浦源。

976 nm 是 Yb:YCOB 晶体吸收峰,泵浦光被晶体吸收的同时会产生大量的热,并且热量的分布不均匀,将会改变晶体内部各点的折射率。随之可能产生热应力使晶体发生不应有的热形变,并影响激光的输出功率、效率、光斑质量和稳定性等,输入泵浦光功率较大时甚至会导致晶体开裂。温升改变引起的自倍频晶体内部各方向折射率变化,不仅会影响晶体最佳相位匹配角,破坏晶体初始相位匹配条件,导致相位失配,还会影响倍频效率和倍频光的输出功率和稳定性<sup>[19]</sup>。非

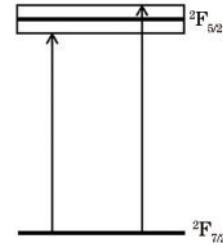


图 1  $\text{Yb}^{3+}$  离子电子能级跃迁示意图

Fig. 1 Schematic diagram of  $\text{Yb}^{3+}$ -ion electron energy level transition

线性晶体通光方向上局部温度升高破坏相位匹配条件的同时,也会改变基频光的偏振状态,进而影响输出黄光激光的品质。

图 2 为 Yb:YCOB 晶体的吸收光谱,如图所示,在 1020 nm 附近存在较弱小吸收峰,且吸收谱线在该波长处相比 976 nm 处变化更平缓。虽然 Yb:YCOB 晶体在 1020 nm 处吸收系数低于 976 nm 处,但较低的吸收系数意味着光能转化为热能更少,有效降低了晶体的热透镜效应和热致折射效应,对倍频过程中的相位匹配条件影响更小,可有效提高倍频效率。同时,1020 nm 激光相较于 976 nm LD 输出光不仅光束质量更佳,还能更好地与 1140 nm 基频光实现空间模式匹配。此外,在晶体产生激光的过程中,由于热透镜的存在,还导致模式尺寸和模式匹配效率的改变,从而影响了晶体作为谐振腔的有效工作。更低的热效应使得 1020 nm 同带泵浦情况下输出的 570 nm 倍频黄光光束质量得到提高。

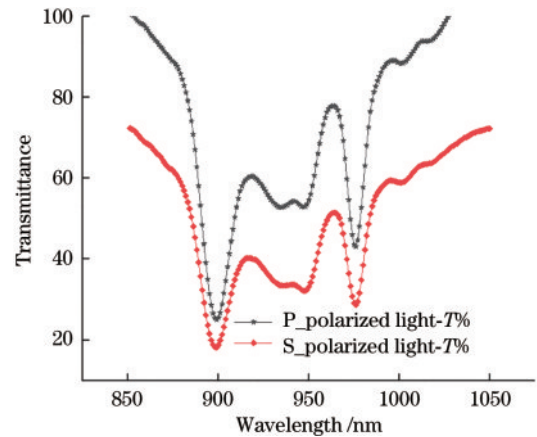


图 2 Yb:YCOB 晶体透过率光谱图

Fig. 2 Yb:YCOB crystal transmittance spectrum

泵浦光与基频光模式匹配效率可以表示为两者功率的比值,假定入射光和出射光均为高斯光束<sup>[20]</sup>,则模式匹配效率为

$$\kappa = \frac{16 \prod_{\alpha=x,y} \left[ \int_0^l \frac{1}{\omega_{\alpha}^2(z) + \omega_{\alpha,c}^2(z)} dz \right]^2}{\prod_{\alpha} \left[ \int_0^l \frac{1}{\omega_{\alpha}^2(z)} dz \right] \left[ \int_0^l \frac{1}{\omega_{\alpha,c}^2(z)} dz \right]}, \quad (1)$$

式中： $l$ 为谐振腔腔长； $z$ 为光束传播方向坐标。对于高斯光束， $\omega_a(z)$ 可以表示为

$$\omega_a^2(z) = \omega_{a0}^2 \left[ 1 + \left( \frac{z - z_0}{z_{a0}} \right)^2 \right], \quad (2)$$

$$z_{a0} = \pi \omega_{a0}^2 / \lambda, \quad (3)$$

式中： $\lambda$ 为入射光波长； $\omega_a(z)$ 和 $\omega_{a0}$ 分别为振幅 $1/e$ 处的光束半径和束腰位置 $z = z_a$ 处的光束半径； $\omega_{a,e}(z)$ 和 $\omega_{a,e0}$ 是腔本征模的对应两种光束半径，此处假定 $x$ 轴和 $y$ 轴上的本征模在同一位置处有束腰 $z = 0$ <sup>[21]</sup>：

$$\omega_{a,e}^2(z) = \omega_{a,e0}^2 \left[ 1 + \left( \frac{z}{z_{a,e0}} \right)^2 \right], \quad (4)$$

$$z_{a,e0} = \frac{\pi \omega_{a,e0}^2}{\lambda}. \quad (5)$$

为了量化热透镜效应对模式匹配的影响，分析并得到了两种泵浦方式的模式匹配效率与输入功率之间的关系，如图 3 所示。在 0~1 W 输入功率范围内，

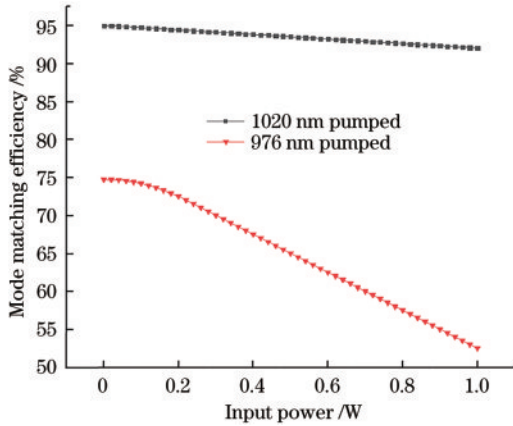


图 3 不同泵浦方式下模式匹配效率随输入功率的变化图  
Fig. 3 Mode matching efficiency versus input power under different pump modes

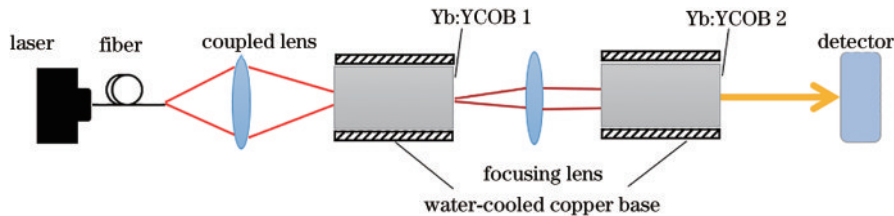


图 4 1020 nm 泵浦 Yb:YCOB 晶体黄光自倍频激光实验装置

Fig. 4 Experimental device of 1020 nm pumped Yb:YCOB crystal yellow laser self-frequency doubling laser

本文还设置了对比实验，采用传统方式的 976 nm LD 直接泵浦沿 570 nm 最佳倍频方向切割的 Yb:YCOB 自倍频晶体，实验结构如图 5 所示，使用同一 LD，光纤出光经耦合透镜耦合后直接入射进黄光 Yb:YCOB 自倍频晶体内部。以晶体前后表面作为谐振腔腔镜，黄光由晶体后端面出射后被探测器接收。同样使用 CCD 和光强衰减片探测光斑能量分布，使用光谱仪测量出射光中心波长，本实验所使用的光谱仪为安

976 nm 泵浦方式模式匹配效率从约 75.0% 下降到 52.6%；1020 nm 泵浦方式模式匹配效率从 95.0% 仅下降到 92.1%。因 976 nm LD 输出光的光束发散角较大，模体积与基频光模体积重合度小，导致其平均模式匹配效率较低，随着泵浦功率增大随之产生的热效应也使得模式匹配效率下降严重。1020 nm 激光发散角小，所以模式匹配效率较高，且在增大泵浦光功率的过程中模式匹配效率仅稍有降低。这足以证明 1020 nm 同带泵浦条件下泵浦光与基频光模式匹配效率更高，因此出射倍频黄光光束质量将会获得提升。

### 3 实验系统搭建

1020 nm 激光泵浦 Yb:YCOB 自倍频晶体实验系统结构如图 4 所示。泵浦源 LD 使用 976 nm 光纤耦合的半导体激光器，芯径为 100  $\mu\text{m}$ ，数值孔径为 0.22，最大输出功率为 30 W；光纤出光通过耦合系统将光束聚焦进 Yb:YCOB 自倍频晶体 1 内部，晶体 1 掺杂浓度为 15% (摩尔分数)，沿光学主轴 Y 轴方向切割，尺寸为 2 mm  $\times$  2 mm  $\times$  4 mm。晶体 1 仅作为激光晶体用于产生 1020 nm 激光，侧面包裹铜箔，夹持在紫铜散热底座上。晶体 1 两端面组成平-平激光腔。晶体 1 所出射的 1020 nm 激光再次作为泵浦光经透镜聚焦入射到 Yb:YCOB 自倍频晶体 2，晶体 2 掺杂浓度为 15% (摩尔分数)，沿 570 nm 黄光最佳倍频相位匹配方向 ( $\theta = 120.6^\circ$ ,  $\varphi = -38.7^\circ$ )<sup>[22]</sup>切割，晶体尺寸为 2 mm  $\times$  2 mm  $\times$  4 mm。通过晶体 2 上能级转换，先产生 1140 nm 基频光，然后 1140 nm 红外基频激光利用自倍频晶体自身的非线性倍频效应转换成 570 nm 倍频黄光激光。输出的黄光由晶体的后端面射出，被探测器接收，使用 CCD 和光强衰减片探测光斑能量分布，使用光谱仪测量出射光中心波长。

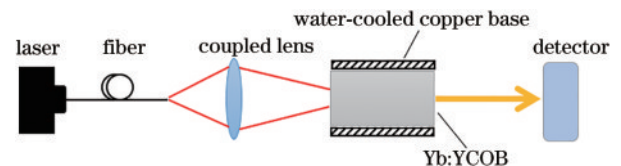


图 5 976 nm 泵浦 Yb:YCOB 晶体黄光自倍频激光实验装置  
Fig. 5 Experimental device of 976 nm pumped Yb:YCOB crystal yellow laser self-frequency doubling laser

立 AQ-6315A 光谱分析仪,分辨极限为 0.01 nm。

为保证实验条件相同,需要确保两种不同泵浦方式注入 Yb:YCOB 黄光自倍频晶体时功率相同,两种不同实验结构均在 Yb:YCOB 黄光自倍频晶体泵浦功率为 1 W 时进行。因此,进行如图 4 所示实验系统 1020 nm 激光泵浦实验时,需先测量 Yb:YCOB 自倍频晶体 1 出射的 1020 nm 激光功率,不断增加 LD 电流,直至 1020 nm 激光功率达到 1 W 时,再将 Yb:YCOB 自倍频晶体 2 加入实验系统中。

## 4 分析与讨论

用 CCD 相机搭配光强衰减片测量 Yb:YCOB 自倍频晶体 1 出射 1020 nm 激光泵浦 Yb:YCOB 自倍频晶体 2 时,所出射的自倍频黄光的光斑如图 6 所示。

然后用图 5 所示结构搭建实验系统,保持相同泵浦功率,增加电流至 976 nm LD 输出功率为 1 W 时,使用 CCD 相机和衰减片测量 976 nm LD 泵浦 Yb:

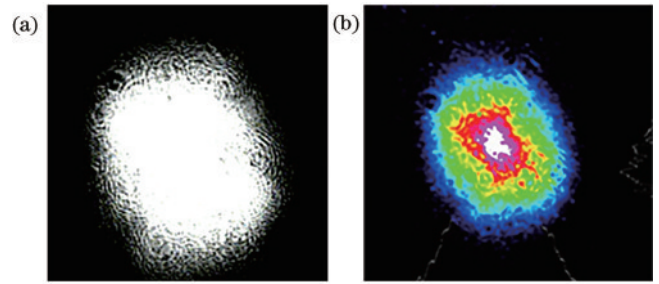


图 6 CCD 探测 1020 nm 激光泵浦 Yb:YCOB 自倍频晶体出射黄光光斑图。(a) 光斑形状;(b) 光斑分布

Fig. 6 CCD detection of yellow laser spot map emitted from 1020 nm laser pumped Yb:YCOB self-frequency doubling crystal. (a) Spot shape; (b) spot distribution

YCOB 黄光自倍频晶体所出射黄光的光斑;然后控制 976 nm LD 泵浦黄光输出功率与 1020 nm 激光泵浦黄光输出功率相同,使用 CCD 相机和衰减片测量出射黄光光斑如图 7 所示。

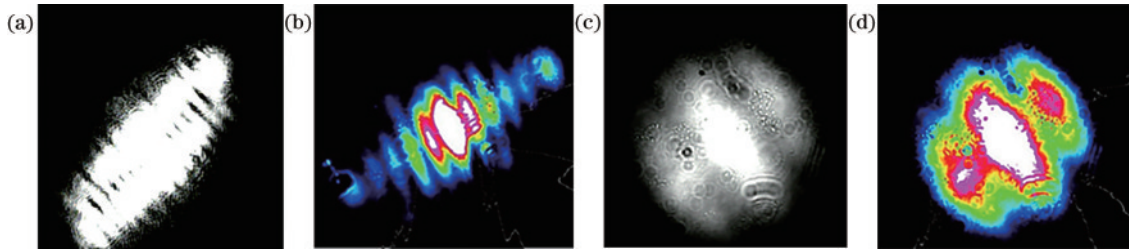


图 7 CCD 探测 976 nm 激光泵浦 Yb:YCOB 自倍频晶体出射黄光光斑图。(a) 输入功率与 976 nm LD 泵浦相同时的光斑形状;(b) 输入功率与 976 nm LD 泵浦相同时的光斑分布;(c) 输出功率与 976 nm LD 泵浦相同时的光斑形状;(d) 输出功率与 976 nm LD 泵浦相同时的光斑分布

Fig. 7 CCD detection of yellow laser spot map emitted from 976 nm laser pumped Yb:YCOB self-frequency doubling crystal. (a) Spot shape when input power is same as 976 nm LD pump; (b) spot distribution when input power is same as 976 nm LD pump; (c) spot shape when output power is same as 976 nm LD pump; (d) spot distribution when output power is same as 976 nm LD pump

通过对比图 6 和图 7 不难发现,1020 nm 激光泵浦 Yb:YCOB 黄光自倍频激光器所产生的 570 nm 黄光激光光束质量有明显提高,光束能量更集中,光斑沿各方向发散角差异更小,且光斑中无暗斑,光束为基模,无高阶模式,能量基本符合高斯分布。

用刀口法测量两种光斑的束腰半径、发散角并计算光束质量  $M^2$  因子。对测量数据使用双曲线模型进行非线性拟合,通过拟合即可得到模拟高斯光束束腰半径和远场发散角,并计算出光束质量  $M^2$  因子。最终计算所得 1020 nm 激光泵浦方式光束质量因子分别为:  $M_{x1}^2 = 1.41, M_{y1}^2 = 1.87$ ; 976 nm LD 泵浦与 1020 nm 泵浦输入功率相同时光束质量因子分别为:  $M_{x2}^2 = 2.89, M_{y2}^2 = 8.67$ ; 黄光输出功率相同时光束质量因子分别为:  $M_{x3}^2 = 2.53, M_{y3}^2 = 3.71$ 。由测量结果可知,本文所采用的 1020 nm 激光泵浦 Yb:YCOB 自倍频晶体所得黄光光斑光束质量因子明显高于传统 976 nm LD 泵浦方式,光束质量显著改善。

使用光谱仪测量所得黄光光谱,得到基频光和倍

频黄光光谱图如图 8、图 9 所示。1020 nm 泵浦方式所得黄光中心波长为 570.3 nm,  $\Delta\lambda = 1.73$  nm, 输出黄光为单纵模振荡; 976 nm LD 泵浦方式所得黄光中心波长为 570.6 nm,  $\Delta\lambda = 4.20$  nm, 输出黄光含有多个纵模。因为 1020 nm 激光泵浦条件下,晶体在该波长下吸收稍弱,内部温度梯度较小,所以输出波长谱宽较窄且只有单一纵模形成振荡输出;而 976 nm LD 泵浦方

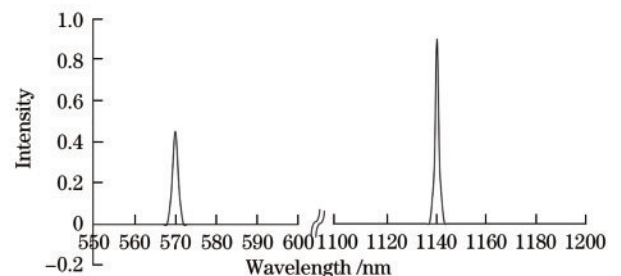


图 8 1020 nm 激光泵浦 Yb:YCOB 自倍频晶体黄光光谱图  
Fig. 8 Yellow laser spectrum of Yb:YCOB self-frequency doubling crystal pumped by 1020 nm laser

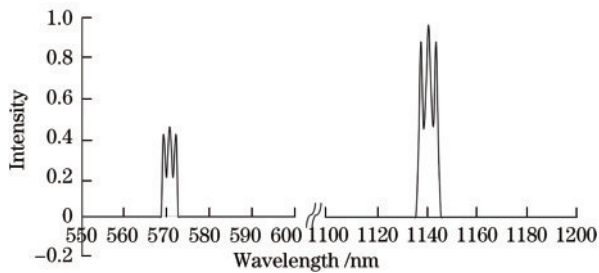


图9 976 nm LD泵浦Yb:YCOB自倍频晶体黄光光谱图  
Fig. 9 Yellow laser spectrum of Yb:YCOB self-frequency doubling crystal pumped by 976 nm LD

式下, Yb:YCOB 晶体对该波长吸收较强, 所以激光产生过程中伴随着更多的热量产生, 导致晶体内部沿泵浦光方向温度梯度较大, 产生多纵模振荡, 使光谱谱宽增大。且随泵浦源注入功率增加, 晶体内部温度升高, 波长逐渐向长波方向移动<sup>[23]</sup>, 由于晶体内部温度梯度较大, 因此除中心波长外, 还出现其他纵模振荡, 使激光谱宽变宽。

## 5 结 论

激光技术发展到今天, 热效应成为限制激光器输出高功率和高光束质量激光的主要瓶颈。非线性晶体吸收泵浦光的同时产生大量的热, 晶体温度升高破坏了相位匹配条件, 影响了输出激光的品质。本文给出了一种在产生激光过程中降低 Yb:YCOB 自倍频晶体热效应的有效方法, 并通过实验验证了本方法的可行性。实验结果证明, 本文所提出的 1020 nm 同带泵浦 Yb:YCOB 自倍频晶体黄光激光器输出黄光光束质量显著提升, 得出的结果具有一定的普适性。目前 1020 nm 波长的激光器技术已相当成熟, 因此本方法可以应用到广大 Yb:YCOB 自倍频晶体激光器的设计中。为获得低热效应、高光束质量和大功率 Yb:YCOB 黄光自倍频激光器提供了可靠途径。

但由于 Yb:YCOB 晶体在 1020 nm 处的吸收较弱, 不可避免地导致光光转化效率下降, 输出激光功率暂无明显提升。后期工作中可以通过光学镀膜方式提高光光转换效率, 或增加晶体掺杂浓度和长度提高黄光输出功率。由于 Yb:YCOB 晶体对 1020 nm 波长的光吸收较弱, 所以可实现在较低热效应的前提下, 使用较大功率泵浦源获得较高功率的高质量黄光输出。

## 参 考 文 献

[1] Moore N, Clarkson W A, Hanna D C, et al. Efficient operation of a diode-bar-pumped Nd:YAG laser on the low-gain 1123-nm line[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(27): 5761-5764.  
[2] Zhao L N, Su J, Hu X P, et al. Single-pass sum-frequency-generation of 589-nm yellow light based on dual-wavelength Nd:YAG laser with periodically-poled LiTaO<sub>3</sub> crystal[J]. *Optics Express*, 2010, 18(13): 13331-

13336.

[3] Lee A J, Pask H M, Dekker P, et al. High efficiency, multi-Watt CW yellow emission from an intracavity-doubled self-Raman laser using Nd:GdVO<sub>4</sub>[J]. *Optics Express*, 2008, 16(26): 21958-21963.  
[4] Zheng Q, Yao Y, Qu D P, et al. All-solid-state 556 nm yellow-green laser generated by frequency doubling of a diode-pumped Nd:YAG laser[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2009, 26(10): 1939-1943.  
[5] Jia F Q, Zheng Q, Xue Q H, et al. Yellow light generation by frequency doubling of a diode-pumped Nd:YAG laser[J]. *Optics Communications*, 2006, 259(1): 212-215.  
[6] Gao J, Dai X J, Zhang L, et al. All-solid-state continuous-wave yellow laser at 561 nm under in-band pumping[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2012, 30(1): 95-98.  
[7] Wang Z C, Peng Q J, Bo Y, et al. 60 W yellow laser at 561 nm by intracavity frequency doubling of a diode-pumped Q-switched Nd:YAG laser[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(3): 328-330.  
[8] Bowman S R, O'Connor S, Condon N J. Diode pumped yellow dysprosium lasers[J]. *Optics Express*, 2012, 20(12): 12906-12911.  
[9] Kantola E, Leinonen T, Ranta S N, et al. High-efficiency 20 W yellow VECSEL[J]. *Optics Express*, 2014, 22(6): 6372-6380.  
[10] Janousek J, Johansson S, Tidemand-Lichtenberg P, et al. Efficient all solid-state continuous-wave yellow-orange light source[J]. *Optics Express*, 2005, 13(4): 1188-1192.  
[11] Seitz M, Oliver A G, Raymond K N. The lanthanide contraction revisited[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2007, 129(36): 11153-11160.  
[12] Liang F, He C, Lu D Z, et al. Multiphonon-assisted lasing beyond the fluorescence spectrum[J]. *Nature Physics*, 2022, 18(11): 1312-1316.  
[13] 路大治, 房倩楠, 于浩海, 等. Yb:YCOB 黄光激光自倍频晶体[J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49(2): 246-249.  
Lu D Z, Fang Q N, Hao H Y, et al. Yb:YCOB self-frequency-doubled yellow laser crystal and device[J]. *Journal Of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 49(2): 246-249.  
[14] Wu H S, Li H B, An Y, et al. Transverse mode instability mitigation in a high-power confined-doped fiber amplifier with good beam quality through seed laser control[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2022, 10: e44.  
[15] Li Y L, Ding J, Bai Z X, et al. Diamond Raman laser: a promising high-beam-quality and low-thermal-effect laser [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2021, 9: e35.  
[16] Yang J F, Wang Z H, Song J J, et al. Diode-pumped 10 W femtosecond Yb:CALGO laser with high beam quality[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2021, 9: e33.  
[17] 李瑞显, 吴函烁, 肖虎, 等. 后向同带泵浦光纤激光实现大于 8 千瓦高光束质量输出[J]. *光学学报*, 2022, 42

- (14): 1436001.  
Li R X, Wu H S, Xiao H, et al. More than 8 kW fiber laser amplifier with high beam quality enabled by counter tandem pumping scheme[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(14): 1436001.
- [18] 张琮. Re:YCOB 系列晶体的生长及其性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2010: 68-69.  
Zhang C. Growth and properties of series Re: YCOB crystals[D]. Jinan: Shandong University, 2010: 68-69.
- [19] 王磊, 聂劲松, 叶庆, 等. 0.53  $\mu\text{m}$  全固态激光器热效应及其补偿技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(4): 0406003.  
Wang L, Nie J S, Ye Q, et al. Study on thermal effect and compensation technology of 0.53  $\mu\text{m}$  all-solid-state laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 0406003.
- [20] Yang W H, Wang Y J, Zheng Y H, et al. Comparative study of the frequency-doubling performance on ring and linear cavity at short wavelength region[J]. *Optics Express*, 2015, 23(15): 19624-19633.
- [21] Wang Y J, Yang W H, Li Z X, et al. Determination of blue-light-induced infrared absorption based on mode-matching efficiency in an optical parametric oscillator[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-7.
- [22] Fang Q N, Lu D Z, Yu H H, et al. Self-frequency-doubled vibronic yellow Yb: YCOB laser at the wavelength of 570 nm[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(5): 1002-1005.
- [23] 房倩楠. 掺镱硼酸钙氧钇晶体生长及其黄光自倍频激光性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.  
Fang Q N. Studies on growth and self-frequency-doubled yellow laser performance of Yb<sup>3+</sup> doped calcium yttrium oxoborate crystal[D]. Jinan: Shandong University, 2019.