文章编号:1002-2082(2008)06-0970-05

二极管侧面抽运Nd:YAG 4波长同时输出激光

李成荣[1],陈秀艳[2],李 修[2],陈浩伟[2],任兆玉[2,3],白晋涛[2,3]

(1. 陕西榆林学院 物理与电气工程系,陕西 榆林 719000;2. 西北大学 光子学与光子技术研究所暨陕西省光电子技术重点实验室,陕西 西安 710069;3. 陕西省高功率全固态激光器及应用工程技术研究中心,陕西 西安 710069)

摘 要:为了获得1 064 nm,1 319 nm,589 nm及660 nm 4波长激光同时输出,设计了双激光晶体同步声光调Q"T"型复合谐振腔。通过软件模拟与计算,筛选出理想的谐振腔参数,使2波长基频光在大泵浦电流范围内能稳定运转。以KTP晶体和LBO晶体为和频晶体和倍频晶体,在泵浦电流为17 A,重复频率为10 kHz时,获得了1 064 nm,1 319 nm,589 nm和660 nm 4波长激光输出,最高平均功率分别为150 mW,80 mW,2.3 W和1.7 W,同时测得589 nm激光和660 nm激光的脉冲宽度分别为110 ns和130 ns。结果表明:使用热稳"T"型复合腔,可以获得4波长激光同时稳定输出。

关键词:二极管侧面抽运固体激光器;4波长激光;内腔和频;内腔倍频;声光调Q

中图分类号:TN248.1 **文献标志码**:A

Realization of four-wavelength laser simultaneous output by LD side-pumped Nd:YAG

LI Cheng-rong[1], CHEN Xiu-yan[2], LI Xiu[2], CHEN Hao-wei[2], REN Zhao-yu[2,3], BAI Jin-tao[2,3]

(1. Physics and Electrical Engineering Department, Yulin University, Yulin 719000, China; 2. Institute of Photonics and Photo-technology, Provincial Key Laboratory of Photoelectronic Technology, Northwest University, Xi'an 710069, China; 3. Shaanxi Research Center for Solid State Lasers and Application Engineering Technology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: In order to obtain the four-wavelength laser of 1 064 nm, 1 319 nm, 589 nm and 660 nm simultaneously, two-rod "T"-shaped composite cavity was designed. By simulation and calculation, perfect resonator parameters were chosen to make two fundamental lasers operate stably in large range of pumping current. Taking KTP and LBO crystals as sum-frequency and SHG crystals respectively, when the pumping current is 17 A and the repetition rate is 10 kHz, the highest average power of 1 064 nm, 1 319 nm, 589 nm and 660 nm is 150 mW, 80 mW, 2.3 W and 1.7 W respectively, and the pulse widths of 589 nm and 660 nm laser are 110 ns and 130 ns. The result shows that the four-wavelength laser output could be simultaneously obtained by a thermo-stable "T"-shaped composite cavity.

Key words: diode side-pumped solid-state laser; four-wavelength laser; intracavity sum frequency; intracavity double frequency; acousto-optic Q-switched

收稿日期:2008-04-07; **修回日期**:2008-05-28

基金项目:国家火炬计划项目基金(2006GH041493)

作者简介:李成荣(1956—),男,陕西米脂人,副教授,主要从事物理教学与激光技术研究工作。E-mail:lcr1958@163.com。**通信作者**,白晋涛 E-mail:baijt@nwu.edu.cn

引言

由于高平均功率、宽调谐和二极管激光器(LD)泵浦等技术的重大突破,LD泵浦的全固态激光器技术已趋于成熟[1-3]。它将LD体积小、效率高的优点和固体激光器寿命长、光束质量高的优势结合起来,成为一种结构紧凑、效率高、寿命长、光束质量好的新型激光器件。近年来,随着工业及科研的需要,双波长及多波长激光器成为国际上一个较为热门的研究课题[4-5]。它广泛应用于干涉彩虹全息、精细激光光谱、差分吸收激光雷达、原子和分子的多光子分步电离、非线性频率变换、激光医学,激光显示等领域[6]。虽然气体激光器较易获得双波长激光输出,但相比较而言,全固态多波长激光器具有结构紧凑、小型化,可以提供大的输出能量等特点。

早在20世纪90年代初,H. Y. Shen[7]等人就提出了双波长同时振荡的阈值平衡条件,并且比较了几种掺Nd^{3+}的激光晶体在灯泵浦下产生连续和准连续双波长振荡的可能性。此后,随着新型激光材料的出现及激光技术的进步,多波长激光的产生方式也呈现出多样化趋势。2000年,美国科研人员[8]采用光参量振荡与倍频技术相结合实现了红绿蓝(RGB)3波长可见光同时输出。2003年,何京良[9]等人利用LD泵浦Nd:YVO_4产生1 064 nm和1 342 nm双波长输出,然后使该双波长激光通过一块非周期光学超晶格,先后实现了红、黄、绿三色连续激光同时输出和红、黄、绿、蓝4色准连续激光同时输出。2005年,中科院长春光机所也报道了1 342 nm波长基频光通过周期极化的钽酸锂(PPLT)倍频与和频得到750 mW 671 nm红光和128 mW 447 nm蓝光输出[10],2006年,利用腔内混频技术实现了白光激光输出[11]。

本文采用双Nd:YAG晶体"T"型复合热稳腔结构,并与非线性频率变换技术(倍频、和频)和同步声光调Q技术相结合,在泵浦电流均为17 A,重复频率均为10 kHz时,获得了1 064 nm,1 319 nm,589 nm和660 nm 4波长激光同时输出。

1　"T"型复合热稳谐振腔的设计

在固体激光器工作过程中,激光晶体的热透镜效应仍然是制约其输出功率提高的一个主要因素。随着泵浦功率的变化,其热焦距值可以从无穷大到十几厘米范围内变化,严重影响了激光系统的稳定运转范围及其性能。当整个激光系统运转在稳定区时,随着泵浦能量的提高,激光输出功率也逐步增加,当其运转在非稳区时,输出功率会随着泵浦功率的增大反而降低。因此,在较宽的泵浦能量范围内设计热不灵敏腔是提高激光输出功率的首要条件。

本文的实验装置如图1所示。在一级近似下,Nd:YAG棒的热透镜效应可以等效为一个焦距为f的厚透镜,厚透镜的主平面到棒端面的距离为$h=l/2n$(l为激光晶体的长度,n为折射率)[12],如图2所示。M_1和M_3镜组成1 064 nm基频光谐振腔,M_2,M_4和M_3镜构成1 319 nm基频光谐振腔。

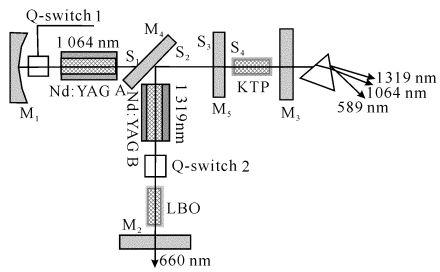

图1　4波长激光同时运转实验装置图

Fig. 1　Experiment set-up of four-wavelength laser simultaneous output

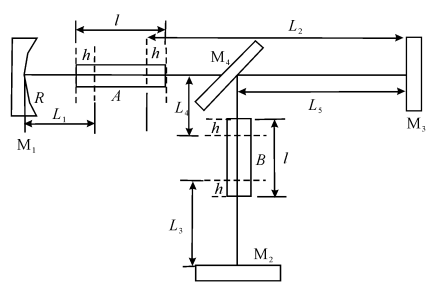

图2　谐振腔的热透镜等效图

Fig. 2　Equivalent diagram for thermal lens of resonate cavity

设2激光晶体热焦距分别为f_1和f_2,据此分别以M_1和M_2镜为参考面,则2谐振腔内的往返矩阵分别为

$$\begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix}\times \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix}\times$$

$$\begin{bmatrix}1 & L_4+L_5\\0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & L_4+L_5\\0 & 1\end{bmatrix}\times$$

$$\begin{bmatrix}1 & 0\\-1/f & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & L_3\\0 & 1\end{bmatrix} \tag{2}$$

谐振腔的稳定性条件为

$$|(A_i+D_i)/2|\leqslant 1 \quad (i=1,2) \tag{3}$$

即只有2个基频光谐振腔的往返矩阵都满足稳定性条件时,整个激光系统才能处于稳定状态。根据上述分析,使用计算机软件进行计算,优化各谐振腔参数,当$L_1=7.1$ cm,$L_2=6.8$ cm,$L_3=7.1$ cm,$L_4+L_5=9.8$ cm,$R=1$ m时,所设计出的激光系统允许激光晶体的热焦距变化范围从10 cm到100 cm,如图3所示。这说明该激光系统完全可以适用于大功率泵浦。

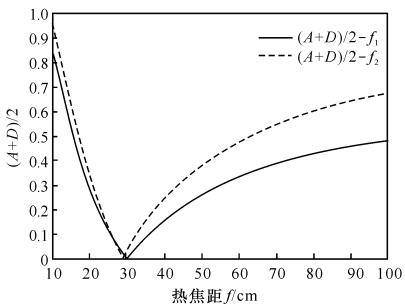

图3 热焦距与谐振腔的稳定性关系

Fig. 3 Thermal focal length versus resonator stability

2 实验装置及结果分析

在如图1所示的实验装置中,泵浦源为2台武汉三浦公司生产的半导体激光器组件,每个泵浦组件由45个20 W激光二极管阵列组成,按照三角形等间距布置侧面泵浦Nd:YAG晶体棒,Nd:YAG激光介质的尺寸均为Φ4.0 mm×90 mm,激光晶体A中Nd^{3+}掺杂粒子数分数为1.0%,激光晶体B为0.8%,2棒均侧面打毛,两端磨成平面,其中A棒用于提供1 064 nm基频振荡光,两端均镀有1 064 nm减反射膜,B棒的两端分别镀有1 064 nm和1 319 nm双色减反射膜。谐振腔端镜M_1的曲率半径为1 m,其凹面镀有1 064 nm高反射膜;平面端镜M_3的左面镀有1 064 nm和1 319 nm高反射和589 nm高透射的三色膜;谐振腔端镜M_2镀有1 319 nm高反射和660 nm增透的双色膜;与水平方向成45°放置的耦合镜M_4两面均镀有偏振膜,s_1面镀有1 064 nm 's'偏振高透膜,s_2面镀有对1 064 nm 's'偏振高透射和1 319 nm 'p'偏振高反射的双色膜。用于产生589 nm黄光的和频晶体KTP采用Ⅱ类临界相位匹配($\theta=78.9°$,$\varphi=0°$),2通光面均镀有对1 319 nm,1 064 nm和589 nm高透射的三色膜。谐波反射镜M_5的s_3面镀有1 319 nm和1 064 nm双色高透膜,s_4面镀有对1 319 nm和1 064 nm高透射和对589 nm高反射的三色膜。LBO采用Ⅰ类临界相位匹配($\theta=85.9°$,$\varphi=0°$),2通光面均镀有对1 319 nm和660 nm高透射的双色膜,2块非线性晶体的尺寸均为4 mm×4 mm×7 mm。放置在2激光晶体附近的声光Q开关由同一驱动电源控制,中心频率为27 kHz,其频率在(1~50)kHz可调。

在实验中,由于谐振腔镜M_3镀膜精度不足以使2基频光完全反射回谐振腔中,因此会有不同程度的1 064 nm和1 319 nm基频光与589 nm和频光一同输出腔外,经三棱镜分光,可使3波长光以一定角度分开。与此同时,为了研究声光调Q运转在不同重复频率下激光的输出特性,测试了不同调制频率下589 nm黄光和660 nm红光双波长可见光的平均输出功率随泵浦电流的变化关系,如图4所示。从图4中可以看出,对于同一波长激光,随着调制频率的增大,相同泵浦电流下平均输出功率降低,在重复频率10 kHz,泵浦电流均为17 A时,660 nm红光与589 nm黄光激光的最大平均输出功率分别为1.7 W和2.3 W,脉冲宽度分别为130 ns和110 ns(见图5和图6),同时测得1 064 nm和1 319 nm激光输出分别为150 mW和80 mW,至此实现了4波长激光同时运转,同时输出。

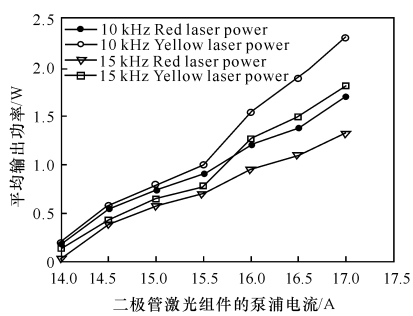

图4 泵浦电流与输出功率关系图

Fig. 4 Output power versus pumping current of diode-laser module

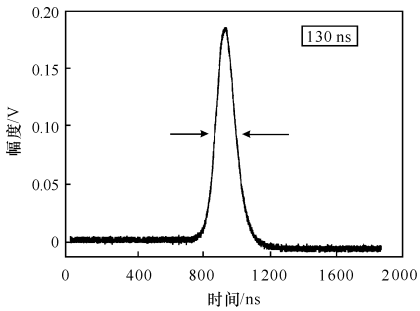

图5 660 nm 激光脉宽图

Fig. 5 Pulse width of 660 nm laser

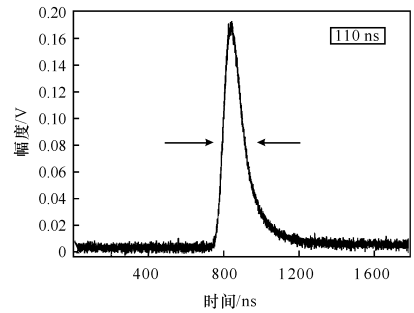

图6 589 nm 激光脉宽图

Fig. 6 Pulse width of 589 nm laser

3 结论

利用自行设计的"T"型复合谐振腔,通过对2基频光谐振腔稳定性条件分析,合理选择腔参数,最终实现了热稳运转,并与腔内倍频与和频技术相结合,获得了1 064 nm,1 319 nm,660 nm和589 nm 4波长激光同时输出。

参考文献:

[1] 王石语,王欣媛,过振,等. 抽运光对激光束空间分布影响程度的估算方法研究[J]. 应用光学,2007,28(1):63-67.
WANG Shi-yu, WANG Xin-yuan, GUO Zhen, et al. Estimation method to eliminate effects of pumping light on space distribution of laser beam [J]. Journal of Applied Optics, 2007,28(1):63-67. (in Chinese)

[2] 杨爱粉,过振,王石语,等. 组合抽运DPL声光调Q特性研究[J]. 应用光学,2007,28(5):593-597.
YANG Ai-fen, GUO Zhen, WANG Shi-yu, et al. Acoustooptic Q-switching performance of composite-pumped DPL[J]. Journal of Applied Optics,2007,28(5):593-597. (in Chinese)

[3] 徐海萍,徐海燕,张鹏,等. LD侧泵Nd:YAG/S-KTP腔内倍频高功率660 nm连续红光激光器[J]. 应用光学,2007,28(3):332-335.
XU Hai-ping, XU Hai-yan, ZHANG Peng, et al. LD side-pumped Nd:YAG/S-KTP intracavity frequency-doubled high power CW red laser at 660 nm[J]. Journal of Applied Optics, 2007,28(3):332-335. (in Chinese)

[4] CHEN Yong-fu. CW dual-wavelength operation of a diode-end-pump Nd:YVO_4 laser [J]. Applied Physics B, 2000,70:475-478.

[5] 延英,罗玉,潘庆,等. 瓦级连续双波长输出Nd:YAP/KTP稳频激光器[J]. 中国激光,2004,31(5):513-517.
YAN Ying, LUO Yu, PAN Qing, et al. Watt level CW frequency-stabilized Nd:YAP/KTP laser with dual wavelength outputs [J]. Chinese Journal of Lasers,2004,31(5):513-517. (in Chinese)

[6] 柴洪亮,薛林,黄海涛,等. 二极管泵浦Nd:$GdVO_4$晶体四波长激光器[J]. 激光与红外,2007,37(2):120-123.
CHAI Hong-liang, XUE Lin, HUANG Hai-tao, et al. Diode-pumped Nd:$GdVO_4$ laser emitting at four wavelengths[J]. Laser & Infrard, 2007,37(2):120-123. (in Chinese)

[7] SHEN Hong-yuan. Osxillation condition of simultaneous multiple wavelength lasing [J]. Chinese Physics Letters. 1990,7(4):174-176.

[8] SNELL K J, LEE D, PATI B, et al. RGB optical parametric oscillator source for compact laser Projection displays[J]. SPIE,2000,3954:158-162.

[9] LIAO Jun, HE Jing-liang, LIU Hui, et al. Simultaneous generation of red, green, and blue quasi-continuous-wave based on multi-QPM interaction from a single aperiodically poled $LiTaO_3$ [J]. Applied Physics Letters, 2003, 82: 3109.

[10] 马莹,彭显楚. 1 342 nm激光通过周期极化钽酸锂产生红光和蓝光的研究[J]. 中国激光,2005,32(2):262-264.
MA Ying, PENG Xian-chu. Red and blue light generations in a periodically poled $LiTaO_3$ by 1 342 nm Laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2005,32(2):262-264. (in Chinese)

[11] 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所. 全固

态内腔混频输出白光激光器:中国,ZL 200620028183.9[P]. 2007-08-15.
Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences. All-solid-state white laser by intra-cavity frequency mixing: China, ZL 200620028183.9[P]. 2007-08-15.

[12] 王海林,周卓尤,曹红兵,等. 双棒串接Nd:YAG激光器的稳定性研究[J]. 光电子·激光,2003,14(2):149-152.
WANG Hai-lin, ZHOU Zhuo-you, CAO Hong-bing, et al. Study on the stable characteristic of two-rod Nd:YAG laser [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2003,14(2):149-152. (in Chinese)

第十七届十三省(市)光学学术年会在南昌召开

第十七届十三省(市)光学学术年会暨五省光学(激光)学会2008年学术年会于2008年09月20日在南昌召开。

作为全国光领域进行研究和交流平台,本次年会共吸引上海、陕西、河南等省(市)100多位专家学者参加,共收到学术论文86篇。

这次年会是在团结友好的气氛中进行的。苏州大学潘君骅院士到会作了“大口径光学系统及相关问题”的特邀报告。会上特邀报告6篇,学术论文交流19篇。与会专家学者围绕进一步提升我国光学领域的科学研究水平,加强光学企业和光学科研机构的联系和交流,进行了深入探讨。

《应用光学》编辑部派员携刊参加了会议,与参会代表进行了广泛交流,广交朋友,进一步扩大了《应用光学》的影响。

(柏阳 供稿)