

LD 抽运 Nd:YAG/Nd:YVO₄ 腔内和频 500.9 nm 激光器

付喜宏 彭航宇 单肖楠 秦 莉

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要 报道了一种采用复合腔进行腔内和频的 500.9 nm 激光器。激光器由两个子谐振腔组成。在两个子谐振腔中,分别利用两个激光二极管抽运 Nd:YAG 晶体和 Nd:YVO₄ 晶体,并分别选择 946 nm 波长与 1064 nm 波长振荡进行和频。采用双端复合 Nd:YAG 晶体以减小高功率下激光晶体的热透镜效应,并结合热效应对高功率抽运下谐振腔进行优化设计,实现了腔内两个波长较好的模式匹配。在两个子腔的交叠部分,利用 KTP 晶体 II 类临界相位匹配进行腔内和频,得到和频激光输出。当 Nd:YAG 与 Nd:YVO₄ 晶体上抽运功率分别为 10.6 W 和 17.8 W 时,获得了 730 mW 的 500.9 nm 青绿光激光输出,光-光转换效率为 2.6%。实验结果和分析表明,利用复合腔和频是获得 500.9 nm 激光输出的有效方法。

关键词 激光器; 500.9 nm 激光; 和频; 复合腔

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0602012

Diode-Pumped Nd:YAG/Nd:YVO₄ Intracavity Sum-Frequency Mixing Laser at 500.9 nm

Fu Xihong Peng Hangyu Shan Xiaonan Qin Li

(State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract A continuous-wave (CW) 500.9 nm laser using intracavity sum-frequency mixing in a doubly resonant configuration is reported. The laser has two sub-cavities. A Nd:YAG crystal and a Nd:YVO₄ crystal are pumped by two laser diodes respectively in two sub-cavities. In the two cavities wavelengths of 946 nm from Nd:YAG and 1064 nm from Nd:YVO₄ are chosen to be mixed into 500.9 nm laser. A composite Nd:YAG crystal is used to deduce the thermal lens effect under high power pumping, and cavity design is optimized considering the thermal lens effects. Better matching of the modes for the two wavelengths is obtained. In the overlapping of the cavities, sum-frequency mixing is generated with a type-II critical phase matching KTP crystal. An output power of 730 mW at 500.9 nm is obtained at the incident pump power of 17.8 W for the Nd:YAG crystal and 10.6 W for the Nd:YVO₄ crystal. The analyses and experiment show that the doubly resonant intracavity sum-frequency mixing is a useful method to obtain 500.9 nm laser efficiently.

Key words lasers; 500.9 nm laser; sum-frequency mixing; doubly resonant configuration

OCIS codes 140.3580; 190.4223; 140.3530; 140.3480

1 引 言

半导体激光器(LD)抽运固体激光器具有体积小、结构简单、寿命长和光束质量好等显著优点,进一步结合非线性倍频技术可获得蓝绿波段(532、473、457 nm 等)激光输出,并在生物医疗、显示技术、光学存储以及通讯方面得到了广泛应用。然而,

由于常用激光晶体仅有有限的跃迁谱线,蓝绿光波段中许多波长(470~510 nm)不能通过倍频技术获得激光输出,只能通过非线性和频技术来实现。非线性和频技术,可以利用激光晶体的不同跃迁谱线进行相互作用产生更多波段的激光输出,因而成为扩展全固态激光输出波段的更为有效手段。目前,

收稿日期: 2013-03-01; 收到修改稿日期: 2013-03-27

基金项目: 国家 863 计划(2012AA040210)和吉林省科技发展计划(201105025)资助课题。

作者简介: 付喜宏(1980—),男,博士,副研究员,主要从事激光技术方面的研究。E-mail: fuxh_80@163.com

利用和频技术已实现了 491^[1]、494^[2]、501^[3]、447^[4]、488 nm^[5]等波段蓝绿光输出。

蓝绿光波段中,500 nm 附近波段处于海水透射窗口范围,该波段激光在水下通讯以及生物医学领域有着特殊应用。相比于蓝绿光波段其他波长,500 nm 附近的激光报道相对较少。2002 年,卜轶坤等^[3]报道了采用单块 Nd:YAG 晶体双波长振荡实现 1064 nm 与 946 nm 双波长同时振荡,并通过和频实现了 20 mW 的 500.8 nm 激光输出。然而,对于 Nd:YAG 晶体,1064 nm 谱线与 946 nm 谱线受激发射截面比值达 12:1^[6],双波长振荡时腔内两波长存在很强的竞争,这种竞争在一定程度上会影响到激光输出的稳定性。2006 年,Jaquemont 等^[7]报道了 LD 抽运 Yb 掺杂晶体(Yb:YSO, Yb:KYW)倍频实现了 35 mW 的 501.7nm 激光输出,但所用激光器结构较复杂,限制了其进一步应用。2011 年, Li 等^[8]报道了采用 LD 抽运 Yb:Y₂SiO₅ 晶体,通过腔内倍频获得了 239 mW 的 501.7 nm 激光输出,光-光转换效率仅为 1.3%。2011 年, Wu 等^[9]报道利用 II 类相位匹配和频实现了 504 nm 激光输出,在总抽运功率为 34 W 时,获得了 215 mW 的 504 nm 激光,光-光转换效率仅为 0.6%。

2008 年,本课题组报道了利用两块晶体分别获得 1064 nm 与 946 nm 两束激光振荡,在两束激光共用的谐振腔放入非线性晶体进行和频,有效避免了两个波长之间的竞争,实现了 78 mW 的低噪声 500.9 nm 激光输出^[10]。在前期实验基础上,本文

进一步采用大功率 LD 阵列作为抽运源,为减小高功率下激光晶体的热透镜效应,采用双端复合的 Nd:YAG 晶体以,结合热效应对高功率抽运下谐振腔进行优化设计,在 28.4 W 总抽运功率下获得了 730 mW 的 500.9 nm 青绿色激光输出,光-光转换效率达到 2.6%。

2 谐振腔设计与分析

采用激光二极管阵列(LDA)作为抽运源,利用 Nd:YVO₄ 晶体的 1064 nm 谱线与 Nd:YAG 晶体的 946 nm 谱线进行和频,实现 500.9 nm 激光输出。对于端面抽运固体激光器,为提高激光器的小信号增益,抽运光一般聚焦为特别小的光斑后注入激光晶体,然而常用的激光晶体的导热率一般都不高,在中高功率抽运条件下,激光晶体的热效应是不可忽略的问题。因而,对高抽运功率下 500.9 nm 和频激光器,必须结合热效应对谐振腔进行优化设计。

2.1 复合激光晶体的选择

高抽运功率下, Nd:YAG 晶体的热透镜效应是非常显著的,而且本文中所涉及的 Nd:YAG 晶体 946nm 谱线跃迁属准三能级跃迁。准三能级系统的激光下能级为基态能级的一个 Stark 分裂,粒子数分布与晶体温度成正比。高抽运功率下,晶体内热的聚集不仅会产生热透镜效应,而且会严重影响激光发射的阈值与激光发射的效率^[11]。为了减小晶体内热的聚集,实验中采用复合 Nd:YAG 晶体(如图 1 所示)。

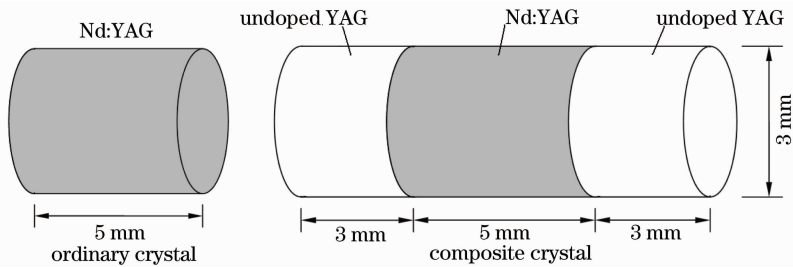


图 1 复合晶体示意图

Fig.1 Schematic of the composite crystal

复合 Nd:YAG 晶体是将 Nd:YAG 晶体的一端或两端和纯的同质基底材料 YAG 光胶后在高温条件下进行分子扩散实现稳固结合的一种激光晶体。由于 Nd:YAG 晶体中主要是 Nd³⁺ 对抽运光有吸收作用,未掺杂的 YAG 基质材料不吸收抽运光,温度远低于 Nd:YAG 晶体, Nd:YAG 晶体除了通过侧面散热以外,还可获得良好的晶体端面散热,因此激光晶体内部的热量得到有效减少,晶体的热负载得

到很大的改善^[12]。这对于端面抽运方式的 Nd:YAG 激光器而言,尤其对于准三能级系统 946 nm 的 Nd:YAG 激光器的有效运转起着重要作用,不仅降低了激光阈值,还使增益再吸收损耗大大降低,提高了激光输出效率。另外由于不掺杂晶体阻止了掺杂晶体的端面的轴向扩展,而且使整个晶体端面表面的变形很小,降低了晶体端面应力,因此降低了晶体热负载对激光晶体表面膜层的损坏程度。

2.2 谐振腔的优化设计

为获得 500.9 nm 激光输出,采用如图 2 所示的三镜折叠腔结构。采用这种结构,在谐振腔的两个分臂中会产生两个束腰位置,分别放置激光晶体与非线性晶体,通过谐振腔设计既可实现基频光与抽运光的较好的模式匹配,也可在非线性晶体中获得小的束腰来提高和频转换效率;同时,若在折叠臂端镜的膜系设计时让其对和频光也高反,可以实现双向和频、单向输出,这会进一步提高和频光的输出功率。此外,这种结构中,和频光在折叠臂中产生,其传输不经过激光晶体,避免了激光晶体对和频光的吸收。

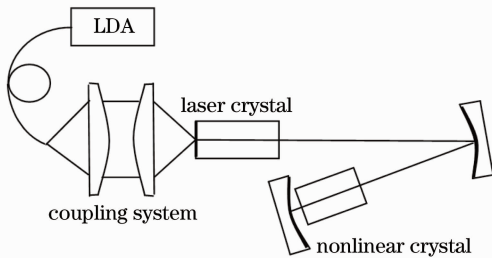


图 2 三镜折叠腔结构示意图

Fig. 2 Schematic of the folded cavity with three mirrors

进行谐振腔设计时,主要考虑以下几点:

1) 抽运光斑与腔内基模光斑的模式匹配。根据模式匹配理论,LD 抽运的固体激光器中抽运光斑与腔内基模光斑应满足一定关系,如果基模光斑偏小,一方面使得抽运能量利用不充分,另一方面容易引起高阶模振荡,降低腔内光功率密度,进而降低倍频效率。反之,如果基模光斑偏大,则由于热透镜引起的高阶球差衍射损耗会导致基模损耗过大,同样不利于激光的稳定运转。因此根据文献[13]的结果,高抽运功率下将基模光斑半径与抽运光斑半径之比定在 0.7~0.8 之间。实验中,注入到激光晶体中的抽运光斑约为 220 μm ,所以腔内放置激光晶体的分臂的束腰半径尽量控制在 150~180 μm 。

2) 热稳腔的设计。激光晶体的热效应可以等效为一个薄透镜来处理。热透镜与普通的球面透镜不完全相同,热透镜的焦距并不是一个固定数值,它会随着晶体温度变化而变化。随抽运功率的增加,晶体温度会升高,热透镜焦距会减小,此时,如果腔内振荡的基频光参量随着热透镜焦距的改变而有较大的变化,会导致腔内模式失配,从而导致激光输出功率不稳定,输出光束的横向模式也不稳定。因此设计热稳定腔型对高功率激光运转是非常重要的。此外,热透镜也并非完全中心对称的,它的等效曲率

的分布随激光晶体的形状,各向异性以及致冷等边界条件的不同而不同。因此热稳定腔型的设计实际上就是设计出这样的一组腔型:热焦距在较大范围内变化时,腔内激光基模参量基本不变。

基于以上考虑,根据激光光束的传播理论,采用标准 ABCD 传输矩阵进行如图 3 所示三镜折叠腔的特征参数的具体计算与选择。计算时,将晶体的热透镜等效为端面的一个凹面镜 M1。设镜 M1、M2 和 M 的曲率半径分别为 ρ_1 、 ρ ($\rho = 2f$) 和 ρ_2 。各分臂长分别为 l_1 、 l_2 ,总腔长为 $L = l_1 + l_2$ 。实验中折叠角 α 取值为 15° 左右,计算表明腔内子午面与弧矢面内的像散很小,因而计算中忽略像散的影响。

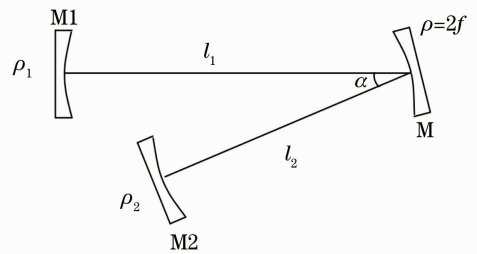


图 3 折叠腔示意图

Fig. 3 Schematic of the folded cavity

采用 ABCD 矩阵传输理论^[14],利用 Matlab 软件进行矩阵运算,通过比较分析实验中选取腔参数如下所示:

对于 1064 nm 基频光的谐振腔,取: $\rho = 50$ mm, $\rho_2 = 200$ mm, $l_1 = 100$ mm, $l_2 = 29$ mm。

对于 946 nm 基频光的谐振腔,取: $\rho = 50$ mm, $\rho_2 = 200$ mm, $l_1 = 90$ mm, $l_2 = 29$ mm。

图 4 和图 5 所示为按上述谐振腔参数取值,当激光晶体热透镜焦距从 50 mm 变化到 1000 mm 时,1064 nm 和 946 nm 基频光在两个分臂中束腰的

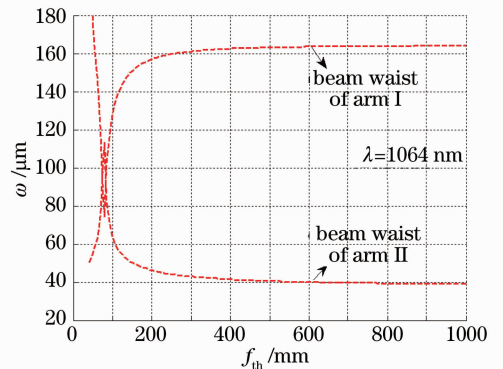


图 4 两分臂中束腰大小随热透镜焦距的变化(1064 nm)

Fig. 4 Variations of the beam waists in the two arms with the focus of the thermal-lens(1064 nm)

变化情况。可以看出,1064 nm 谐振腔中分臂一的束腰半径约为 160 μm ,946 nm 谐振腔中分臂一的束腰半径约为 150 μm ,满足前述的模式匹配条件。且当热透镜焦距从 1000 mm 变化到 200 mm 时,束腰半径变化量小于 10 μm ,不会造成模式失配,仍可保持较好的基频光振荡。1064 nm 谐振腔中分臂二的束腰半径约为 40 μm ,946 nm 谐振腔中分臂二的束腰半径也近似为 40 μm 。且热透镜焦距从 1000 mm 变化到 200 mm 时,束腰半径的变化量均小于 5 μm ,由于热透镜改变而导致对腔内振荡激光参数变化较小,而且实验中这个小的变化可以通过对谐振腔元件微调得到补偿,所以可保持较高的和频转换效率。

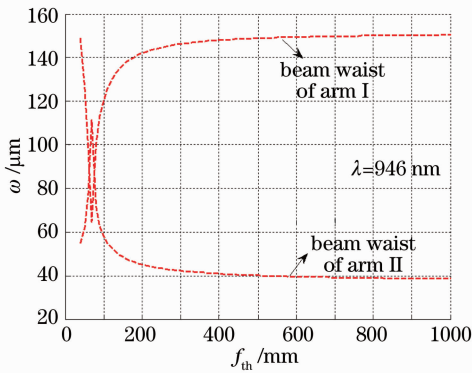


图 5 两分臂中束腰大小随热透镜焦距的变化(946 nm)
Fig. 5 Variations of the beam waists in the two arms with the focus of the thermal-lens(946 nm)

3 实验结果及讨论

实验装置如图 6 所示。复合 Nd:YAG 晶体和腔镜 M、M₂、M₃ 构成 946 nm 振荡的谐振腔,Nd:YVO₄ 晶体和腔镜 M₂、M₃ 构成 1064 nm 振荡的谐振腔,腔镜 M、M₂、M₃ 为共用谐振腔部分。复合 Nd:YAG 晶体中间掺杂部分尺寸为 $\phi 3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,Nd³⁺ 掺杂原子数分数为 0.5%,两端未掺杂的 YAG 尺寸均为 $\phi 3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$,晶体一端镀制 808 nm 增透膜及 946 nm 高反膜作为腔镜,另一端镀制 946 nm 减反膜。Nd:YVO₄ 晶体尺寸为 3 mm \times 3 mm \times 5 mm,Nd³⁺ 掺杂原子数分数为 1%,晶体一端镀制 808 nm 增透膜及 1064 nm 高反膜作为腔镜,另一端镀制 1064 nm 减反膜。LDA1 及 LDA2 的最大输出功率分别为 12 W 和 20 W,抽运光经光学系统聚焦为半径约 220 μm 的光斑注入到激光晶体中。和频晶体 KTP 尺寸为 3 mm \times 3 mm \times 5 mm,按 II 类相位匹配角度 ($\theta = 90^\circ$, $\Phi = 45.9^\circ$) 切割,两端面均镀制 1064 nm/946 nm/500.9 nm 增透膜以减小腔内损

耗。M 为偏振合光镜,由于实验中采用 II 类相位匹配和频,参与和频的 1064 nm 与 946 nm 激光偏振方向垂直,所以合光镜 M 左端面镀制 45°入射 p 偏振 1064 nm 增透膜,右端面镀制 45°入射 s 偏振 946 nm 高反膜以及 45°入射 p 偏振 1064 nm 增透膜。此处,合光镜 M 镀制 1064 nm 增透膜也可以抑制复合 Nd:YAG 晶体中 1064 nm 谱线的振荡。折叠镜 M₂ 为平凹镜,凹面镀制 1064 nm/946 nm 高反膜、500.9 nm 增透膜,平面镀制 500.9 nm 增透膜,同时作为激光器的输出镜。端镜 M₃ 为平凹镜,凹面镀制 1064 nm/946 nm/500.9 nm 高反膜。

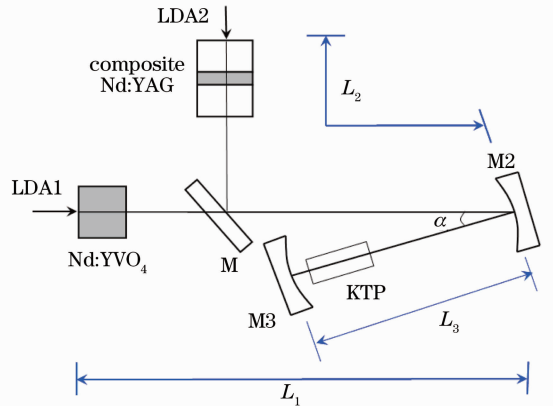


图 6 和频 500.9 nm 激光器实验装置

Fig. 6 Experimental setup of the 500.9 nm laser

由于采用折叠腔结构,在两个臂内可以产生两个束腰分别放置激光晶体与非线性晶体。根据上节谐振腔优化设计,折叠输出镜 M₂ 曲率半径为 50 mm,折叠端镜 M₃ 曲率半径为 200 mm,折叠角约 15°,取 $L_1 = 100 \text{ mm}$, $L_2 = 90 \text{ mm}$, $L_3 = 29 \text{ mm}$ 。

对非线性和频 ($\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$), 和频光功率

$$P_3 = \gamma_{\text{SFM}} P_1 P_2, \quad (1)$$

式中和频参量 γ_{SFM} 依赖于材料的非线性系数、参与和频的基频光频率及腔内高斯光束的形式,对一定的谐振腔结构, γ_{SFM} 一定^[15]。所以,当一个基频光功率 P_1 固定,而另一个基频光功率 P_2 改变,和频光功率将随 P_2 线性变化。

实验中,通过仔细的谐振腔调节,在两个谐振腔中分别获得 1064 nm 谱线与 946 nm 谱线的振荡,之后在共用的折叠臂的束腰处放入和频晶体 KTP 进行和频。Nd:YVO₄ 晶体产生 1064 nm 谱线振荡的阈值为 1.8 W,Nd:YVO₄ 晶体抽运功率(LDA1)恒定为 10.6 W,调节复合 Nd:YAG 晶体的抽运功率(LDA2),和频 500.9 nm 输出功率随 LDA2 功率的变化曲线如图 7 所示。实验中测量功率所采用的功率计为美国 Coherent 公司生产的 LM-3 型热功

率计。可以看出,输出曲线整体比较平缓,接近线性,激光阈值约为 7.4 W,当复合 Nd:YAG 晶体的抽运功率增大到 17.8 W 时,和频 500.9 nm 激光输出为 730 mW。继续增大抽运功率,500.9 nm 输出功率不再有明显增加,这是因为当复合 Nd:YAG 晶体的抽运功率为 17.8 W 时,和频过程使腔内可参与和频过程的 1064 nm 光子被充分利用,所以随 Nd:YAG 抽运功率的增加输出会呈现饱和。若想进一步增加输出,必须同时增大 Nd:YVO₄ 的抽运功率。

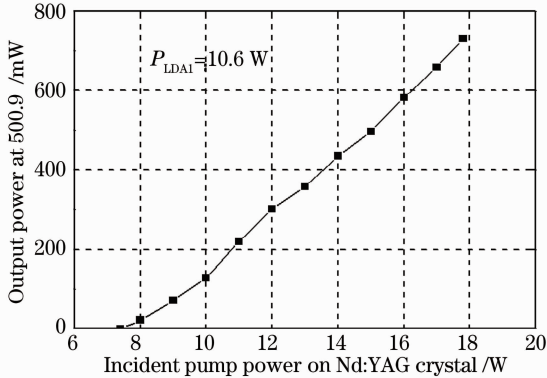


图 7 500.9 nm 输出功率随复合 Nd:YAG 晶体抽运功率的变化

Fig. 7 Variation of output power at 500.9 nm with the pump power on Nd:YAG

通过谐振腔的微调,在 28.4 W 的总抽运功率下,和频激光最大输出为 730 mW,光-光转换效率为 2.6%。由(1)式可知,和频参量 γ_{SFM} 也是影响和频转换效率的重要因素,而 γ_{SFM} 在很大程度上取决于参与和频的两束激光的聚焦及相互交叠情况。所以,和频转换效率的进一步提高需从对该参量的详细研究入手。1968 年,Boyd 等^[16]针对倍频技术详细地研究了聚焦高斯光束在非线性晶体中的参量相互作用,建立了描述聚焦高斯光束相互作用的 Boyd-Kleinman 理论。下一步的工作,将以该理论为基础,详细分析和频过程中两束激光的光束特性及聚焦情况对和频参量的影响,通过优化两束激光的聚焦参数进一步提高和频转换效率。

输出功率为 730 mW 时,和频激光输出功率稳定性如图 8 所示。经计算,30 min 内稳定性优于 $\pm 3.8\%$ 。利用刀口法测量,和频激光光束质量为 $M^2=1.35$ 。

图 9 为采用 ANDO 公司 AQ6317B 光谱仪测量得到的和频青绿光的光谱图,中心波长为 500.9 nm,激光线宽为 0.6 nm。图 10 为用数码相机拍摄的 500.9 nm 激光的光斑图。

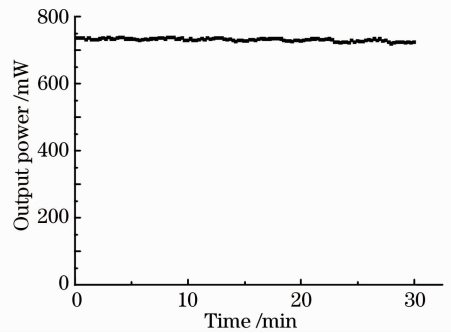


图 8 和频 500.9 nm 激光功率稳定性
Fig. 8 Power stability of the sum-frequency 500.9 nm laser

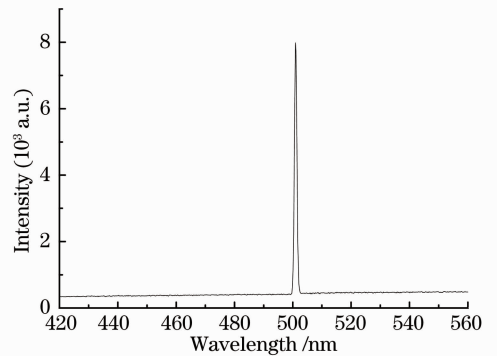


图 9 和频青绿激光光谱图
Fig. 9 Spectrum line of sum-frequency cyan laser

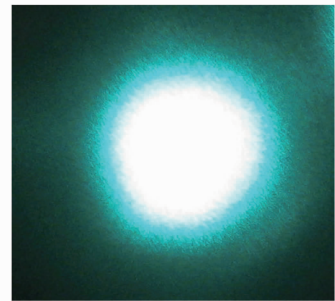


图 10 500.9 nm 激光光斑图
Fig. 10 Spot of the 500.9 nm laser

4 结 论

利用复合腔结构进行腔内和频实现了 500.9 nm 激光器。高功率抽运下,采用复合 Nd:YAG 晶体以减小晶体热效应,提高准三能级 946 nm 激光振荡效率,并结合热效应对复合腔结构进行了优化设计。当抽运功率为分别为 10.6 W (对 Nd:YVO₄ 晶体)及 17.8 W (对 Nd:YAG 晶体)时,获得了 730 mW 的 500.9 nm 激光输出,光-光转换效率达到 2.6%。结果表明,采取复合腔结构和频是有效获得 500.9 nm 激光输出的实用方法。同时,采用复合腔结构可以利用

不同晶体的不同谱线进行和频,这会大大扩展固体激光器输出的波长范围,因而具有较高的实用价值。

参 考 文 献

- 1 E. Herault, F. Balembois, P. Georges *et al.*. 491 nm generation by sum-frequency mixing of diode pumped neodymium lasers[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(15): 5653~5661
- 2 J. Zou, L. R. Wang. 494 nm blue laser based on sum frequency mixing of diode pumped Nd³⁺ lasers[J]. *Laser Physics*, 2012, **22**(2): 385~388
- 3 Bu Yikun, Zheng Quan, Xue Qinhuo *et al.*. Design and manufacture of optical thin Films for 500.8 nm Nd:YAG laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(1): 79~83
卜铁坤,郑 权,薛庆华等. 500.8 nm Nd:YAG 青光激光器光学薄膜的设计与制备[J]. *光子学报*, 2006, **35**(1): 79~83
- 4 Yang Qiguo, Zhu Siqu, Chen Zhenqiang *et al.*. Design and experiment of a fundamental mode and thermal stable cavity based on 447 nm blue light laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(11): 1102003
阳其国,朱思祁,陈振强等. 基于 447 nm 蓝光激光器基模热稳腔的设计与实验[J]. *中国激光*, 2011, **38**(11): 1102003
- 5 Wang Junguang, Li Yongliang, Tian Yinghua *et al.*. All-solid-state continuous-wave all-intracavity sum-frequency mixing blue laser at 488 nm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1669~1672
王君光,李永亮,田迎华等. 全固态腔内和频 488 nm 连续蓝光激光器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1669~1672
- 6 P. X. Li, D. H. Li, C. Y. Li *et al.*. Simultaneous dual-wavelength continuous wave laser operation at 1.06 and 946 nm in Nd:YAG and their frequency doubling[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **235**(1~3): 169~174
- 7 M. Jacquemet, F. druon, F. Balembois *et al.*. Single-frequency operation of diode-pumped Yb:KYW at 1003.4 nm and 501.7 nm by intracavity second harmonic generation[J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **85**(1): 69~72
- 8 Y. L. Li, H. L. Jiang, T. Y. Ni *et al.*. Diode pumped Yb:Y₂SiO₅-LiB₃O₅ cyan laser at 501.7 nm[J]. *Laser Physics*, 2011, **21**(4): 670~673
- 9 Y. Wu, G. Y. Jin, Y. Dong. 504 nm blue-green laser based on sum-frequency mixing of diode pumped Nd³⁺ lasers[J]. *Laser Physics*, 2011, **21**(8): 1378~1381
- 10 Fu Xihong, Li Yimin, Shen Gao *et al.*. Compact 500.9 nm laser based on doubly resonant intracavity sum-frequency mixing[J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, **40**(9): 775~778
- 11 Shi Yuxian, Lu Tielin, Feng Baohua *et al.*. Thermal effects analysis of Nd:CNGG 935 nm laser pumped by 885 nm and 808 nm diode lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(11): 1102004
施玉显,卢铁林,冯宝华等. 885 nm 和 808 nm LD 抽运 Nd:CNGG 935 nm 激光器热效应研究[J]. *中国激光*, 2012, **39**(11): 1102004
- 12 Gao Lanlan, Tan Huiming, Wang Hong. The composite Nd:YAG crystal and its application in high power blue laser[J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(5): 341~344
高兰兰,檀慧明,王 红. 复合 Nd:YAG 晶体及其在大功率蓝光激光器中的应用[J]. *激光与红外*, 2006, **36**(5): 341~344
- 13 Liu Junhai, Lu Junhua, Lu Jianren *et al.*. Mode matching in high-power laser-diode-array end-pumped Nd:YVO₄ solid-state lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(2): 186~189
刘均海,吕军华,卢建仁等. 高功率端面抽运 Nd:YVO₄ 固体激光器模式匹配的研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(2): 186~189
- 14 Xue Junwen, Su Binghua, Pei Xuedan *et al.*. Analysis and design of laser resonator and beam transformation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(8): 081402
薛竣文,苏秉华,裴雪丹等. 激光谐振腔和光束传输的分析与设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(8): 081402
- 15 W. P. Risk, T. R. Gosnell, A. V. Nurmikko. Compact Blue-Green Lasers[M] United Kingdom: Cambridge University Press, 2003. 20~55
- 16 G. D. Boyd, D. A. Kleinman. Parametric interaction of focused gaussian light beams[J]. *J. Appl. Phys.*, 1968, **39**(8): 3597~3639

栏目编辑: 张 腾