

文章编号:1004-4213(2010)04-0592-4

# LD 侧面抽运 Nd : YAG 多波长激光器\*

陆宝乐,张琛,师研,江曼,白晋涛,任兆玉

(西北大学 光子学与光子技术研究所,西安 710069)

**摘要:**利用单根 Nd : YAG 晶体棒,实现 1 064 nm 和 1 319 nm 双波长基频光振荡及其倍频光 532 nm、660 nm 激光的输出.采用 LD 侧面抽运单根 Nd : YAG 晶体棒实现 1 064 nm 和 1 319 nm 基频光振荡,在此基础上使用非线性频率变换技术获得 532 nm 和 660 nm 倍频光的输出.结果表明:1 064 nm 和 1 319 nm 基频激光同时输出时功率分别为 30.5 W 和 8.78 W,单独输出时功率分别为 35.6 W 和 11.2 W;在声光调 Q 频率分别为 10.5 kHz 和 20.5 kHz 时,获得了功率分别为 5.34 W 和 1.353 W 的 532 nm 激光和 660 nm 激光两路同时运转输出、功率分别为 6.72 W 和 1.902 W 各路单独输出,两种情况下倍频转换效率均为 17.5% 和 15.4%,不稳定性小于 2%.

**关键词:**双波长;侧面抽运;1 064 nm/1 319 nm 基频光;非线性频率变换;声光调 Q

**中图分类号:** TN248.1

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20103904.0592

## 0 引言

全固态 Nd<sup>3+</sup> 激光器产生的 532 nm 与 660 nm 波长激光是可见光激光中的两种重要波段,它们在医疗、显示以及科研领域中有着重要的应用<sup>[1-3]</sup>.目前,国内外对 532 nm 与 660 nm 激光器的研究主要集中在单一波长的高功率输出或者是基频光与倍频光的同时输出,而有关 532 nm 和 660 nm 双波长同时输出或交替输出的激光器报道甚少,因此开展输出波长为 532 nm 和 660 nm 的全固态双波长激光器具有重要的意义.

通常,全固态激光器中激光谱线之间存在模式竞争,增益较强的 1 064 nm 激光谱线会抑制掉增益较弱的 1 319 nm 激光谱线,而无法实现 1 064 nm 和 1 319 nm 同时振荡<sup>[3-4]</sup>,但是通过人为的对振荡较强的谱线引入线性或非线性损耗可以降低增益较强的谱线的竞争能力、调制较弱谱线的空间和幅变特性,这样就能够获得双波长基频激光的同时振荡<sup>[5-7]</sup>.

本文采用新颖的激光二极管 LD 侧面抽运 Nd : YAG T 型腔结构,分别获得了 1 064 nm 和 1 319 nm 激光同时运转输出和分别运转输出.在此基础上,加入 KTP 倍频晶体、二次谐波反射镜和声光调 Q 结合 II 类相位匹配方式倍频技术和声光 Q 技术,获得了 532 nm 和 660 nm 激光同时输出和单独输出.

## 1 侧面抽运全固态 Nd : YAG 1 064 nm、1 319 nm 激光

实验中通过对激光晶体两端镀 1 064 nm 和 1 319 nm 增透膜、合适的各元件镀膜和合理的腔型设计,来实现基频光的同时振荡(或者单独振荡).

### 1.1 实验装置

实验中选用国产 LD 侧面抽运模块,最大工作电流 25 A,最大抽运功率 180 W;Nd : YAG 晶体棒规格为  $\phi 3 \times 65$  mm<sup>2</sup>,掺杂钕离子浓度 0.7 at%,晶体棒侧面打毛,两端面磨平抛光并镀 1 064 nm、1 319 nm 波长双色增透膜;采用国产水冷系统对激光晶体和抽运模块进行冷却,温度设定为 25 °C,冷却精控温度为  $\pm 0.1$  °C.

1 064 nm、1 319 nm 基频光实验光路如图 1,整个谐振腔为 T 型复合腔,由 M<sub>1</sub> 与 M<sub>2</sub> 组成 1 064 nm 基频光振荡腔;由 M<sub>1</sub>、M<sub>1</sub> 和 M<sub>3</sub> 构成 1 319 nm 基

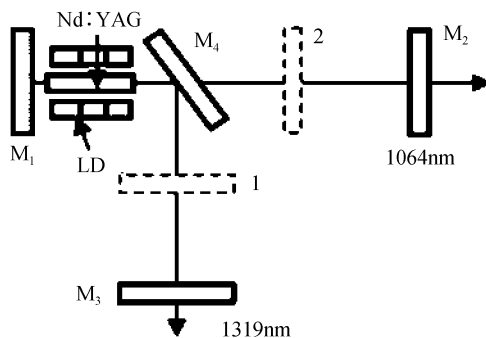


图 1 基频光实验光路

Fig. 1 Schematic diagram of fundamental frequency laser experiment light path

\* 国家高技术研究发展计划(2007AA03Z407)资助

Email: lubaole1123@163.com

收稿日期:2009-10-04

修回日期:2009-11-10

频光振荡腔. 谐振腔端镜  $M_1$  镀 1 064 nm 和 1 319 nm 的高反膜;  $M_2$  镀 1 319 nm 增透,  $M_3$  镀 1 064 nm 增透, 由文献[8]报导给出的输出镜透过率作为参考. 本实验选用 1 064 nm 透过率为 20% 的膜, 1 319 nm 选用透过率为 8% 的膜; 与水平方向成  $45^\circ$  的  $M_4$  反射镜镀 1 319 nm 全反膜和 1 064 nm 增透膜. 1 和 2 均为光路中加入的光闸, 其作用是 1 064 nm 直线型腔振荡时将 1 挡在 L 形腔光路中抑制 1 319 nm 激光的振荡, 从而提高 1 064 nm 激光的输出功率; 1 319 nm L 形腔振荡时将 2 挡在光路中抑制 1 064 nm 的振荡, 从而提高 1 319 nm 激光的输出功率, 以实现两路基频光分别输出.

## 1.2 实验结果

实验结果见图 2. 图中“D”和“S”分别代表了双波长激光同时运转输出和单独运转输出. 实验方案获得了预期的 1 064 nm 和 1 319 nm 的基频光同时运转, 阻断任意一路基频光振荡都可以实现单路运转.

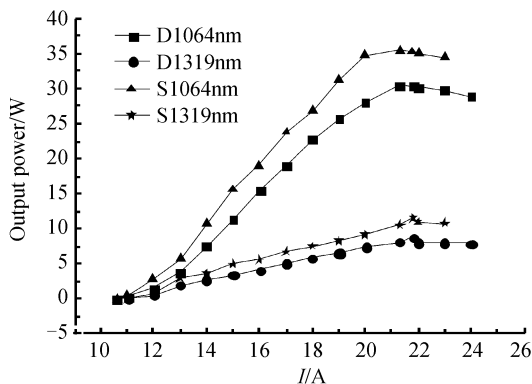


图 2 1 064 nm、1 319 nm 基频光实验  $P-I$  曲线

Fig. 2  $P-I$  curves of 1 064 nm & 1 319 nm fundamental frequency light experiment

双波长激光运转时随着抽运电流分别增加到 21.3 A 和 21.8 A 时, 1 064 nm 和 1 319 nm 基频光的输出功率相继达到最大, 分别为 30.5 W 和 8.78 W, 当电流继续增加, 两路光的输出功率反而下降. 当 1 064 nm 或 1 319 nm 激光单路运转时, 随着驱动电流增加到 20.8 A 时单独运转的 1 064 nm 基频光输出功率最大, 达到 35.6 W; 1 319 nm 基频光单独运转时, 随着驱动电流增加到 21.2 A 时输出功率最大, 达到 11.2 W.

对比 1 064 nm 和 1 319 nm 双波长激光同时运转和单独运转的情况, 可知在双波长激光同时运转时的输出功率低于单路运转, 主要是因为在全固态双波长激光器 1 064 nm 和 1 319 nm 基频光同时运转时二者之间存在着模式竞争<sup>[8]</sup>, 所以基频光双波长运转的功率低于单独运转的输出功率. 由图 2 可

以看出, 当抽运电流增加到一定程度时输出功率曲线都出现了下降, 这是由于随着抽运电流的增加而导致热透镜效应越来越明显, 从而造成谐振腔的运转超出稳区范围而形成的.

## 2 侧面抽运全固态 Nd:YAG 532 nm、660 nm 双波长实验研究

### 2.1 实验装置

在基频光实验的基础上不改变腔的长度, 添加和替换部分元件, 用  $M_5$  镜代替  $M_2$ 、 $M_7$  镜代替  $M_3$ , 并如图插入了倍频晶体和声光调 Q 开关元件, 即为 532 nm 和 660 nm 双波长实验装置, 如图 3. 其中  $M_5$  为 532 nm 输出镜, 镀 532 nm 增透膜、1 319 nm 增透膜和 1 064 nm 高反膜;  $M_7$  为 660 nm 输出镜, 镀 660 nm 增透膜、1 064 nm 增透膜和 1 319 nm 高反膜. 声光 Q 开关 1 和 2 分别用来调制 1 064 nm 和 1 319 nm 基频光; 声光 Q 开关 1 的调制频率范围为 500 Hz~50 kHz, 声光晶体两端面镀有 1 064 nm 增透膜; 声光 Q 开关 2 调制频率范围为 5~50 kHz, 声光晶体两端面镀有 1 319 nm 增透膜.  $M_6$  为 532 nm 谐波镜, 镀 1 064 nm、1 319 nm 高透膜和 532 nm 高反膜;  $M_8$  为 660 nm 谐波镜, 镀 1 319 nm、1 064 nm 高透膜和 660 nm 高反膜. 532 nm 和 660 nm 激光分别由 KTP1 和 KTP2 两块 II 类相位匹配晶体腔内倍频方式获得,  $KTP_1$  的匹配角为  $\theta=23.5^\circ$ ,  $\phi=90^\circ$ , 两通光面均镀 1 064 nm 和 532 nm 的双色高透膜;  $KTP_2$  匹配角为  $\theta=59.80^\circ$ ,  $\phi=0^\circ$ , 两通光面均镀 1 319 nm 和 660 nm 的双色高透膜. 两块晶体尺寸均为  $4 \times 4 \times 7 \text{ mm}^3$ , 用铝箔包裹后放入水冷块中与抽运模块和声光 Q 开关同步制冷.

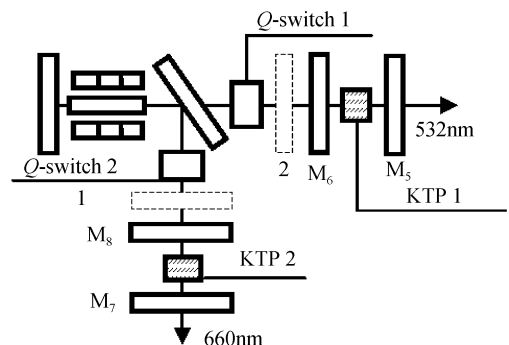


图 3 532 nm 与 660 nm 实验光路

Fig. 3 Schematic diagram of 532 nm & 600 nm laser experiment light path

### 2.2 实验结果

532 nm 和 660 nm 激光单路运转时, 调节声光调 Q 开关时测得了不同重复率下单路激光输出  $P-I$  曲线, 参照图 4.

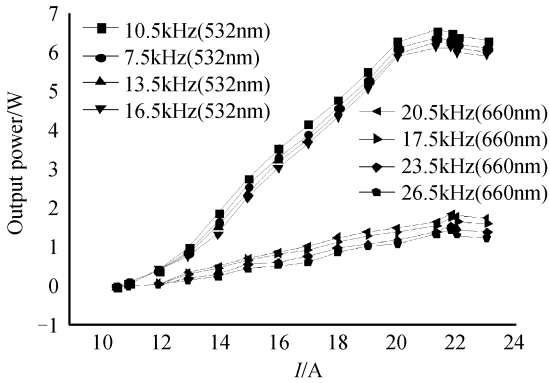


图 4 不同调 Q 重复频率单路输出 532 nm, 660 nm P/I 曲线  
Fig. 4 P/I curve of single-output 532 nm, 660 nm at different repetition frequency of Q-switch

532 nm 和 660 nm 双波长同时运转时, 调节声光调 Q 开关时测得了不同重复率下激光器双波长输出 P-I 曲线, 参照图 5.

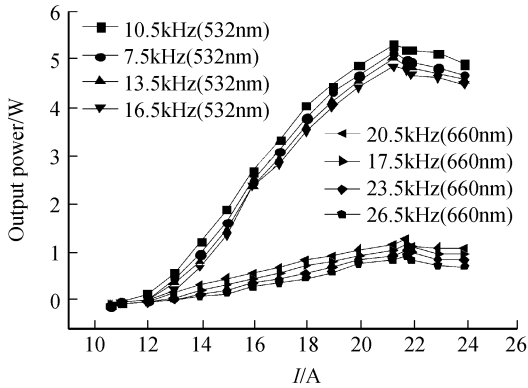


图 5 不同调 Q 重复频率同时输出 532 nm, 660 nm P/I 曲线  
Fig. 5 P/I curve of dual-output 532 nm, 660 nm at the same repetition frequency of Q-switch

由图 4 和图 5 可知在实验中当声光 Q 开关 1 的重复频率选用 10.5 kHz、声光 Q 开关 2 的重复率选用 20.5 kHz 时输出功率较佳.

由图 4 和图 5 也可得出双波长激光同时运转和单独运转时最佳的 P-I 曲线, 如图 6.

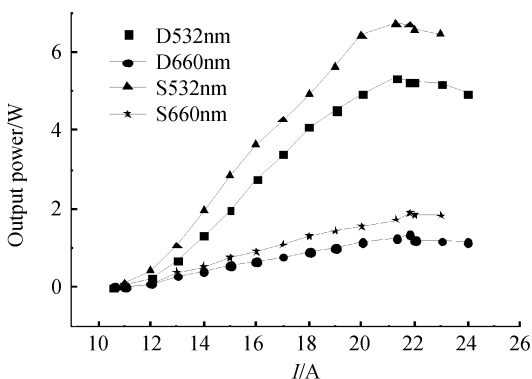


图 6 532 nm, 660 nm 实验 P/I 曲线图  
Fig. 6 P/I curve of 532 nm & 660 nm experiment

图 6 中“D”和“S”分别代表了双波长激光同时运转输出和单独运转输出. 由于实验采用腔内倍频的方案, 因此倍频光输出功率曲线的变化特点与基

频光实验中对应的双、单波长运转时的特点相似. 实验中采用了调 Q 技术对基频光调制, 因此提高了 KTP 晶体中的基频光功率密度, 有利于提高基频光到倍频光的转换效率, 从而获得了较高功率的 532 nm、660 nm 准连续激光的输出. 532 nm、660 nm 同时输出时, 532 nm 在抽运电流为 21.3 A 时达到最大输出功率 5.34 W, 660 nm 在抽运电流 21.8 A 时输出功率最大, 达到 1.353 W; 分别运转输出时, 532 nm、660 nm 输出功率分在抽运电流为 20.8 A 和 21.2 A 时达到最大, 功率分别为 6.72 W 和 1.902 W. 双波长运转时 1 064 nm、1 319 nm 基频光到 532 nm 和 660 nm 倍频光的转换效率分别为 17.5% 和 15.4%.

实验中观察了 532 nm 和 660 nm 双波长运转时输出功率的稳定情况, 以 1 min 为间隔观察 15 min, 得到如图 7 的曲线, 532 nm 与 660 nm 的输出不稳定性均小于 5%. 实验拍摄了 532 nm、660 nm 双波长运转时的远场光斑, 如图 8, 可见光斑的模式较好.

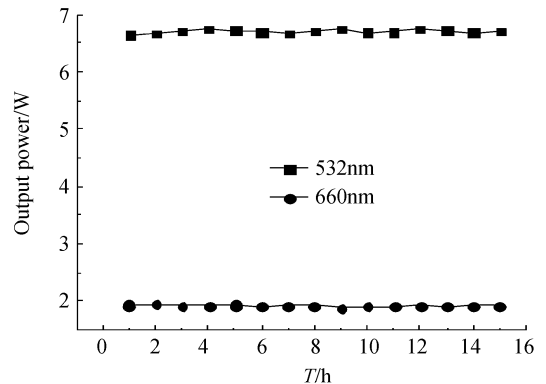


图 7 532 nm, 660 nm 双波长运转输出功率稳定性曲线  
Fig. 7 Stability curve of 532 nm & 660 nm dual-wavelength operation

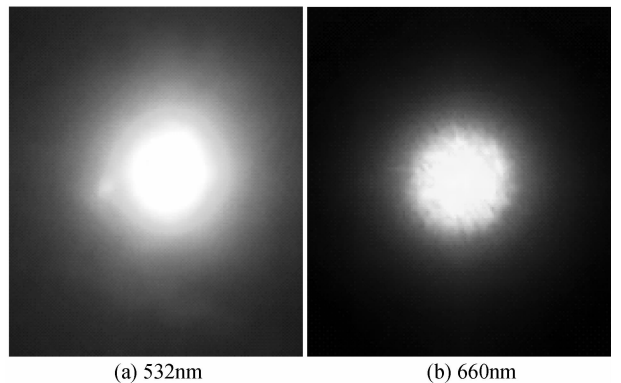


图 8 实拍 532 nm, 660 nm 光斑  
Fig. 8 Actual photograph of 532 nm & 660 nm light spot

### 3 结论

文章从侧面抽运 Nd:YAG 晶体 1 064 nm 和 1 319 nm 双波长振荡的理论出发, 通过合理的实验

光路设计,利用单块 Nd : YAG 晶体实现了 1 064 nm 和 1 319 nm 基频光同时连续运转.再通过非线性频率变换技术,采用 KTP 晶体腔内倍频获得 532 nm 和 660 nm 激光的输出.在 532 nm 和 660 nm 双波长激光同时运转准连续输出时,其最大功率分别能达到 5.34 W 和 1.353 W;单路准连续运转时 532 nm 和 660 nm 最大功率分别达到 6.72 W 和 1.902 W.在相距输出镜 2 000 mm 处拍摄了双波长激光同时运转准连续输出时 532 nm 和 660 nm 的光斑照片,光斑尺寸分别  $\varphi_{532\text{ nm}} = 4\text{ mm}$ ,  $\varphi_{660\text{ nm}} = 3.8\text{ mm}$ ,模式较好.

#### 参考文献

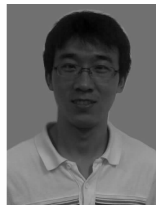
- [1] HU Cun-gang, ZONG Ren-he, LI Guo-li. Development of the instrument for diagnosis and therapy of human body information [J]. *Optoelectron Technol Inf*, 2003, **16**(1): 36-39.
- [2] WANG Zhi-yong. Research on solid-state RGB laser and its application on display technology [D]. Tianjin: Tianjin University, 2003.  
王志勇. 固体 RGB 激光光源及其在显示技术方面的应用研究 [D]. 天津: 天津大学, 2003.
- [3] YAO Jian-quan, XU De-gang. All solid state laser and nonlinear optical frequency conversion technology[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- 姚建铨, 徐德刚. 全固态激光及非线性光学频率变换技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [4] CHEN Xiu-yan, REN Zhao-yu, ZHANG Hao-lei, et al. Simultaneous generation of multi-wavelength laser from Nd : YAG Crystals in a cruciform cavity[J]. *Chin Phys Lett*, 2008, **25**(11): 3984-3987.
- [5] ZHANG L, WEI Z Y, FENG B H, et al. Simultaneous dual-wavelength Q-switched Nd : YAG laser operating at 1.06 nm and 946 nm[J]. *Opt Commun*, 2006, **264**(1): 51-54.
- [6] WANG Tao, YAO Jian-quan, YU Dao-yin, et al. Study on CW Nd : YAG laser at 1 319 nm and 660 nm[J]. *Journal of Tianjin University*, 2004, **37**(5): 377-381.  
王涛, 姚建铨, 郁道银, 等. 1 319 nm 与 660 nm 双波长 Nd : YAG 激光器的研究[J]. 天津大学学报, 2004, **37**(5): 377-381.
- [7] BU Yi-kun, ZHENG Quan, XUE Qing-hua, et al. LD-pumped Nd : YAG 946 nm / 1064 nm laser dual-wavelength operation and intracavity sum-frequency mixing[J]. *High Power Laser And Particle Beams*, 2005, **17**(S0): 19-22.  
卜铁坤, 郑权, 薛庆华, 等. LD 抽运 Nd : YAG 946nm/1 064 nm 双波长运转及腔内和频[J]. 强激光与粒子数, 2005, **17**(S0): 19-22.
- [8] ZHANG Qiang, YAO Jian-quan, WEN Wu-qi, et al. High power laser diode pumped Nd : YAG continuous wave dual-wavelength laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, **33**(5): 577-581.  
张强, 姚建铨, 温伍麒, 等. 高功率激光二极管抽运 Nd : YAG 连续双波长激光器[J]. 中国激光, 2006, **33**(5): 577-581.

## Multi-wavelength of LD Side-pumped Nd : YAG Laser

LU Bao-le, ZHANG Chen, SHI Yan, JIANG Man, BAI Jin-tao, REN Zhao-yu  
(Institute of Photonics and Photon-technology, Northwest University, Xi'an 710069 China)

**Abstract:** Dual-wavelength laser at 532 nm and 660 nm are covert from fundamental laser generated at 1 064 nm and 1 319 nm by single Nd : YAG crystal rod. On the basis of 1 064 nm and 1 319 nm dual-wavelength laser acquisition, the second harmonic wave at 532 nm and 660 nm can be achieved by using non-linear frequency conversion technology. The output power of 1 064 nm and 1 319 nm laser are 30.5 W and 8.78 W simultaneously, 35.6 W and 11.2 W respectively. The output power of 532 nm and 660 nm laser are 5.34 W and 1.353 W at 10.5 kHz and 20.5 kHz simultaneously, 6.72 W and 1.90 W respectively. The frequency-doubling conversion efficiency are 17.5% and 15.4% in the two condition mentioned above. The instability is less than 2%.

**Key words:** Dual-wavelength; Side-pumped; 1 319 nm/1 064 nm fundamental light; Non-linear frequency conversion; Acousto-optic Q-switched



**LU Bao-le** was born in 1984. He is pursuing his M. S. degree, and his research interests focus on LD pumped all-solid-state laser.



**REN Zhao-yu** is a professor and Doctoral Supervisor, and her research interests focus on the laser devices and technology, photoelectric functional materials devices and nonlinear optics and so on.