

文章编号: 0258-7025(2010)11-2795-04

# 高光束质量 515 nm 薄片激光器

王春华<sup>1,2</sup> 王卫民<sup>1</sup> 马毅<sup>1</sup> 雷军<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900; <sup>2</sup> 中国工程物理研究院北京研究生部, 北京 100088)

**摘要** 利用国产直径 10 mm, 厚度 200  $\mu\text{m}$ , 掺杂原子数分数为 10% 的 Yb:YAG 薄片建立了 16 通抽运耦合系统。通过设计的微通道冷却器冷却薄片, 获得了较好的冷却效果。在此基础上设计了 Z 型腔结构, 采用 LBO 内腔倍频, 使用声光调 Q, 重复频率为 5 kHz, 在抽运功率为 81.5 W 时获得了平均功率 10.2 W 的 515 nm 基模绿光输出, 光束质量  $M_x^2 = 1.3$ ,  $M_y^2 = 1.6$ , 脉冲宽度为 150 ns, 光-光转换(938~515 nm)效率为 12.5%。

**关键词** 激光器; 薄片激光器; 16 通抽运; Q 开关; 内腔倍频

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103711.2795

## Thin-Disk Laser at 515 nm with Good Beam Quality

Wang Chunhua<sup>1,2</sup> Wang Weimin<sup>1</sup> Ma Yi<sup>1</sup> Lei Jun<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)  
(<sup>2</sup> Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China)

**Abstract** 16-passes pump system for thin-disk laser was designed. The thin-disk was made inland with the diameter of 10 mm, thickness of 200  $\mu\text{m}$  and doping atom fraction of 10%. A micro-channel cooler was used to cool the thin-disk effectively. Based on the system, a Z type cavity was designed in this experiment. An LBO crystal was used as the nonlinear crystal for intracavity frequency doubling. Using an acousto-optic Q-switcher, with pulse repetition rate of 5 kHz, a green laser of TEM<sub>00</sub> mode with an output power of 10.2 W at 515 nm was achieved, with  $M_x^2$  of 1.3 and  $M_y^2$  of 1.6 at the optical-to-optical conversion efficiency of 12.5%. The pulse duration was 150 ns.

**Key words** lasers; thin-disk laser; 16-passes pump; Q-switch; intracavity frequency doubling

## 1 引言

Yb:YAG 晶体具有量子效率高、吸收带宽宽、荧光寿命长和掺杂浓度高等优点, 是最具发展潜力的掺 Yb<sup>3+</sup> 激光材料之一。Yb<sup>3+</sup> 的电子构型为 4f<sup>13</sup>, 仅有基态<sup>2</sup>F<sub>7/2</sub>和激发态<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub>两个电子态, 在激光上能级之上不存在更高的激发能级<sup>[1]</sup>。在晶场作用下, 能级发生分裂, 激光过程发生在上、下能级的子能级之间, 形成准三能级的激光运行机制。准三能级结构决定了 Yb:YAG 晶体阈值高且对温升敏感的特性。1993 年, Giesen 等<sup>[2]</sup>提出了单面抽运和单面冷却的薄片激光器设计思想, 同时实现减小晶体的厚度和掺杂浓度, 并且能有效冷却晶体, 使 Yb:YAG 薄片激光器迅速得到广泛应用。目前, 单个薄

片最大连续输出功率已经大于 5 kW<sup>[3]</sup>, 通过 4 片薄片实现连续输出功率达 16 kW 的商用薄片激光器已经出现在市场上<sup>[4]</sup>。近年来, 国内也相继开展了 Yb:YAG 薄片激光技术的研究, 但是发展水平同国外相比还有较大差距<sup>[5~7]</sup>。

通过 Yb:YAG 倍频变换结合波长调谐器件可以实现 515 nm 附近的可调谐激光输出。此波长激光器有望代替氩离子激光器<sup>[8]</sup> (最强波长为 514.5 nm 和 488 nm) 用于全息、干涉和光存储等, 其在生物化学、医疗等领域也有广泛的应用, 此外它还是抽运钛宝石激光器和染料激光器的理想抽运源。本文通过建立的 16 通抽运 Yb:YAG 薄片系统, 利用 LBO 内腔倍频, 使用声光(AO)调 Q, 获得

收稿日期: 2010-04-28; 收到修改稿日期: 2010-06-10

作者简介: 王春华(1983—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光二极管抽运固体激光器方面的研究。

E-mail: wangch0515@163.com

导师简介: 王卫民(1965—), 男, 研究员, 主要从事全固态激光技术方面的研究。E-mail: weimin\_653@163.com

了较高效率的高重复频率 515 nm 绿光输出。

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示,薄片的左端面作为一个腔镜,与 3 个平凹腔镜构成 Z 型腔,腔长为 1.89 m。使用声光调 Q,倍频晶体为 LBO,倍频光经过两个平凹透镜双端输出。由于 LBO 的接受谱宽较大,所以并未在腔内插入线宽压缩器件。

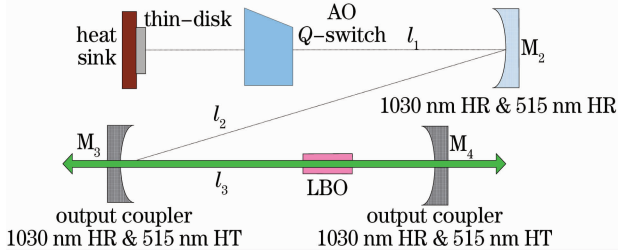


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Scheme of the experimental setup

### 2.1 耦合系统

实验使用带尾纤输出的连续抽运模块 (JENOPTIK, Laser diode GmbH, Germany), 最大输出功率为 200 W, 在 25 °C 时的中心发射波长为 938 nm, 谱宽为 6 nm, 尾纤的芯径为 0.6 mm, 数值孔径为 0.22。

为了将光纤输出的抽运光导入到耦合系统中, 需要对光纤输出激光进行准直, 采用单透镜对光纤输出的光进行准直。准直后光斑的发散角(半角)约为 30 mrad, 束腰半径约为 2 mm。准直的抽运光, 进入如图 2 所示的耦合系统实现 16 通抽运<sup>[9]</sup>。系统主要由主反射镜和次反射镜两部分组成。为了消除像散, 主反射镜采用抛物面镜, 曲率半径为 45 mm。次反射镜由两块特殊设计的 90° 直角棱镜组合而成。准直后的抽运光通过主反射镜耦合到薄片上, 从薄片出射未被吸收的抽运光通过主反射镜再次准直后, 被次反射棱镜反射回主反射镜反射面的另一部分, 从另一个方向再次被耦合到薄片的同一位置上。这个过程将重复, 直到实现抽运光 16 通抽运薄片, 薄片上的抽运光斑半径约为 1 mm。

通过优化计算<sup>[10]</sup>, 选择国产 Yb:YAG 薄片, 其直径为 10 mm, 厚度为 200 μm, Yb<sup>3+</sup> 掺杂原子数分数为 10%。薄片冷却面镀膜为 938 nm HR & 1030 nm HR, 作为一个腔镜。另一面镀膜为 938 nm HT & 1030 nm HT。采用特殊的焊料将 Yb:YAG 薄片焊接在与其热膨胀系数相当的钨铜合金微通道冷却器上, 高效冷却薄片, 以减小薄片工作时的热效应。

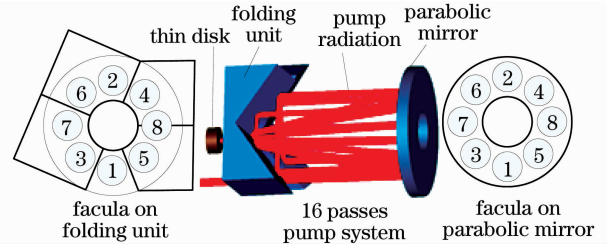


图 2 16 通薄片抽运结构

Fig. 2 16-passes pump system of thin disk

### 2.2 倍频晶体

LBO 有较小的走离角和较宽的接受带宽, 采用 LBO 作为倍频晶体, 通过 I 类非临界相位匹配 (NCPM) 实现倍频变换, 匹配温度为 423 K, 切割角度为  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 7.5^\circ$ , 最佳有效非线性系数为 0.8433 pm/V, 如图 3 所示。计算得到倍频光的走离角为 4.3 mrad, 结合下文谐振腔设计结果, 可知孔径长度约为 74 mm。LBO 主要参数如表 1 所示, 双端镀膜为 1030 nm HT & 515 nm HT, 尺寸为 6 mm × 6 mm × 20 mm。

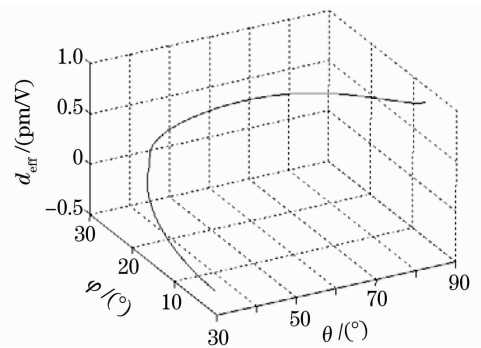


图 3 LBO I 类非临界相位匹配角, 423 K

Fig. 3 Phase matching angle of LBO, NCPM I, 423 K

表 1 LBO 倍频参数

Table 1 Frequency-doubling parameters of LBO

Crystal	Phase matching type	$d_{\text{eff}} /$ (pm/V)	Walk-off angle / mrad	Accepted angle / (mrad · cm <sup>-1</sup> )	Accepted spectrum width / (nm · cm <sup>-1</sup> )	Accepted temperature / (°C · cm <sup>-1</sup> )
LBO	1030(o) + 1030(o) = 515(e)	0.8433	4.3	14.66	1.1	5.18

## 2.3 谐振腔设计

谐振腔设计为 Z 型腔, 灵活控制束腰在倍频晶体处的大小, 以提高倍频晶体上的功率密度, 从而提高倍频效率。薄片的热效应很小, 这有利于设计合理的谐振腔, 实现束腰落在倍频晶体上的同时获得较好光束质量的激光输出。

利用 ABCD 矩阵模拟, 选取合适的谐振腔参数。选取臂  $l_1$  长度为 600 mm, 臂  $l_2$  长度为 800 mm, 臂  $l_3$  长度为 490 mm, 全反镜  $M_2$  曲率半径  $R_2 = -2000$  mm, 输出镜  $M_3$  曲率半径  $R_3 = -600$  mm, 输出镜  $M_4$  曲率半径  $R_4 = -250$  mm。薄片的左端面作为一个全反镜, 镀膜为 938 nm HR & 1030 nm HR, 右端面镀膜为 938 nm AR & 1030 nm AR。镜  $M_2$  镀膜为 515 nm HR & 1030 nm HR。镜  $M_3$  与  $M_4$  镀膜为 515 nm HT & 1030 nm HR, 倍频光由  $M_3$  和  $M_4$  双端输出。该谐振腔较长, 可以实现小的折叠角度, 可忽略像散。此谐振腔在抽运功率为 81.5 W 时, 实现了较好的模式匹配。同时, 在臂  $l_3$  上获得了腔内最小基模光斑半径 (0.18 mm), 将倍频晶体放置于该处, 可以提高倍频晶体上的功率密度实现高效转换。

## 3 实验结果及讨论

为了提高基频光的峰值功率, 采用声光调 Q, 调 Q 频率为 5 kHz。在数值模拟获得的 LBO 晶体的臂  $l_3$  上的最佳位置处摆放 LBO 晶体且多次实验微调 LBO 晶体的摆放位置, 并通过不断调节 LBO 晶体在水平和垂直两个方向的角度, 最终获得了 10.2 W 的高光束质量的 515 nm 绿光输出。

在抽运功率为 81.5 W 时, 获得了 10.2 W 的

515 nm 绿光输出, 光-光转换 (938~515 nm) 效率为 12.5%, 输出功率以及效率曲线如图 4 所示。

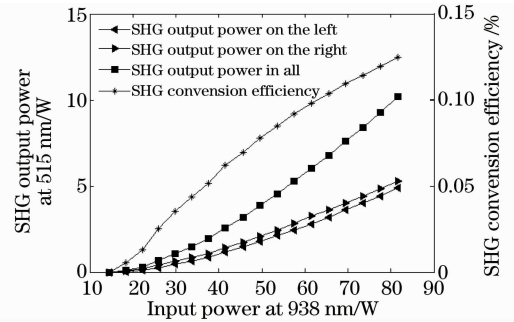


图 4 倍频光输出功率及效率与抽运功率的关系  
Fig. 4 Output power (left) and efficiency (right) of frequency doubling laser versus pump power

实验采用 Spiricon 公司的 M2-200 激光-光束分析仪测量了倍频光光束质量,  $M_x^2 = 1.3$ ,  $M_y^2 = 1.6$ , 光束质量测量图如图 5 所示。由图 5 可以看出倍频光像散值很小, 为 0.04。通过 CCD 成像抽运光斑, 发现抽运光斑偏椭圆分布。在实验中未能调节抽运光斑至完全重合, 导致抽运不均匀, 这可能是造成输出倍频光不对称的主要原因。

实验测得的倍频光脉冲宽度为 150 ns。利用 SP-500i 光谱仪测量了倍频光的光谱, 测量精度为 0.2 nm。其光谱如图 6 所示, 光谱半峰全宽 (FWHM) 约为 2 nm, 中心波长约为 514.5 nm。

实验通过半导体控温装置精确控制晶体的温度, 并在匹配温度附近通过多次实验, 控制晶体工作在最佳匹配温度。

在当前的情况下, 如果继续提高抽运功率, 可以获得更高效率的倍频光输出。由于尚处于实验探索阶段, 为了保证薄片的安全运行, 没有进一步提高抽

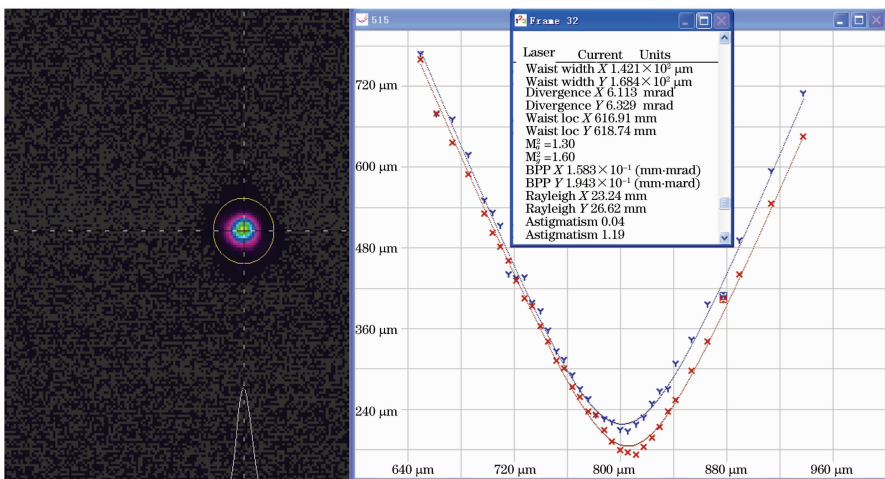


图 5 515 nm 激光光束质量测量图

Fig. 5 Beam quality of 515 nm green laser

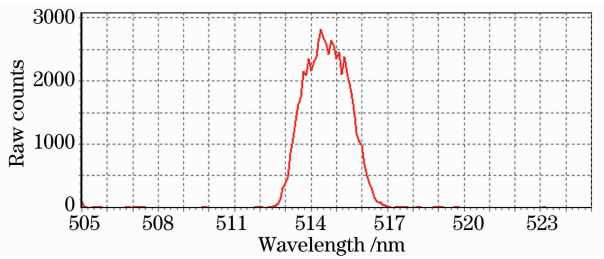


图 6 倍频光光谱图

Fig. 6 Spectrum of the frequency doubling laser

运功率,使得目前的光学效率比理想值偏低,后面将通过更多的实验,提高抽运功率以及光学效率。

## 4 结 论

利用国产直径为 10 mm,厚度为 200  $\mu\text{m}$ ,掺杂原子数分数为 10% 的 Yb:YAG 薄片,建立了 16 通抽运耦合系统。通过微通道结构冷却薄片,有效控制了薄片的热效应。利用此系统设计了 Z 型腔结构控制腔内束腰位置,并实现了较好的模式匹配。最后,通过 LBO I 类非临界相位匹配实现内腔倍频,使用声光调 Q,获得了 10.2 W 的 515 nm 绿光输出,重复频率为 5 kHz,脉冲宽度为 150 ns,光束质量  $M^2 \leq 1.6$ ,光-光(938~515 nm)转换效率为 12.5%。后面将通过更多的实验,进一步提高激光器的光学效率和光束质量。

## 参 考 文 献

- 1 G. A. Bogomolova, D. N. Vylegzhanin, A. A. Kaminskii. Spectral and lasing investigations of garnets with  $\text{Yb}^{3+}$  ions[J]. *Soviet Physics JETP*, 1975, **42**: 440
- 2 A. Giesen, H. Hügel, A. Voss *et al.*. Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers[J]. *Appl. Phys. B.*, 1994, **58**(5): 365~372
- 3 A. Giesen, J. Speiser. Fifteen years of work on thin-disk lasers: results and scaling laws [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(3): 598~609
- 4 J. Mende, E. Schmid, J. Speiser *et al.*. Thin-disk laser-power scaling to the kW regime in fundamental mode operation[C]. *SPIE*, 2009, **7193**: 71931V
- 5 Li Chao, Xu Zhen, Li Junlin *et al.*. Diode pumped Yb:YAG thin disk laser achieves 16 W output[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2002, **19**(2): 104~108  
李超,徐震,李俊林等. 二极管泵浦 Yb:YAG Thin Disk 激光器获得 16 W 连续激光输出[J]. 量子电子学报, 2002, **19**(2): 104~108
- 6 Li Lei, Yang Suhui, Sun Wenfeng *et al.*. LD-pumped Yb:YAG chip laser with high beam quality[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(11): 1285~1288  
李磊,杨苏辉,孙文峰等. 激光二极管抽运的高光束质量的 Yb:YAG 薄片激光器[J]. 中国激光, 2004, **31**(11): 1285~1288
- 7 Song Qiuming, Chen Changshui, Yin Shaotang *et al.*. LD pumped Yb:YAG laser [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2005, **22**(4): 525~527  
宋秋鸣,陈长水,殷绍唐等. 激光二极管泵浦 Yb:YAG 激光器[J]. 量子电子学报, 2005, **22**(4): 525~527
- 8 C. Bibeau, R. J. Beach, S. C. Mitchell *et al.*. High-average-power 1  $\mu\text{m}$  performance and frequency conversion of a diode-end-pumped Yb:YAG laser[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(10): 2010~2019
- 9 S. Erhard, M. Karzewski, C. Stewen *et al.*. Pumping schemes for multi-kW thin disk lasers [C]. In *Advanced Solid-State Lasers Conference OSA Trends in Optics and Photonics*, 2000, MB16
- 10 K. Contag, S. Erhard, A. Giesen. Calculations of optimum design parameters for Yb:YAG thin-disk lasers[J]. *Advanced Solid State Lasers*, 2000, **34**: 124~130