

文章编号: 0258-7025(2009)07-1719-04

# 新型 946 nm 非平面单频激光器的实验研究

巩 轲 吴克瑛 何淑芳 霍玉晶

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

**摘要** 提出了由热键合直角棱镜与角锥棱镜构成的非平面环形激光器, 通过将环形磁铁施加到材料为熔融石英的角锥棱镜上, 实现了该激光器的 946 nm 单频运转。直角棱镜由未掺杂 YAG 和 Nd: YAG 晶体热键合形成, 充当激光增益介质。采用芯径为 200  $\mu\text{m}$ , 数值孔径为 0.22 的光纤耦合半导体激光器进行端面抽运, 得到了 160 mW 的连续 946 nm 单频激光输出。

**关键词** 激光器; 单频; 环形腔; 非平面; 角锥棱镜; 激光二极管抽运

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093607.1719

## Research on Unique Non-Planar Ring Cavity Laser at 946 nm

Gong Ke Wu Keying He Shufang Huo Yujing

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** A unique non-planar ring cavity consisting of a thermally bonded Porro prism and a corner cube prism is proposed. 946 nm single-frequency operation is achieved in this cavity by applying the ring permanent magnet to the corner cube prism made of fuse silica. The Porro prism by thermally bonded un-doped YAG with Nd: YAG crystal acts as the laser gain medium. End-pumped by an optical fiber coupled semiconductor laser with core diameter of 200  $\mu\text{m}$  and numerical aperture of 0.22, the maximum continuous output power of 160 mW at 946 nm is obtained.

**Key words** lasers; single frequency; ring cavity; non-planar; corner cube; laser diode pump

## 1 引 言

高稳定单频激光在激光测量、空间通信、重力波检测及相干激光雷达等诸多领域具有重要应用价值<sup>[1~4]</sup>。在已有的单频激光器实现方案中, 由 Kane 等<sup>[5]</sup>提出的单块非平面激光器方案, 可以获得稳定高效的单频激光输出, 对其已进行了广泛研究和展<sup>[6~11]</sup>。但是这种单块结构制造难度较大, 加工成本很高, 无法实现腔内的调 Q 和倍频运转等。吴克瑛等<sup>[12~14]</sup>提出的角锥型非平面环形激光器, 通过向直角棱镜(材料为 Nd: YAG)施加磁场, 利用 Nd: YAG 的磁光特性提供法拉第旋转, 并配合角锥棱镜实现了 1064 nm 激射。但是 Nd: YAG 晶体磁光系数较弱, 通过向直角棱镜施加磁场不能有效提供

法拉第旋转, 并减小了直角棱镜的有效散热面积; 而且这种激光器使用的直角棱镜尺寸较大, 不利于 946 nm 激光及 473 nm 激光运转。

本文提出了一种基于热键合直角棱镜和角锥棱镜的新型非平面环形激光器方案, 通过角锥棱镜提供法拉第旋转, 具有结构紧凑、输出耦合可变、元件制造简单及可在腔内插入调 Q 或倍频元件等优点。

## 2 实验装置

实验中采用的光路结构如图 1 所示, 激光器由热键合直角棱镜和角锥棱镜两个光学元件构成, 采用 808 nm 半导体激光经耦合系统纵向抽运直角棱镜端面内的 Nd: YAG 晶体。角锥棱镜由熔融石英

收稿日期: 2008-12-10; 收到修改稿日期: 2009-01-07

基金项目: 国家自然科学基金(60608005)资助课题。

作者简介: 巩 轲(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事单频激光器及激光测速方面的研究。

E-mail: gongk04@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 霍玉晶(1946—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事新型全固态激光器及其应用的研究。

E-mail: hyj-dee@tsinghua.edu.cn

材料制成,通过在角锥棱镜的后方放置一块环形永磁铁,利用熔融石英材料的磁光特性,为单频激光运转提供法拉第旋转效应。直角棱镜为沿特殊方向切割的非等边结构,以使光束在  $R_5$  点发生全反射,从而在  $R_6$  点发生部分反射(图 2(b))。同时,直角棱镜充当激光增益介质,考虑到 Nd:YAG 晶体 946 nm 激光跃迁 ( $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ ) 的下能级为基态 Stark 分裂子能级,有额外的再吸收损耗,选择了厚度约 2 mm 的 Nd:YAG 晶体作为增益介质,并将 Nd:YAG 晶体与未掺杂 YAG 晶体热键合在一起,形成了图 2(b)所示的直角棱镜结构。由于 946 nm 的受激发射截面比 1064 nm 小一个数量级,在直角棱镜的出光端面采用了 1064 nm 高透 946 nm 高反的膜系,用于有效抑制 1064 nm 的寄生振荡;具体针对该端面的 946 nm 膜系,采用了 s 分量高反 ( $R_s = 99.342\%$ ),p 分量高透 ( $R_p = 62.949\%$ ) 的偏振介质膜,以提供非平面单频激光运转所需的部分线偏振器功能。

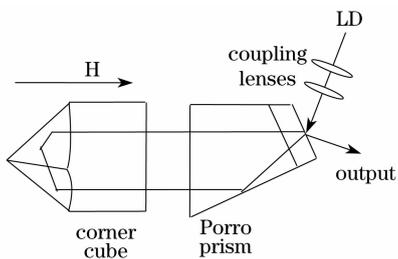


图 1 用于 946 nm 单频实验的激光器结构

Fig.1 Setup used for 946 nm single-frequency laser

### 3 单频运转分析

平面环行腔的单频运转,需要由法拉第旋转器、半波片和线偏振器组成的光学单向器。非平面环形腔与此类似,但不同点在于,构成光学单向器的三个元件均由非平面腔本身提供。角锥棱镜的圆柱部分处于永磁铁提供的磁场中,充当法拉第旋转器作用;光束在角锥棱镜中依次经历 3 次全内反射(点  $R_3, R_2, R_1$ , 图 2(a)),相当于对偏振态的相位延迟作用(即波片);而在激光输出端面的 946 nm 偏振选择输出膜,提供了偏振器作用。

文献[15]对所用激光器的冷腔偏振态情况进行了初步研究,未计入各元件的加工误差,且主要是针对角锥棱镜和直角棱镜处于对称情况下的讨论,即要求在图 2(a)中,  $MR_3, MR_1$  均与弦面  $A_1A_2A_3$  垂直,且  $MN$  平行于  $A_1A_3$ 。在未加磁场时,顺时针(CW)方向和逆时针(CCW)方向分别存在两个椭圆

偏振态(共 4 个)。CW 方向(或 CCW 方向)的两个椭圆偏振,一个是长轴方向接近 s 方向(记为 s 椭圆),另一个是长轴方向接近 p 方向(记为 p 椭圆)。由于输出耦合膜是对 s 分量高反,p 分量高透,因此 CW 和 CCW 方向的 s 椭圆得以保留,进而形成驻波,引起空间烧孔。当施加磁场后,两个方向的 s 椭圆,由于法拉第旋转的非互易作用,会产生环路损耗差。如图 3 所示(此计算要求图 2(a)中,  $MR_3, MR_1$  均与弦面  $A_1A_2A_3$  垂直,且  $MN$  平行于  $A_1A_3$ ),对于约  $0.5^\circ$  的法拉第旋转角,两个方向行波的损耗差

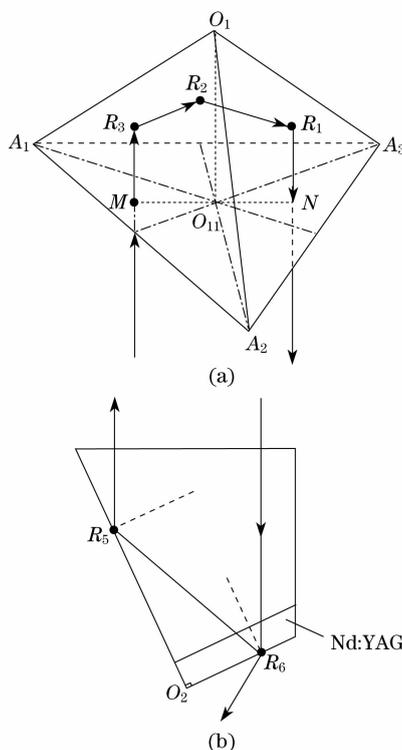


图 2 光束沿顺时针方向经过各元件的光路示意图

(a)角锥棱镜;(b)热键合形成的直角棱镜

Fig.2 Light tracing in the clockwise direction in (a) corner cube and (b) thermally bonded Porro prism

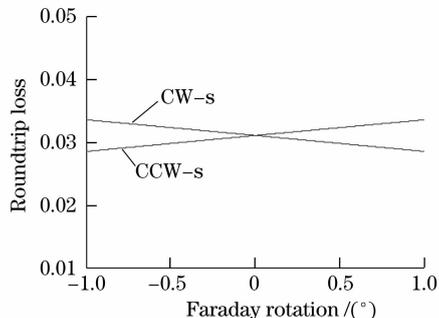


图 3 对称情况下的偏振态损耗与磁场的关系

Fig.3 Relationship between polarization state loss and the magnetic field at the symmetric situation

已经超过 0.01%，可以使损耗小的方向竞争获胜，实现单行波运转<sup>[15,16]</sup>。从图 3 还可以得出，磁场方向的不同，将改变最终获胜的单行波方向；且随着磁场增强，获胜方向的偏振态损耗将变小，同时与竞争方向的损耗差也在增大，更有利于形成单向行波。

对于特定的磁场(0.5°法拉第旋转角)，垂直入射光轴旋转角锥棱镜，使图 2(a)中的 MN 与 A<sub>1</sub>A<sub>3</sub> 不再平行，两个竞争方向的损耗差如图 4 所示。可以看出，在 MN 与 A<sub>1</sub>A<sub>3</sub> 平行时，两个竞争方向的损耗差最大，且单行波的损耗最小，因此从降低阈值和单向行波运转角度，采用这种情况比较有利；另一方面，小角度旋转角锥，将增大行波的损耗，这是因为椭圆偏振态的长轴方向及离心率的改变，影响了激光器的输出透过率，有利于更好地实现最佳输出耦合。

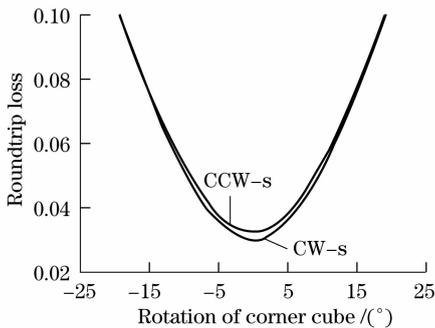


图 4 特定磁场下垂直光轴旋转角锥棱镜时的偏振态损耗变化

Fig. 4 Variation of eigen-mode polarization state loss by rotating the corner cube normally to the optical axial at a specific magnetic field

### 4 实验结果

采用芯径为 200 μm，数值孔径  $d_{NA}=0.22$  的光纤耦合半导体激光器，经两个等焦距非球面透镜构成的 1 : 1 耦合系统，将抽运能量聚焦到 Nd : YAG 晶体内部，实验结果如图 5 所示。946 nm 单频激光阈值约为 5.8 W，在光纤输出能量为 9.6 W 时，得到了 160 mW 的单频连续输出功率。实验中光束在腔内环形一周，光程约为 87 mm，对应的纵模间隔为 3.43 GHz。采用自由光谱区为 8.333 GHz 的 F-P 干涉仪(Model HH-946-200)对 946 nm 激光进行测量，在 160 mW 输出功率下测量的纵模结构如图 6 所示。由图可知，在 160 mW 输出功率下，此激光器工作在单纵模状态。

激光器的出光阈值较大及斜率效率较低，这主要是输出端面对 s 分量高反引起的，可以在保证单

频运转的情况下，将 s 分量的反射率适当降低。另外，影响此非平面激光器运转的可能因素还有：1) 角锥棱镜的塔差及直角棱镜的直角误差较大，导致环形光路经有限次往返后脱离激光能量分布区域；2) 抽运经 1 : 1 耦合后，由于抽运光斑与晶体的激光光斑匹配不好，不能有效利用能量；3) 所用光纤耦合激光的发散角很大，在保证 200 μm 聚焦光斑情况下，瑞利长度较短；除非采用滤波方法(意味着损失抽运能量)，否则不可能同时实现小光斑和小发散角度，因此可以考虑采用效率更高的高功率激光二极管经光束整形后直接抽运；4) 激光沿顺时针方向环形一周，两次通过 Nd : YAG 晶体；由于第二次进入 Nd : YAG 晶体时，没有抽运能量提供增益，使激光多经历一次再吸收损耗，并且这部分损耗不受光强饱和<sup>[17]</sup>，成为激光腔的固有损耗。以上各个因素对激光器单频运转的影响，将在以后的文章中进行详细讨论。

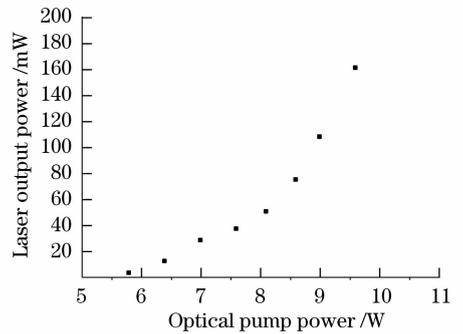


图 5 单频激光输出功率与 LD 出纤功率的关系  
Fig. 5 Single-frequency axial-mode output power versus LD pumped output power

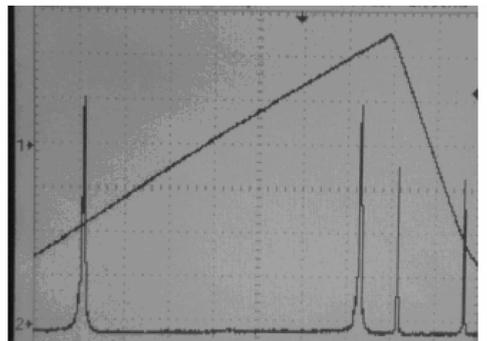


图 6 在 160 mW 输出功率下测量的激光纵模结构  
Fig. 6 Laser axial-mode structure with 160 mW output power

### 5 结 论

使用热键合形成的复合直角棱镜作为激光增益介质，通过处于磁场中(由环形永磁铁提供)的角锥

棱镜提供法拉第旋转效应,在这种非平面环形腔中实现了 946 nm 单频运转,并得到了最大输出功率为 160 mW 的连续 946 nm 单频激光输出。该激光器具有结构紧凑,输出耦合可变、元件制造简单及可在腔内插入调 Q 或倍频元件等优点,有望得到广泛的应用。可以预期,通过进一步优化激光器各参数及提高抽运功率,能够显著提高 946 nm 激光的输出功率。

### 参 考 文 献

- 1 T. Kane, W. Kozlovsky, R. Byer. Coherent laser radar at 1.06  $\mu\text{m}$  using Nd : YAG lasers[J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(4): 239~241
- 2 I. Freitag, A. Tunnermann, H. Welling. Power scaling of diode-pumped monolithic Nd : YAG lasers to output powers of several watts[J]. *Opt. Commun.*, 1995, **115**:511~515
- 3 Zheng Yaohui, Lu Huadong, Li Fengqin *et al.*. All-solid-state high-efficiency high-power Nd : YVO<sub>4</sub>/KTP laser of single-frequency operation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6):739~742  
郑耀辉, 卢华东, 李凤琴等. 全固态高输出功率单频 Nd : YVO<sub>4</sub>/KTP 激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6):739~742
- 4 Zhang Tieli, Yao Jianquan, Wang Peng *et al.*. Laser diode end-pumped, high-power continuous-wave single-frequency Nd : YVO<sub>4</sub> ring laser at 1064 nm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1194~1197  
张铁犁, 姚建铨, 王 鹏等. 端面抽运高功率连续单频 1064 nm Nd : YVO<sub>4</sub> 环形腔激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9):1194~1197
- 5 T. Kane, R. Byer. Monolithic, unidirectional single-mode Nd : YAG ring laser[J]. *Opt. Lett.*, 1984, **10**(2):65~67
- 6 Zang Erjun, Cao Jianping, Zhong Mingchen *et al.*. Stable second harmonic generation using a monolithic ring laser and an external ring cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3):335~340  
臧二军, 曹建平, 钟明琛等. 用单块激光器和环形外腔获得稳定的 532 nm 激光[J]. *光学学报*, 2003, **23**(3):335~340
- 7 Wu Keying, Wei Guanghui, Zhao Changming *et al.*. Design of diode pumped unidirectional nonplanar single-frequency ring laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(9):1245~1250  
吴克瑛, 魏光辉, 赵长明等. 激光二极管抽运非平面单向行波环形腔单频固体激光器的设计[J]. *光学学报*, 2000, **20**(9):1245~1250
- 8 I. Freitag, A. Tunnermann, H. Welling. Passively Q-switched Nd : YAG ring lasers with high average output power in single-frequency operation[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(10):706~708
- 9 E. Zang, H. Cao, K. Zhao *et al.*. Monolithic quasi-planar ring laser[C]. *SPIE*, 1998, **3549**:29~34
- 10 Q. Wang, C. Gao, Y. Zhao *et al.*. Laser-diode-pumped 1319-nm monolithic non-planar ring single-frequency laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(10): 594~596
- 11 Wang Xin, Yang Suhui, Sun Wenfeng *et al.*. Laser diode pumped high-slope-efficiency monolithic unidirectional single frequency ring laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2):149~152  
王 欣, 杨苏辉, 孙文峰等. 激光二极管抽运单块高斜度效率环形腔单频固体激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2):149~152
- 12 K. Wu, S. Yang, C. Zhao. Single-frequency Nd : YAG ring lasers with corner cube prism[C]. *SPIE*, 2000, **3929**:323~325
- 13 K. Wu, S. Yang, C. Zhao. The non-planar ring laser with the corner cube prism[C]. *SPIE*, 2000, **4223**:8~10
- 14 K. Wu, S. Yang, G. Wei. The non-planar single-frequency ring laser with variable output coupling[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **203**:323~326
- 15 Gong Ke, Wu Keying, Huo Yujing. Eigen state analysis for non-planar single frequency ring cavity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(12): 2387~2391  
巩 轲, 吴克瑛, 霍玉晶. 基于角锥棱镜的非平面单频环形腔本征态分析[J]. *光子学报*, 2008, **37**(12): 2387~2391
- 16 A. Clobes, M. Brienza. Single-frequency traveling-wave Nd : YAG laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1972, **21**(6):265~267
- 17 W. Risk. Modeling of longitudinally pumped solid-state lasers exhibiting reabsorption losses[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1988, **5**(7):1412~1423