

文章编号: 0253-2239(2009)12-3429-04

# 角锥型非平面环形激光器偏振反射镜的影响 及热稳定性分析

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** 针对热键合直角棱镜和角锥棱镜构成的 946 nm 激光器, 详细讨论了输出端 946 nm 介质膜反射镜对单频运转的影响及热稳定性问题。指出通过改变 p 分量的透射比不能有效增加腔内激光的线偏振度; 增强施加在角锥棱镜上的磁场强度, 不仅可以显著提高腔内激光的线偏振度, 减小输出激光的损耗, 而且可在提供相同环路损耗差的情况下, 降低对 946 nm 激光 p 分量的高透要求。通过传播矩阵方法, 研究了该准单块非平面环形腔的热稳定性及高斯光束能量分布问题。

**关键词** 激光器; 单频; 热键合; 环形腔; 角锥棱镜; 热透镜

**中图分类号** TN242 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092912.3429

## Output Mirror Design and Thermal Stability Analysis of Corner Cube-Based Non-Planar Ring Laser

Gong Ke Wu Keying He Shufang Huo Yujing

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

**Abstract** Influence of 946 nm dielectric output mirror on single-frequency operation and thermal stability are discussed in detail for the 946 nm laser consisting of thermally bonded Porro prism and corner cube. Degree of linear polarization inside the cavity will not increase significantly by changing the transmittance of p component, while enhancement of the magnetic field applied to the corner cube will not only raise degree of linear polarization inside the cavity efficiently and reduce the output loss, but also decrease the transmittance of p component for the same roundtrip loss difference. Thermal stability and Gaussian beam distribution of this quasi-monolithic non-planar ring cavity are studied by method of propagation matrix.

**Key words** lasers; single frequency; thermally bonding; ring cavity; corner cube; thermal lens

## 1 引 言

高稳定单频激光在重力波检测、相干激光雷达等领域具有重要应用<sup>[1,2]</sup>。在已有的单频运转方案中, 由 Kane 等<sup>[3]</sup>提出并实现的单块非平面环形激光器, 具有结构简单、机械稳定性高等优点, 可以获得高效稳定的单频激光输出, 人们对其进行了广泛研究<sup>[4~6]</sup>。但是, 这种激光器制造难度较大, 加工成本很高, 并且无法进行腔内调 Q、倍频等, 限制了它的应用范围。基于角锥棱镜的准单块非平面环形激光器, 采用了加工相对容易的角锥棱镜和直角棱镜

构成非平面环形腔(NPRC)<sup>[7~9]</sup>, 具有可变耦合输出、元件制造简单及可进行腔内倍频、调 Q 等优点, 能够有效克服单块非平面激光器的上述缺点<sup>[10]</sup>。本文针对之前已实现的 946 nm 角锥型非平面环形激光器<sup>[11]</sup>, 详细讨论了该激光器在设计中的两个关键问题, 即偏振耦合输出镜对单频运转的影响以及激光器的热稳定性问题。

## 2 角锥型 NPRC 结构

如图 1 所示, 激光器由热键合直角棱镜和角锥

收稿日期: 2009-02-17; 收到修改稿日期: 2009-03-05

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高速微粒测速等方面的研究。

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及应用等方面的研究。

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

棱镜两个光学元件构成,808 nm 半导体激光经耦合透镜后纵向抽运直角棱镜内的 Nd:YAG 晶体,产生的 946 nm 单频单向激光,沿顺指针(CW)方向环形一周由直角棱镜端面输出。

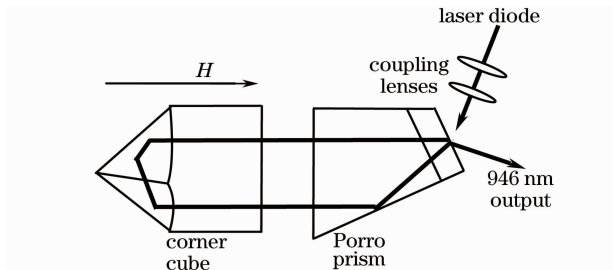


图 1 角锥型 946 nm 准单块非平面环形激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic of corner cube-based 946 nm NPRC

通过向石英角锥棱镜施加磁场,为单频激光运转提供法拉第旋转效应;在直角棱镜输出端面,镀有对 946 nm s 分量高反,p 分量高透的介质膜反射镜,以提供非平面单频激光运转所需的部分线偏振器功能;此外,角锥棱镜三个直角面上的全内反射等效提供了单频运转所需的波片作用。以上三种作用在激光器内部形成本征光学单向器,从而保证 946 nm 激光的单频运转。由于 Nd:YAG 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,选择了约 2 mm 厚的 Nd:YAG 晶体作为增益介质,并将该晶体与未掺杂 YAG 晶体热键合在一起,形成有利于减小损耗和增强散热的复合直角棱镜结构(如图 1 所示)。目前,本实验室已成功实现了输出功率 160 mW 的 946 nm 单频激光运转,实验结果详见文献[11]。

### 3 影响单频运转的关键因素分析

直角棱镜输出端面 s 分量和 p 分量反射率的合理选择不仅影响激光输出功率、腔内模式的线偏振度,而且对激光器能否实现单频运转至关重要。改变 s 分量和 p 分量的透射比将改变腔内本征偏振态的椭圆长轴取向,从而改变 946 nm 激光的输出透射比。腔内模式的线偏振度,决定能否通过高效率的腔内倍频(I 类相位匹配)获得单向单频蓝激光输出,因此需要研究 p 分量透射比的选择对腔内偏振度的影响程度,并找到显著提高腔内线偏振度的途径。同时,输出端的 946 nm 偏振反射膜充当单频运转所需的线偏振器功能,为了提供足够的损耗差用于顺时针(CW)和逆时针(CCW)两个方向模式的竞争,对 s 分量和 p 分量的透射比选择也提出了要求。角锥型 NPRC 的各个反射面均为平面,属介稳

腔结构,其光腔稳定性需要通过热透镜维持。通过研究一定热透镜焦距下的腔内高斯光束能量分布,可以为抽运光斑与激光光斑的匹配以及内腔倍频时倍频晶体的放置提供指导。

#### 3.1 偏振反射镜及磁场对单频运转的影响

文献[11]中指出,在角锥型 NPRC 中,CW 和 CCW 方向分别存在长轴接近 s 方向的椭圆偏振态(记为 CW<sub>s</sub> 和 CCW<sub>s</sub>)和长轴接近 p 方向的椭圆偏振态;由于 s 分量高反,在未加磁场时,腔内参与竞争的本征偏振态为 CW<sub>s</sub> 和 CCW<sub>s</sub>;这两个模式中具体哪一个获胜,则与磁场方向有关;为保证最大的环路损耗差,应使角锥棱镜和直角棱镜处于对称光路位置。以下讨论及计算中使用的琼斯矩阵结构与文献[12]相同,均要求角锥棱镜和直角棱镜处于对称光路位置,并且仅涉及参与方向竞争的 CW<sub>s</sub> 和 CCW<sub>s</sub> 两个模式;选择  $R_s = 99.342\%$ ,研究 p 分量透射比的改变对单频运转的影响。另外,实验装置的光路安排要求单频 946 nm 激光沿 CW 方向环形运转(如图 1 所示),因此选择磁场的方向使 CW<sub>s</sub> 在方向竞争中获胜。

在环形激光器中,为实现单频运转,要求 CW 和 CCW 方向竞争模式损耗差高于  $0.01\%$ [12,13],为了保证单频运转的可靠性,使用  $0.1\%$  的损耗差作为判断单频运转(即模式竞争获胜)的标准。图 2 表明在不同磁场强度(即法拉第旋转角)下,CW<sub>s</sub> 与 CCW<sub>s</sub> 的损耗差同 p 分量透射比的关系。随着 p 分量透射比的增大,一定磁场强度引起的损耗差也在同步增大。计算表明,在法拉第旋转角为  $0.5^\circ$  时,达到  $10^{-3}$  损耗差,需要 p 分量的透射比  $T_p = 19.831\%$ ;达到  $2 \times 10^{-3}$  损耗差时,需要  $T_p = 35.738\%$ 。而在  $1.5^\circ$  法拉第旋转角时,达到  $10^{-3}$  损耗差,只需要  $T_p = 7.474\%$ ;达到  $2 \times 10^{-3}$  损耗差时,

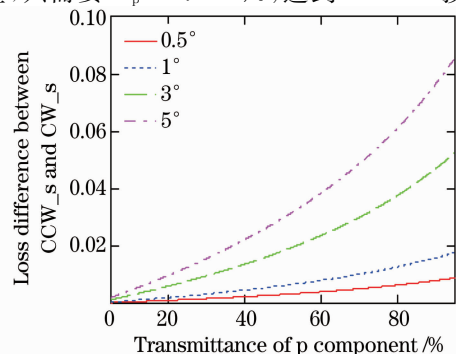


图 2 竞争模式间的损耗差随 p 分量透射比的变化

Fig. 2 Loss difference between two competitive modes varies with transmittance of p component

只需要  $T_p = 13.876\%$ 。因此增强磁场强度(即法拉第旋转角),可以显著降低单频运转所需要的最小  $T_p$ ;另外,由图 3 可知,对于相同的  $T_p$ ,磁场越大,则 CW\_s 的损耗越小;这两个因素共同决定了更大的磁场有利于在保证单频运转的情况下减小 946 nm 激光的损耗。

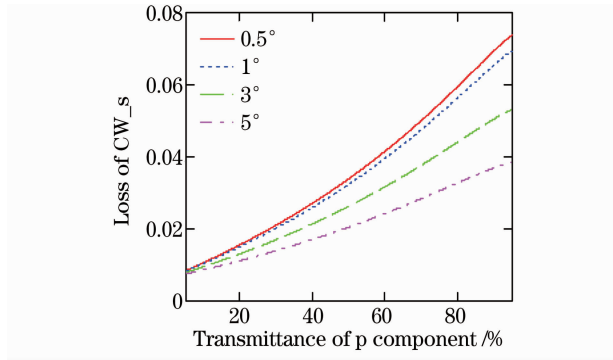


图 3 CW\_s 方向激光的透过损耗随 p 分量透射比的变化

Fig. 3 Transmitting loss of CW\_s laser varies with transmittance of p component

p 分量透射比及磁场强度对腔内及腔外线偏振度的影响分别如图 4、图 5 所示,纵轴为最大光强与最小光强之比。由图 4 可知,当 p 分量透射比从

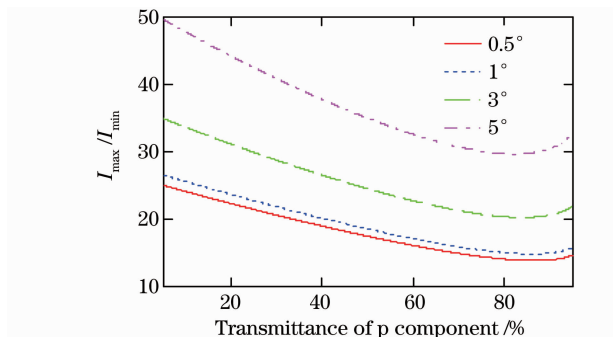


图 4 p 分量透射比对单向激光的腔内线偏振度影响

Fig. 4 Linear polarization of unidirectional laser inside the cavity varies with transmittance of p component

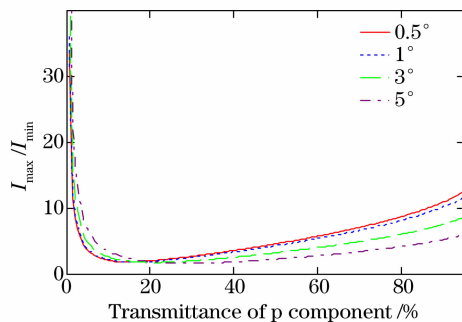


图 5 p 分量透射比对输出激光的线偏振度影响

Fig. 5 Linear polarization of output laser varies with transmittance of p component

5%到 85%变化时,内腔倍频位置处的线偏振度变化缓慢,对该透射比不敏感。这是由于 s 分量的反射率很高,所以腔内的偏振态更趋于 s 方向。如图 5 所示,在  $T_p$  大于 20%时,腔外偏振度的变化对 p 分量透射比不敏感。由图 4 中的各条曲线对比可知,增强施加在角锥棱镜上的磁场强度,是提高腔内激光线偏振度的有效途径。

### 3.2 热稳定性分析

角锥型 NPRC 的各个反射面均为平面,其谐振腔的稳定性通过热透镜焦距维持。为分析该激光腔的热稳定性,可以将 NPRC 展开成直腔,通过传播矩阵方法进行分析。

如图 6 所示,由抽运引起的热透镜位于 2 mm 厚的 Nd:YAG 晶体内 T 点。选择热透镜的位置 T(靠近 A 点的一侧)作为起始面,沿 CW 方向环形一周,可得传播矩阵  $M_T$ :

$$M_T = \begin{bmatrix} 1 & L_{AT} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_{DA}/n_{YAG} \\ 0 & 1/n_{YAG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & n_{cube}L_{air} \\ 0 & n_{cube} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & L_{cube}/n_{cube} \\ 0 & 1/n_{cube} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & n_{YAG}L_{air} \\ 0 & n_{YAG} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & L_{BT} + L_{BC} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_T & 1 \end{bmatrix}$$

式中  $L_{AT}$ ,  $L_{DA}$ ,  $L_{BT}$ ,  $L_{BC}$  分别对应图 6 中点 A 与点 T,点 D 与点 A,点 B 与点 T,点 B 与点 C 间的距离;  $f_T$  为直角棱镜中的热透镜焦距;  $L_{air}$  为角锥棱镜与直角棱镜间的空气间距;  $n_{YAG}$  及  $n_{cube}$  分别为 YAG 晶体及熔融石英的折射率。

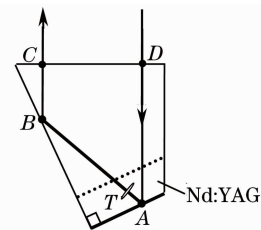


图 6 用于热稳定性计算的光路示意图

Fig. 6 Light path schematic used for calculation of thermal stability

利用  $M_T$  可以判断给定腔长及热透镜焦距下的谐振腔稳定性。同时,根据 ABCD 定律,可以得到 T 点的高斯光束半径。图 7 表明,对于不同的空气间距  $L_{air}$ , T 点高斯光束半径与热透镜焦距的关系。可以看出,  $L_{air}$  一定时, T 点高斯光束半径有最小值。并且当角锥棱镜和直角棱镜十分接近时 ( $L_{air} = 0.5$  mm) 时,此最小高斯光束半径大于  $100 \mu\text{m}$ 。因此为了实现输出激光的基横模运转,可使晶体内的

抽运光斑半径小于  $100\ \mu\text{m}$ 。

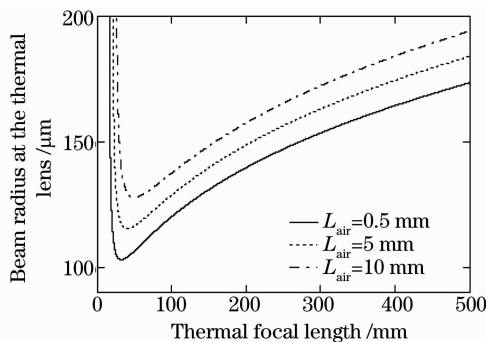


图 7 热透镜处的高斯光斑半径与热焦距的关系  
Fig. 7 Relation between Gaussian beam radius at thermal lens and thermal focal length

将  $T$  点的高斯光束分布 ( $Q$  因子) 沿整个激光器 CW 方向环行传输, 可以得出腔内各位置的高斯光斑半径。从  $A$  点 (如图 6 所示) 开始, 依次经过热透镜、空气、角锥棱镜、空气, 最后再回到  $A$  点, 可以得出图 8 所示的高斯光斑分布图。可以看出, 最小的光束半径出现在角锥棱镜内部; 而在空气介质中, 越靠近角锥棱镜, 光斑半径越小。因此, 下一步将倍频晶体插入角锥型 NPRC, 进行腔内腔倍频实验时, 应使倍频晶体尽量靠近角锥棱镜一侧。

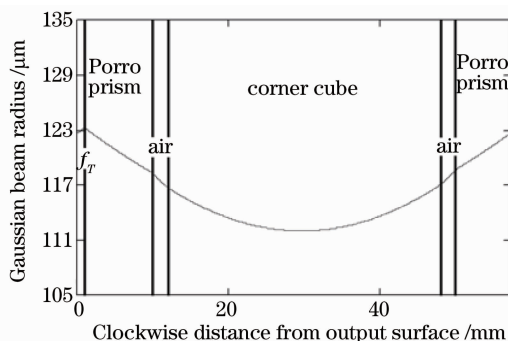


图 8 角锥型 NPRC 的高斯光束半径分布 (100 mm 热焦距)  
Fig. 8 Gaussian beam radius in corner cube-based NPRC with 100 mm thermal focal length

## 4 结 论

通过偏振态分析研究了 946 nm 偏振分量的反射率对激光运转的影响, 指出通过改变  $p$  分量的透射比不能有效增加腔内激光的线偏振度。当  $p$  分量透射比从 5% 到 85% 变化时, 内腔倍频位置处的线偏振度变化缓慢。而通过增强施加在角锥棱镜上的磁场强度, 不仅可以显著增加内腔倍频位置处的激光线偏振度, 减小输出激光的损耗, 而且可在提供相同损耗差的情况下, 降低对 946 nm 激光  $p$  分量的高透射比要求。通过传输矩阵方法, 研究了该准单

块 NPRC 的热稳定性及高斯光束能量分布。当角锥棱镜和直角棱镜十分接近时 ( $L_{\text{air}} = 0.5\ \text{mm}$ ) 时, 热稳定腔在端面处的最小高斯光斑半径小于  $100\ \mu\text{m}$ , 为了实现输出激光的基横模运转, 应使抽运光斑半径小于  $100\ \mu\text{m}$ 。当进行内腔倍频研究时, 应尽量使倍频晶体靠近角锥棱镜一侧, 以获得更高的腔内倍频效率。以上研究对于进一步提高角锥型非平面环形激光器的性能具有重要指导意义。

## 参 考 文 献

- Freitag, A. Tünnermann, H. welling. Power scaling of diode-pumped monolithic Nd:YAG lasers to output powers of several watts[J]. *Opt. Commun.*, 1995, **115**: 511~515
- Thomas J. Kane, W. J. kozlovsky, Robert L. Byer. Coherent laser radar at 1.06  $\mu\text{m}$  using Nd:YAG lasers[J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(4): 239~241
- Thomas J. Kane, Robert L. Byer. Monolithic, unidirectional single-mode Nd:YAG ring laser[J]. *Opt. Lett.*, 1985, **10**(2): 65~67
- 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
- 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
- Wang Qing, Gao Chungqing, Wei Guanghui. Analysis of monolithic nonplanar ring oscillators by considering the stress-induced birefringence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 279~283  
王青, 高春清, 魏光辉. 考虑晶体应力情况下的单块非平面环形腔分析[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 279~283
- Wu Keying, Yang Suhui, Zhao Changmin *et al.*. Single-frequency Nd:YAG ring lasers with corner cube prism[C]. *SPIE*, 2000, **3929**: 323~325
- Wu Keying, Yang Suhui, Zhao Changmin *et al.*. The non-planar ring laser with the corner cube prism[C]. *SPIE*, 2000, **4223**: 8~10
- 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
- Wu Keying, Yang Suhui, Wei Guanghui *et al.*. The non-planar single-frequency ring laser with variable output coupling[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **203**: 323~326
- Gong Ke, Wu Keying, He Shufang *et al.*. Research on unique non-planar ring cavity at 946 nm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1719~1722  
巩轲, 吴克瑛, 何淑芳等. 新型 946 nm 非平面单频激光器实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1719~1722
- 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
- Clobes A, Brienza M. Single-frequency traveling-wave Nd:YAG laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1972, **21**(6): 265~267