

角锥型全固态非平面环形激光器 473 nm 单频运转*

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: 提出并实现了由热键合直角棱镜与角锥棱镜构成的新型 946 nm 及 473 nm 单频非平面环形激光器. 直角棱镜由无掺杂的 YAG 晶体和 2 mm 厚的 Nd: YAG 晶体热键合形成, 可提供激光增益、光路闭合及对 946 nm 激光起偏等多种复合功能. 角锥棱镜由熔融石英材料构成, 在环形永磁体作用下, 提供法拉第旋转作用. 实验上实现了该结构的 946 nm 腔内倍频, 并获得了 473 nm 单频单向激光输出.

关键词: 蓝光; 环形腔; 非平面; 单频; 腔内倍频
中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

文章编号: 1004-4213(2009)12-3049-3

0 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. 已有的单频激光方案包括短腔法^[1]、F-P 标准具法^[2]、扭转模腔法^[3]、基于光学单向器的平面环形腔方法^[4]及非平面环形腔 (Non-Planar Ring Cavity, NPRC) 法等. 与其他方案相比, 由 Kane 等^[5]首次提出的单块非平面激光器方案, 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, 已被深入广泛地研究^[1-2, 6-8]. 但是, 单块 NPRC 的制造难度大, 加工成本较高, 并且无法进行腔内调 Q、倍频等, 限制了它的应用范围. 为克服该类激光器的上述缺点, 本文设计了由热键合直角棱镜和角锥棱镜构成的准单块非平面环形激光腔结构, 在 946 nm 单频实验的基础上, 对 473 nm 腔内倍频的单频运转情况进行了实验研究. 由于 Nd: YAG 晶体 946 nm 激射对应的激光跃迁为 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$, 激光下能级为基态的 stark 分裂子能级, 对所产生的 946 nm 激光有额外的再吸收损耗; 为降低此再吸收损耗, 增益介质采用了厚度约 2 mm 的 Nd: YAG 片状晶体. 此类角锥型 NPRC 与单块 NPRC 基于相似的单频运转机制, 能够产生高稳定单频激光, 同时还具有输出耦合可变、元件制造简单及可进行腔内倍频、调 Q 等独特优点^[9].

1 角锥型非平面腔单频运转研究

1.1 角锥型非平面环形腔设计

如图 1, 角锥型非平面环形激光器由热键合直角棱镜和角锥棱镜两部分构成. 半导体激光器经过耦合透镜端面抽运直角棱镜中的 Nd: YAG (1% 浓

度掺杂) 晶体, 946 nm 激光沿顺时针方向环行 (图 1), 依次通过直角棱镜、角锥棱镜, 最后由直角棱镜端面输出. 如图 2, 直角棱镜由无掺杂的 YAG 晶体与作为激光增益介质的 Nd: YAG 晶体热键合形成, 光束在直角棱镜的一个直角面上保持全内反射 (A 点), 在另一个直角面上发生部分反射 (B 点). B 点所在端面镀有特殊的介质膜反射镜, 它对 946 nm 的 S 分量高反 (反射率为 99.3%), 对 P 分量高透 (反射率为 62.9%), 对 473 nm、808 nm 高透, 同时还对 1 064 nm 高透, 以抑制 1 064 nm 的寄生振荡. 角锥棱镜由熔融石英材料制成, 配合环形永磁铁, 以提供光学单向器所需的法拉第旋转作用. 实验中采用角锥棱镜提供法拉第旋转, 而没有利用 YAG 晶体自身的磁光性质, 这样使磁光介质的选择不受制于增益介质的限制, 从而能够采用磁光系数更大的

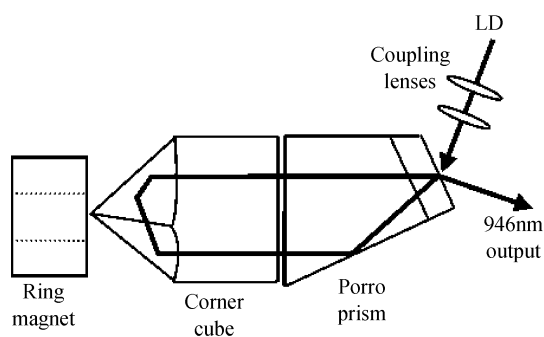


图 1 角锥型准单块 946 nm 非平面激光器
Fig. 1 Corner cube based quasi-monolithic non-planar ring cavity at 946 nm

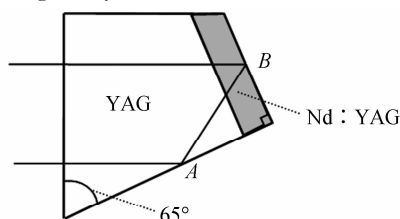


图 2 复合直角棱镜结构与工作原理
Fig. 2 Schematic of the composite Porro prism

* 国家自然科学基金 (60608005) 资助

[†] Tel: 010-62784944 Email: hyj-dee@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2009-02-11

修回日期: 2009-06-13

玻璃材料制作角锥棱镜. 此外,减小角锥棱镜的直径,使其置于环形磁铁的内环,有利于增强磁场强度,提高单频运转的可靠性.

由热键合方法形成的直角棱镜,实现了多种复合功能:1)放大并输出 946 nm 激光,通过沿轴旋转角锥棱镜,可进一步调节 946 nm 激光的能量透过率;2)对 946 nm 激光具有偏振选择作用,提供 946 nm 单频运转所需的部分偏振器功能;3)输出 473 nm 蓝激光,用于腔内倍频实验研究;4)充当两个反射镜,以闭合来自角锥棱镜的光束,增加了机械稳定性;5)热键合结构不仅减小准三能级再吸收损耗,还改善了 Nd:YAG 晶体的散热条件,减小热透镜效应.

单块 NPRC 单频输出机理的本质,是利用非平面光路引起的多次全反射,使等效波片的主轴方向和偏振反射镜的主轴方向不相同,从而在磁场提供的非互易法拉第旋转作用下使逆时针方向传播的行波受到比顺时针方向行波更大的损耗(顺时针方向输出情况),再通过模式竞争实现均匀展宽(Nd:YAG)激光器的单纵模运转.角锥型 NPRC 基于相似的单频运转机制^[10],考虑到磁场施加到角锥棱镜上,与单块 NPRC 的显著不同在于图 2 中 A 点的全反射,该点的全内反射也引起了附加相移.由图 3 可以看出,A 点(图 2)引入的全反射相移,在同样的磁场强度下,有利于提供更大的环路损耗差.

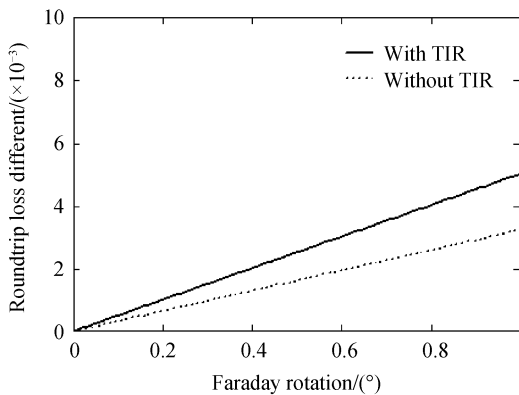


图 3 直角棱镜中全反射点对单频运转的影响

Fig. 3 Effect of total internal reflection (TIR) in Porro prism on the single-frequency operation

1.2 腔内倍频方式获得 473 nm 单频运转

在图 1 的激光腔内插入倍频晶体将会引入附加双折射作用,可能会对基频 946 nm 激光的单频运转产生扰动,破坏其单频运转状态.对直角棱镜与角锥棱镜构成的非平面环形腔进行本征态分析时,倍频晶体的附加双折射相位可以归入输出点 S、P 分量反射系数的相位中,则可以在理论上对此双折射影响进行计算^[10].实验上,通过对倍频晶体进行控温,从而有效降低倍频晶体附加双折射相位的影响.

腔内倍频蓝光的实验装置如图 4,采用芯径为 200 μm , N. A=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.在 946 nm 实验装置(图 1)的基础上,插入 $2 \times 2 \times 5$ mm 的 I 类匹配 LBO 晶体进行腔内倍频.输出激光经过对 808 nm 和 946 nm 的滤光片后进入 473 nm F-P 扫描干涉仪 (Model HH-473-200, 自由光谱区为 3.75 GHz),进行纵模结构测量.

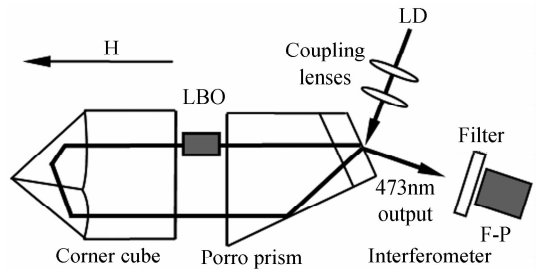


图 4 473nm 腔内倍频实验装置

Fig. 4 Corner-cube based quasi-monolithic non-planar ring cavity at 946 nm

在实验中,当磁场沿某一方向时,顺时针(Clock Wise, CW)方向的 473 nm 蓝激光没有输出,但可以观察到逆时针(Counter Clock Wise, CCW)方向蓝激光的反射光斑;此时反转磁场方向,可以观察到 CW 方向的 473 nm 蓝激光变强,而 CCW 方向的反射光斑消失.以上现象表明施加磁场后,腔内 473 nm 激光为单行行波,从而说明 946 nm 基频激光也为单向行波运转.473 nm 激光的纵模结构测量结果如图 5,可知激光器工作在 473 nm 单纵模运转状态,这表明实验中倍频晶体的引入没有破坏 946 nm 基频光的单频运转.

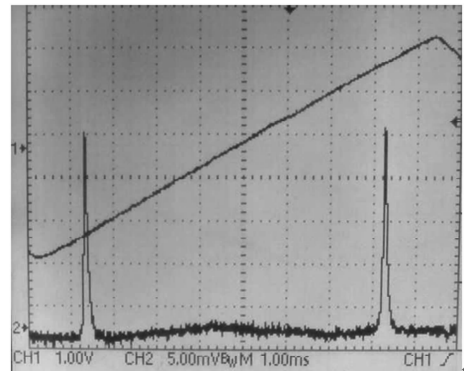


图 5 角锥型 NPRC 内腔倍频 473 nm 纵模结构

Fig. 5 Axial-mode structure of corner cube based 473nm NPRC by intracavity-frequency-doubling

当直角棱镜与角锥棱镜相距很近(约 1 mm)时,实验上已在 9.6 W 抽运功率下,得到了 160 mW 单频 946 nm 激光输出^[11].随着直角棱镜和角锥棱镜二者间距的加大,946 nm 基频光功率有所下降;同时由于实验中环形磁铁提供给角锥棱镜的磁场强

度较低,影响了腔内激光的线偏振度^[12];因此当插入 LBO 晶体倍频时,实验上仅得到了 2 mW 的 473 nm 单频蓝激光输出. 进一步实验,需要重新设计磁铁结构,增强提供给角锥棱镜的磁场强度,从而降低基频激光的等效透过率,增强基频光的腔内线偏振度^[12].

2 结论

采用热键合的直角棱镜和角锥棱镜构成了新型 946 nm 及 473 nm 单频非平面环形激光器. 实验上在准单块激光腔结构中,以腔内倍频方式获得了 473 nm 单频单向激光输出,这说明实验中倍频晶体引入的双折射和基频光损耗没有破坏 946 nm 基频光的单频运转. 与单块 NPRC 相比,角锥型 NPRC 具有结构紧凑,输出耦合可变,元件制造简单优点,可以预期,经过进一步的优化设计,该激光器性能可得到进一步提高,有望获得广泛的应用.

参考文献

- [1] LV L, WANG L, FU P, *et al.* Diode-pumped self-Q-switched single-frequency 946 nm Nd³⁺, Cr⁴⁺: YAG microchip laser [J]. *Opt Lett*, 2001, **26**(2):72-74.
- [2] ZHANG X, JU Y, WANG Y. Diode-pumped single frequency Tm, Ho: YLF laser at room temperature[J]. *Chinese Optics Letters*, 2005, **3**(8):463-465.
- [3] PAN H, XU S, ZENG H. Passively Q-switched Single-longitudinal-mode c-cut Nd: GdVO₄ laser with a twisted-mode cavity[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(7):2755-2760.
- [4] ZHENG Yao-hui, ZHANG Kuan-shou. All-solid-state blue laser of single-frequency operation end-pumped by diode laser [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2004, **10**(1):42-46.

- 郑耀辉, 张宽收. LD 端面抽运的全固化单频蓝光激光器[J]. *量子光学学报*, 2004, **10**(1):42-46.
- [5] KANE T, BYER R. Monolithic, unidirectional single-mode Nd: YAG ring laser[J]. *Opt Lett*, 1985, **10**(2):65-67.
- [6] YAO B, DUAN X, FANG D, *et al.* 7.3 W of single frequency output power at 2.09 μm from an Ho: YAG monolithic nonplanar ring laser[J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(18):2161-2163.
- [7] ZANG E, CAO J, LI Y, *et al.* Single-frequency 1.25 W monolithic lasers at 1123 nm[J]. *Opt Lett*, 2007, **32**(3):250-252.
- [8] WANG Q, GAO C, ZHAO Y, *et al.* Laser-diode-pumped 1.319 nm monolithic non-planar ring single-frequency laser [J]. *Chinese Optics Letters*, 2003, **1**(10):594-596.
- [9] WU K, YANG S, WEI G. The non-planar single-frequency ring laser with variable output coupling [J]. *Optics Communications*, 2002, **203**(3-6):323-326.
- [10] GONG Ke, WU Ke-ying, Huo Yu-jing. 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.
- [11] GONG Ke, WU Ke-ying, He Shu-fang, *et al.* Research on a unique non-planar ring cavity at 946nm[J]. *Chinese Journal of 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.
- [12] GONG Ke, WU Ke-ying, He Shu-fang, *et al.* Output mirror design and thermal stability analysis of corner cube based non-planar ring laser[J]. *Acta Optica Sinica* (Accepted).
- 巩轲, 吴克瑛, 何淑芳, 等. 角锥型非平面环形激光器偏振反射镜影响及热稳定性分析[J]. *光学学报* (已录用).

473 nm Single-frequency Operation of Corner Cube Based Solid-state Non-planar Ring Cavity

GONG Ke, WU Ke-ying, HE Shu-fang, HUO Yu-jing

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

Abstract: A unique 946 nm and 473 nm single-frequency non-planar ring cavity (NPRC) constituted of a thermally bonded Porro prism and a corner cube is proposed. By thermally bonding the YAG crystal with 2 mm thick Nd: YAG crystal, the Porro prism supplies multi-functions such as laser amplification, closing the light path, polarization sensitivity to the 946 nm and so on. By applying the ring permanent magnet, the corner cube made of fuse silica is used to supply Faraday rotation effect. 473 nm single-frequency and unidirectional blue laser by intracavity-frequency-doubling is achieved in the experiment.

Key words: Blue laser; Ring cavity; Non-planar; Single-mode; Intracavity-frequency-doubling

GONG Ke was born in 1982. Now he is pursuing his Ph. D. degree at Department of Electronic Engineering, Tsinghua University. His research interests focus on velocity measurement of hyper-speed micro-object and LD-pumped solid-state single-frequency laser.

