

# 全光纤复合腔环形激光器及旋转 传感的实验研究

陈 健 艾和志 陈智浩 顾东华 唐平生 刘小明 彭江得

(清华大学电子工程系 北京 100084)

**提要** 利用内插窄带双锥光纤滤波器的复合腔共振选模原理和近阈值运转状态下腔内自建可饱和吸收对双向共振模的去耦作用, 研制成线宽小于 4 MHz 的双向、同时、同频、单纵模振荡的全固化掺铒光纤环形激光器, 并实现了全光纤环形激光器旋转传感测量。

**关键词** 全光纤环形激光器, 旋转, 传感

光纤激光器因其诸多优良特性而受到重视, 其中环形腔光纤激光器又因其结构及工作方式的灵活多样性而发展成一个重要的门类。然而, 根据环形激光理论可知<sup>[1]</sup>, 由于光纤激光物质以均匀展宽为主的谱特性及腔内沿相反方向两路行波的相互作用及模间竞争, 一般不可能获得单模输出。因此, 迄今报道的单模光纤环形激光器都在腔内设置光隔离器, 尽管最窄线宽已近 1 kHz<sup>[2]</sup>, 但都只能单向输出, 不能满足某些特殊应用(如陀螺)的要求。新近报道了利用光纤环形激光器进行旋转传感测量, 但必须在腔内设置法拉第旋光器消除空间“烧孔”以实现双向不同频率的单模激射<sup>[3]</sup>。

作者曾利用内插窄带双锥光纤滤波器的复合腔共振选模原理和近阈值运转状态下腔内自建可饱和吸收对双向共振模的去耦作用, 用磨抛拼接型可调谐光纤耦合器研制成 1480 nm LD 泵浦的复合腔掺 Er<sup>3+</sup> 全光纤环形激光装置, 实现了同频单纵模的双向同时激射, 测得输出激光线宽 < 4 MHz<sup>[4]</sup>。最近, 又采用熔烧型光纤耦合器研制成全固化的 980 nm LD 泵浦的复合腔掺 Er<sup>3+</sup> 全光纤环形激光器, 并成功地进行了旋转传感实验。

## 1 激光器设计

复合腔全光纤环形激光器结构示于图 1。采用 980 nm LD 作泵浦源, 工作于 1.5 μm 的掺 Er<sup>3+</sup> 光纤数值孔径为 0.21, 对激光和泵浦光的吸收分别为 4.57 dB/m 与 3.29 dB/m。熔烧型波分复用(980/1550 nm) 光纤合波器 WDM 1 和 WDM 2 将掺铒光纤连成复合环形腔, WDM 2 对泵浦光和激光的功率耦合率分别为 20% 和 50%, 其一对耦合臂通过两段 1 m 长的掺铒光纤与一个带宽 5 nm 的双锥光纤滤波器连成子环形腔 2。另两光纤臂分别通过 1 m 长的掺 Er<sup>3+</sup> 光纤与 WDM 1 的一对耦合光纤臂连成对称的主腔 1, 而 WDM 1 的另两臂分别通过同类合波器

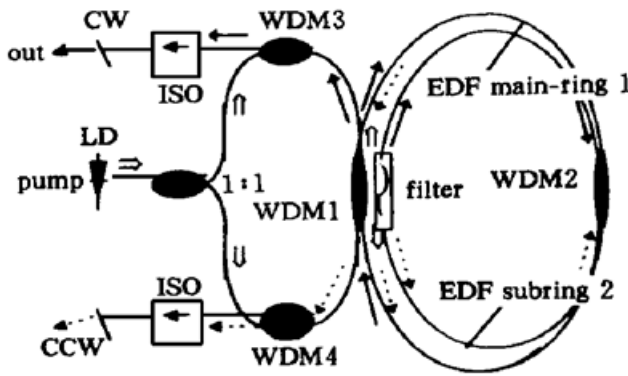


图 1 全光纤复合腔环形激光腔结构

Fig. 1 All-fiber compound ring laser cavity

WDM3 和 WDM4 对泵光的直通臂和一个分光比为 1:1 的光纤耦合器与 980 nm LD 泵浦源相连。于是, 泵浦光分成等功率的两路直通环内, 分别沿顺、逆时针方向对称激励。腔内激光则通过 WDM1 的强耦合形成低损耗振荡环路, 经 WDM1 的出射激光分别从 WDM3 和 WDM4 的耦合臂输出。

由于在具有均匀展宽谱特性的光纤环形激光腔中, 任何光反馈形成的驻波都将引起空间“烧孔”而导致多模振荡。因此, 在激光器设计中选择了透射式的双锥光纤滤波器; 为消除光纤端面光反射

的干扰, 在 WDM3 和 WDM4 的两个耦合输出端分别放置光隔离器 ISO1 和 ISO2; 另外, 在制作工艺中, 应使焊点损耗减至最小。

上述复合腔全光纤环形激光腔结构设计的关键之点为:

(1) 对称双向激励的全光纤环形激光腔中应存在单模选择振荡机制: 主要通过互相耦合的两个环形腔的模式共振和双锥光纤滤波器两者共同运作来实现。由于掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤的荧光谱宽近 30 nm, 而单个 2 m 长环形腔的纵模间隔 ( $|\Delta\lambda| = \lambda^2/nL$ ) 仅为 0.0008 nm, 增益谱宽内的谐振模数多达  $10^4$  量级。当两个环形腔耦合成复合腔时, 只有同时满足两个环形腔谐振条件的共振模式才能形成激光振荡。假如两个环形腔的腔长基本相等, 取工艺允许的腔长差  $\Delta L$  为 1 mm, 则共振模间距 ( $|\Delta\lambda| = \lambda^2/n\Delta L$ ) 加宽到 1.6 nm (或 200 GHz), 因而在双锥光纤滤波器的 5 nm 带宽内只可能存在很少的几个共振模式, 这就有可能使处于滤波峰值处的共振模式优先起振而实现单模激射。

(2) 单模激射的全光纤环形激光器中应存在双向振荡模场的去耦机制: 这主要通过控制泵浦强度使光纤激光器近阈值运转、并在子腔内自建可饱和吸收机制的双重作用来实现。对于三能级的掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤, 激光下能级为基态, 泵浦强度不仅直接影响极化强度中双向模场的耦合项, 而且均匀展宽的影响范围也随泵浦的增强而增大。因此, 使激光器近阈值运转是使模间耦合减弱的有效途径。特别是在复合腔情况下, 适当选择共用耦合器 WDM2 的耦合比, 不仅可改变两个腔间激射光的耦合强度以实现共振选模振荡, 还可改变泵浦功率在两个腔中的分配, 在保证主腔激射的条件下使子腔中的掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤段因泵浦不足而不致“漂白”, 致使子腔实际上对激射光起可饱和吸收体的作用, 从而进一步强化双向共振模场间的去耦作用, 使单纵模双向同时振荡成为可能。

## 2 实验结果

对内插双锥光纤滤波器的全固化复合腔全光纤环形激光器的单模运转及其旋转传感特性进行了实验论证。

### 2.1 复合腔全光纤环形激光器的单模运转

在复合腔全光纤环形激光器的单模运转中, 双锥光纤滤波器起了关键的作用。首先, 用扫描光谱仪 (ANDOAQ-141713) 对未加双锥光纤滤波器的全光纤环形激光器的输出激光特性进行了观测 (横坐标: 波长, 1 nm/div; 纵坐标: 相对强度, 5 dB/div), 从图 2 所示光谱可见, 激光

线宽约为 0.8 nm (100 GHz), 在频谱仪(HP8393E)上显示出多模拍频谱, 如图 3 所示(横坐标: 频率, 40 MHz/div; 纵坐标: 相对强度, 10 dB/div)。其频率间隔大约为 50 MHz, 通过理论可以计算出对于腔长为 4 m 的激光器的频率间隔  $\Delta\nu = c/nL \approx 54$  MHz, 与理论基本吻合。

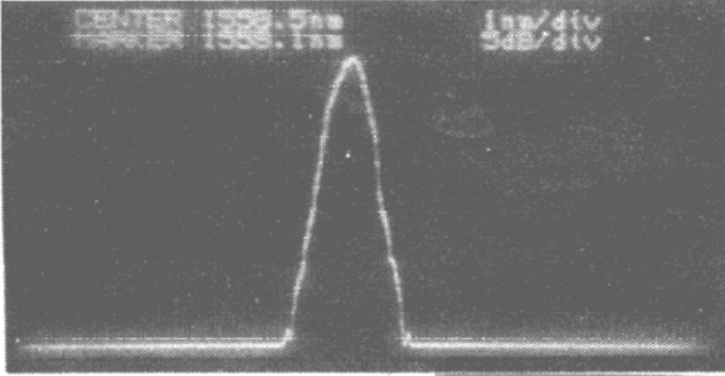


图 2 扫描光谱仪上全光纤环形激光器的输出激光特性  
Fig. 2 The output lasing characteristics of the all-fiber ring laser displayed by an optical spectrum analyser (OSA)

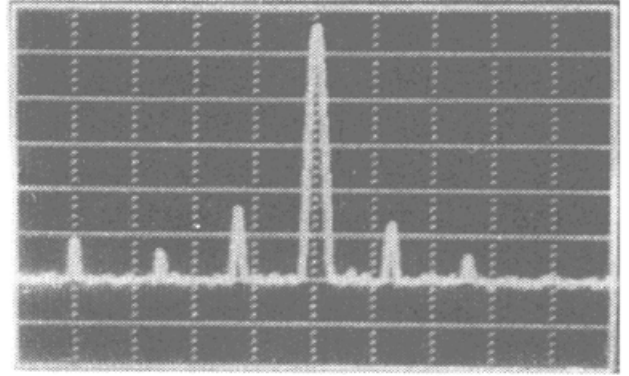


图 3 频谱仪上显示出的多模拍频谱  
Fig. 3 The spectrum of the multi-mode beat signal exhibited by a spectrometer

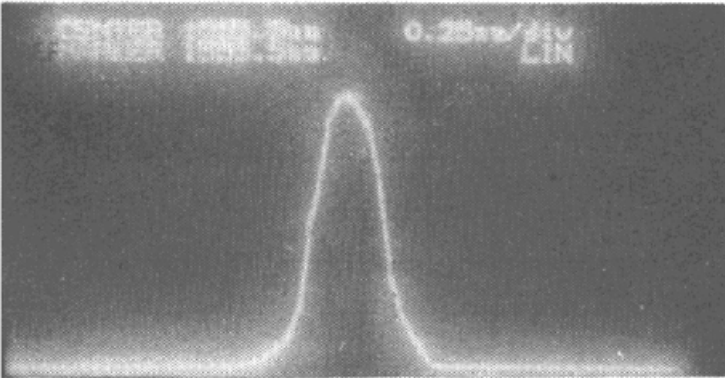


图 4 扫描光谱仪上全光纤环形激光器的输出激光特性  
Fig. 4 The output lasing characteristics of the all-fiber ring laser displayed by an OSA

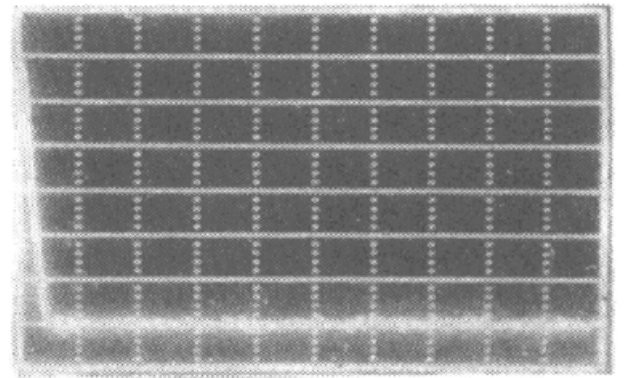


图 5 频谱仪上没有显示出多模拍频谱  
Fig. 5 No spectrum of multi-mode beat signal is shown

当在复合腔全光纤环形激光器的子腔中接入双锥光纤滤波器时, 在光谱仪上显示的激光谱线明显变窄, 中心波长为 1555.5 nm, 如图 4 所示, 约为 0.3 nm (横坐标: 波长, 1 nm/div)。用频谱仪观测激光输出(横坐标: 频率, 15 MHz/div; 纵坐标: 相对强度, 10 dB/div), 在 PIN 的响应范围内和频谱仪的测量范围内, 没有发现拍频信号, 表明激光器处于单模工作状态, 如图 5 所示。这时, 利用光纤环形谐振干涉仪(分辨率 3 MHz)测得激光线宽为 4 MHz。从激光器的另一输出端可以得到同样的实验结果。

## 2.2 全光纤环形激光器旋转传感

为进行旋转传感的测量, 将复合腔全光纤环形激光器放在一转台上, 激光器的两端模式特性通过光谱仪和频谱仪测量。当转台没有转动时, 激光器的输出光谱和频谱如图 4, 图 5 所示。当转台旋转时, 转速约为 60°/s, 在频谱仪上出现了新的拍频分量, 如图 6 所示。而且当转速变化时, 此拍频分量的频率也随之发生变化。图 7 给出拍频与转速的关系, 呈现非常好的线性。比例系数为 2.1 kHz/(°/s), 同时拍频信号相当稳定, 从而实验证实了复合腔全光纤环形激光器用作旋转传感器的可行性。

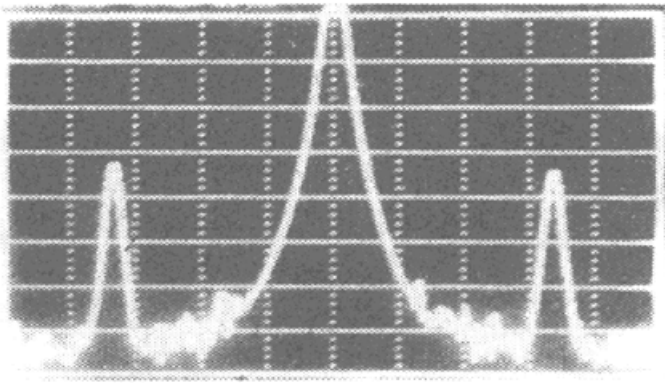


图 6 频谱仪上陀螺拍频信号

Fig. 6 Gyroscope beat signal displayed by the spectrometer

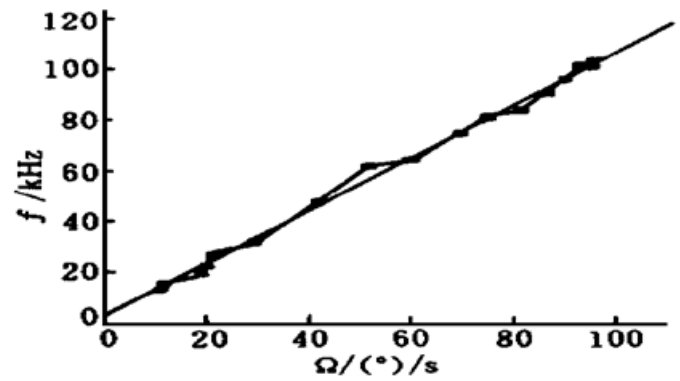
图 7 陀螺拍频  $f$  与旋转角速度  $\Omega$  的关系

Fig. 7 The relation between gyroscope beat frequency  $f$  and the angular velocity  $\Omega$

### 3 结 论

利用在内插窄带双锥光纤滤波器的复合腔共振选模原理和近阈值运转状态下腔内自建可饱和吸收对顺、逆时针两个方向共振模的去耦作用, 研制成线宽小于 4 MHz 的双向、同时、同频、单纵模振荡的全固化掺铒光纤环形激光器, 测得输出线宽  $< 4$  MHz, 并实现了全光纤环形激光器旋转传感测量。进一步优化复合腔的结构参量, 并尽可能减小腔内损耗和光反馈, 还可进一步压窄线宽。这种新型光纤环形激光器可望在光纤陀螺技术中得到重要应用。

### 参 考 文 献

- 1 L. N. Menegozzi, Willis E. Lamb, Jr.. Theory of a ring laser. *Phys. Rev. A*, 1973, **8**(4): 2103~ 2125
- 2 K. Iwatsuki, H. Okamura, M. Saruwatari. Wavelength-tunable single-frequency and single-polarization  $\text{Er}^{3+}$ -doped fibre ring-laser with 1.4 kHz linewidth. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(24): 2033~ 2035
- 3 Romam Kiyam, Seung Kwan Kim, Byoung Yoon Kim. Bidirectional single-mode Er-doped fiber-ring laser. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(12): 1624~ 1626
- 4 Peng Jiande, Chen Xiaomeng, Liu Xiaoming *et al.*. Bi-directional simultaneous single-longitudinal mode lasing of an  $\text{Er}^{3+}$ -doped all-fiber ring laser using composite cavity. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(10): 1412~ 1416 (in Chinese)

## An All-fiber Compound Ring Laser and Its Use as a Rotation Sensor

Chen Jian Ai Hezhi Chen Zhihao Gu Donghua

Tang Pingsheng Liu Xiaoming Peng Jiande

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

**Abstract** By the theory of syntonistic mode-selecting in the compound ring in which a narrow-band tapered fiber filter is embedded and by the uncoupling effect on the bidirectionally operating syntonistic mode in the ring of the self-provided saturable absorption under the near threshold operation, a bidirectional, simultaneous, single-mode operating compact Er-doped fiber ring laser with the same frequency is realized, the measurement of rotation sensing of the all fiber ring laser is performed.

**Key words** all-fiber ring laser, rotation, sensor