

复合腔全光纤环形激光器单纵模双向同时激射的实验研究*

彭江得 陈晓鹏 刘小明 唐平生
(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘 要 提出并实验证实了三能级掺杂光纤复合腔环形激光器共振选模振荡原理和腔内自建可饱和吸收机制对双向行波共振模的去耦作用, 并实现复合腔掺 Er^{3+} 全光纤环形激光器单纵模双向同时激射。

关键词 光纤环形激光器, 双向同时激射, 单纵模, 复合腔。

1 引 言

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^[1]。然而, 据环形激光理论可知^[2], 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由于在腔内安置光隔离器, 尽管最窄线宽已近 1 kHz ^[3], 但都只能单向输出, 不能满足某些特殊应用(如陀螺)的要求。新近报道在光纤环形激光腔内安置法拉第旋光器以消除空间烧孔, 实现了双向单模激射, 但环内双向振荡的激光频率是不同的^[4]。

作者曾采用复合腔结构研制出不带隔离器的单纵模掺 Nd^{3+} 全光纤环形激光器^[5], 但只观测了单向激射特性。新近, 作者在三能级系统光纤环形激光腔双向振荡特性理论研究基础上(将另文发表), 利用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机制对双向共振模的去耦作用, 研制成复合腔掺 Er^{3+} 全光纤环形激光器, 实现了同频单纵模的双向同时激射, 测得输出激光线宽小于 1 GHz (受扫描干涉仪分辨率限制)。本文报道激光器的设计原理和实验结果。

2 设计原理

对三能级系统固体环形激光腔双向振荡的振幅和时域特性的理论研究表明, 环形腔中沿顺、逆时针两个方向的行波模场通过介质的电极化而互相耦合。耦合强度主要决定于介质的

* 国家自然科学基金(高技术)资助项目。

收稿日期: 1997-05-20

均匀展宽程度, 且和工作温度、腔的旋转、腔内反射等因素有关, 特别对于三能级系统的激光物质, 还与泵浦强度有关, 当双向模场满足弱耦合条件时, 单纵模双向同时激射是可能的。据此, 激光腔的设计应满足如下要求:

- 1) 全光纤环形腔的结构应保持顺、逆时针两个方向泵浦和激射的对称性;
- 2) 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;
- 3) 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。

复合腔全光纤环形激光器结构示于图 1。用激光二极管(发射波长 1480 nm)作泵浦源,

三能级系统的掺 Er^{3+} 光纤工作于 $1.5 \mu\text{m}$ 波段, 数值孔径 0.21, 对激光和泵浦光的吸收分别为 4.57 dB/m 和 3.29 dB/m, WDM_1 是熔烧型(1480/1550 nm)波分复用光纤耦合器, 对泵浦光和激光的功率耦合率分别为 0.5% 和 90%。 WDM_2 是一个磨抛型光纤耦合器, 其耦合率从 0 到 100% 连续可调, 一对耦合光纤臂与 2 m 掺 Er^{3+} 光纤连成子腔 2, 另两光纤臂分

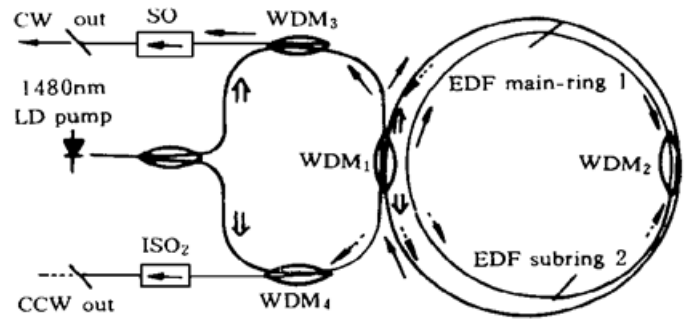


Fig. 1 All-fiber composite cavity ring laser configuration

别通过 1 m 长的掺 Er^{3+} 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耦合器 WDM_3 和 WDM_4 对泵浦光的直通臂和一个分光比为 1:1 的光纤耦合器与激光二极管泵浦源相连。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 WDM_1 的强耦合形成低损耗振荡环路, 经 WDM_1 的出射激光分别从 WDM_3 和 WDM_4 的耦合光纤臂输出。调节 WDM_2 可改变子腔 2 与主腔 1 间的耦合程度, 从而改变整个复合腔的激射状态。为消除光纤端面光反射的干扰, 在 WDM_3 和 WDM_4 的两个耦合输出端分别放置光隔离器 ISO_1 和 ISO_2 。

上述复合腔全光纤环形激光腔结构设计的关键在于:

1) 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共用耦合器 WDM_2 的波长调谐两者共同运作来实现。由于掺 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 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符, 取工艺允许的腔长差 ΔL 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), 因而在增益谱宽内只可能存在很少的共振模式, 这就有可能通过 WDM_2 的波长选择调谐使处于增益峰值的共振模式优先起振而实现单模激射。

2) 双向共振模去耦机制: 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 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, 通过调节共用耦合器 WDM_2 , 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, 以保证主腔激射并使子腔中的掺 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。

3 实验结果

3.1 单纵模工作特性

先将共用耦合器 WDM₂ 完全去耦合, 实际上形成单环光纤腔。调节泵浦源激光二极管功率使之远高于光纤激光器激射阈值。用光谱分析仪监测其一个方向的输出, 测得多条激射谱线; 再将泵浦总功率下调到 5 mW, 使光纤激光器稍高于阈值运转, 虽输出光谱稍有变化, 但一般仍为多谱线。此时, 微调 WDM₂, 使之从弱耦合逐渐变到强耦合, 即构成互耦程度不同的复合环形腔。随着子腔泵浦逐渐变弱, 两腔间激射光耦合逐渐增强, 可观察到三种激射状态: 起初, 谱线随耦合的增强而减少, 如图 2(a) 所示, 并逐渐变窄; 接着, 在适当的耦合状态下, 激射谱收缩成单条极窄的谱线, 如图 2(b) 所示; 继续增强耦合时, 谱线又逐渐展宽, 甚至突然淬灭, 然后随耦合的进一步增强又再现多谱线激射。如反向微调耦合器, 则完全对称地重现上述激射过程。测得最佳耦合状态下图 2(b) 所示谱线中心波长为 1554 nm, 图 3 给出用法布里-珀罗光纤扫描干涉仪(自由谱区 50 GHz, 精细度 50) 测得的线宽小于 1 GHz(达到干涉仪的分辨极限)。



Fig. 2 Output spectra of the all-fiber composite cavity ring laser. (a) Multi-mode spectrum, (b) Single-mode spectrum

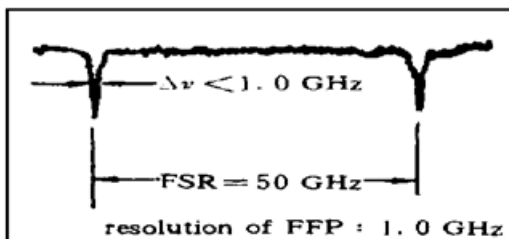


Fig. 3 Single longitudinal mode oscillation with linewidth < 1 GHz

上述实验表明, 共用耦合器 WDM₂ 的耦合状态在复合腔光纤环形激光器中起着极其重要的作用。因耦合率与波长有关, 且随着微调两纤芯的接近, 波长较长的激射光耦合率增长更快^[6], 测得最窄谱线激射时 WDM₂ 对激射光的耦合率约 50% 左右, 而对泵浦光的耦合率小于 50%。这时, 对激射光形成强耦合的两腔共振而导致单模激射。注意到起始时单环激光器稍过阈值运转, 当耦合成复合腔时, 因部分原本激励子腔段掺 Er³⁺ 光纤的泵浦功率耦合进主腔, 使子腔段掺 Er³⁺ 光纤因泵浦不足以将其“漂白”而形成对激射光的可饱和吸收, 从而进一步削弱双向共振模场间的耦合, 导致双向同时激射; 当耦合率再增大时, 进入子腔的泵浦功率进一步减小, 对激射光的吸收增强而使复合腔内损耗增大, 及至使激光淬灭; 而当耦合率继续增大时, 尽管子腔对激射光的吸收更强, 但绝大部分激射光和泵浦光均在主腔内循环, 此时子腔对主腔的激射状态已不起作用, 复合腔实际上已演变成以主腔为主体的单一环形腔激光器, 故再现多模激射。

3.2 双向激射特性

在最窄谱线激射状态下, 用扫描光谱仪从 WDM₃ 和 WDM₄ 的输出端同时监测顺、逆时针两个方向的激光输出, 得到的激射光谱完全重合, 说明双向激射频率完全相同。又通过光

探测器用示波器观察, 并利用 $X-Y$ 记录仪测绘输出激光功率随时间的变化, 图 4 表明两个方向输出功率是连续的, 由于腔外的光反馈引起微小的涨落, 加入隔离器 ISO_1 和 ISO_2 可使这种起伏大大减小, 这就证明了复合腔全光纤环形激光器双向振荡在时域上完全同步。

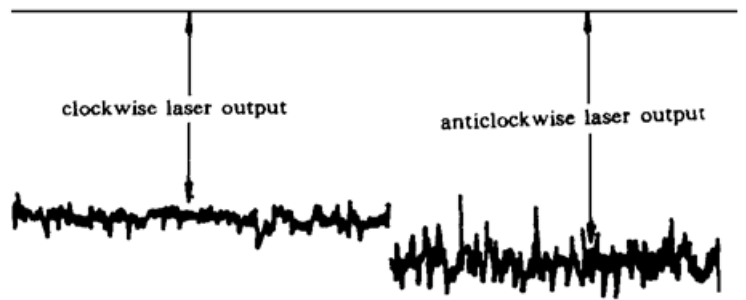


Fig. 4 Time-dependence of the bi-directional lasing

3.3 自调 Q 激射特性-可饱和吸收机制的验证

将泵浦总功率增大到 20 mW, 仔细调节 WDM_2 , 通过光探测器在示波器上观测到图 5 所

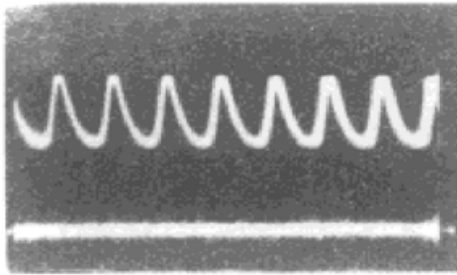


Fig. 5 Self- Q -switching operation in the all-fiber composite cavity ring laser

示的脉冲激光波形, 底部直线是探测器的电本底, 脉冲底部与直线的间距相应于残余泵浦光电平。既然腔内不存在任何附加调制机理, 光脉冲只能是一种自调 Q 现象。实际上, 脉冲前沿较后沿陡峭, 这是可饱和吸收调 Q 脉冲的特征之一; 当增大泵浦功率时, 重复频率升高, 这是可饱和吸收调 Q 激射的又一特征。测得脉冲周期约 $50 \mu\text{s}$, 这是由室温下铒离子的增益恢复时间($\sim 100 \mu\text{s}$ 左右)所决定的, 与有关报道相符^[7]。在全光纤复合环形激光腔内观测到自调 Q 激射现象是腔内自建可饱和吸收机制的最直接证明。

结 论 提出并实验证实了在近阈值运转状态下复合腔光纤环形激光器的共振选模原理和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。研制出复合腔掺 Er^{3+} 全光纤环形激光器, 并实现了同频单纵模的双向同时激射, 测得输出线宽小于 1 GHz。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。这种新型双向单模同时输出的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] Yue Chaoyu, Peng Jiangde, Zhou Bingkun, Tunable Nd^{3+} -doped fiber ring laser. *Electron. Lett.*, 1989, **25**(2): 101~ 102
- [2] L. N. Menegozz, Willis E. Lamb, Jr., Theory of ring laser. *Phys. Rev. (A)*, 1973, **8**(4): 2103~ 2125
- [3] K. Iwatsuki, H. Okamura, M. Saruwatari, Wavelength-tunable single frequency and single-polarization Er^{3+} -doped fiber ring laser with 1.4 kHz linewidth. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(24): 2033~ 2035
- [4] Romma Kuyan, Seung Kwan Kim, Byoung Yoon Kim, Bidirectional single-mode Er -doped fiber ring laser. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1996, **8**(12): 1624~ 1626
- [5] Jiangde Peng, Chaoyu Yue, Bingkun Zhou, All-fiber tunable and composite cavity ring fiber laser using ultra low loss fiber coupler. *Fiber and Integrated Optics*. 1992, **12**(1): 31~ 38
- [6] 彭江得, 岳超瑜, 黄翊东等, $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 掺杂光纤环形激光器. *光学学报*, 1990, **10**(10): 922~ 926
- [7] M. Nakazawa, K. Suzuki, H. Kubota, Self- Q -switching and mode locking in a $1.53 \mu\text{m}$ fiber ring laser with saturable absorption in erbium-doped fiber at 4.2 K. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(8): 613~ 615

Bi-Directional Simultaneous Single-Longitudinal Mode Lasing of a Er^{3+} -Doped All-Fiber Ring Laser Using Composite Cavity

Peng Jiangde Chen Xiaopeng Liu Xiaoming Tang Pinsheng

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

(Received 20 May 1997)

Abstract A method to implement the bi-directional simultaneous single-mode operation of fiber ring laser is proposed. Using the mode-resonance characteristics of composite ring cavity and the mode-decoupling between both clockwise and counter-clockwise oscillating waves by the self-built saturable absorption in a sub-cavity under weak pumping, a bi-directional simultaneous single-longitudinal mode Er^{3+} -doped all-fiber ring laser is demonstrated.

Key words fiber ring laser, bi-directional simultaneous lasing, single longitudinal mode, composite cavity.