

文章编号: 0253-2239(2004)07-922-3

# 无需隔离器的单向运行光纤环形激光器的研究<sup>\*</sup>

孙国勇 瞿荣辉 方祖捷 王向朝

(中科院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800)

**摘要:** 从理论上设计并从实验上实现了一种简单易行的环形谐振腔结构,它仅由两个耦合器连接成一个环形谐振腔,可以使得逆时针运行光的增益高于顺时针运行光的增益,其比值取决于两个耦合器耦合比的选取。将此作为掺铒光纤激光器的谐振腔,由于两个相反方向具有不同的损耗,因而可以实现在不需隔离器的情况下也能保证激光的单向运行,从而简化了器件结构,消除隔离器的插入损耗,降低了成本。在实验的过程中使用两个 3 dB 耦合器,结果表明,在阈值及其以上抽运功率下,两个相反方向的输出功率差始终大于 17 dBm,基本实现了激光的单向运行。

**关键词:** 光纤激光器; 光纤环形谐振腔; 隔离器; 行波

中图分类号: TN253 文献标识码: A

## Study on a Fiber Ring Laser with Unidirectional Operation without Isolator

Sun Guoyong Qu Ronghui Fang Zujie Wang Xiangzhao

(Laboratory for Information Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 20 May 2003; revised 25 August 2003)

**Abstract:** An erbium-doped fiber ring laser with unidirectional operation without optical isolator has been investigated theoretically and experimentally. The fiber ring laser cavity is only composed of two couplers and built in such a way that it offers a higher counterclockwise over clockwise circulating gain ratio, which is strongly dependent on coupling coefficients of the two couplers. The optical fields propagating in the two directions suffer from different losses. As a consequence, the laser oscillation appears in a quasi-unidirectional form without isolators. So, the structure of the fiber ring laser is simplified, eliminating the insertion loss arising from the isolator and decreasing the cost. Two 3 dB couplers are used in the experiment, in which the result shows that on and above the threshold of pump power, there is a difference in the output power of 17 dBm between two contrary directions, basically realizing the unidirectional operation of the fiber laser.

**Key words:** fiber laser; fiber ring resonator; isolator; traveling wave

## 1 引 言

随着光纤相关产业的迅速发展,作为光源,掺铒光纤激光器(EDFL)具有与光纤元器件天然的兼容性;辐射波长与通信光纤最低损耗窗口相匹配;可用

带宽较宽;与半导体激光器相比,光束质量好,噪声较低等诸多优点。因而它在光纤通信、光纤传感等领域具有重要的应用前景,受到了国际上科技界、产业界的广泛重视,成为研究的热点。谐振腔作为激光器的一个不可缺少的重要组成部分直接影响着激光器的运行机制。对掺铒光纤激光器来说,主要有两种谐振腔结构:线形谐振腔与环形谐振腔。环形谐振腔由于具有较长的腔长,能够获得较窄的线宽和较高的输出功率,使得它在光纤激光器中具有重

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(60207004)、上海市启明星计划(02QD14050)资助课题。

E-mail: caad1437@sohu.com

收稿日期:2003-05-20;收到修改稿日期:2003-08-25

要的应用<sup>[1-6]</sup>。然而,增益介质中驻波的存在会产生烧孔效应,影响激光的相干性。为了避免烧孔效应,通常在光纤激光器的环型腔里插入若干个隔离器以强迫激光运行在行波状态。但是光纤隔离器引入了插入损耗,向后散射,价格也较昂贵。为了在没有隔离器的情况下也能使激光器单向运行,本文从理论上设计并从实验上验证了一种由两个耦合器组成的结构简单的环形谐振腔。从图 1 中可以看出,谐振腔里顺时针传输的自发辐射被特殊的腔结构转变为逆时针传输,有利于激射出逆时针传输的激光,在不需隔离器的情况下也能保证激光的单向运行。

## 2 理论分析

该光纤激光器的环形谐振腔的结构如图 1 所示,仅由两个强度耦合系数分别为  $k_1$  与  $k_2$  的定向耦合器组成。与简单的由一个圆环构成的环形谐振腔不同的是有一段光纤  $l$  将耦合器  $k_1$  与  $k_2$  直接相连。正是由于这一段光纤使得环形腔中从  $k_1$  入射的部分顺时针运行的光变为逆时针运行,从而有利于激光的单向运行。抽运光(LD)单向抽运,通过波分复用器(WDM)注入掺铒光纤(EDF)。因为铒光纤的增益带宽很大,在激光腔内放置了一个带通滤波器(BPF)以便获得窄线宽输出。为了检测激光是否单向运行,在环形腔里使用了一个输出耦合器充当监测器(Monitor)。

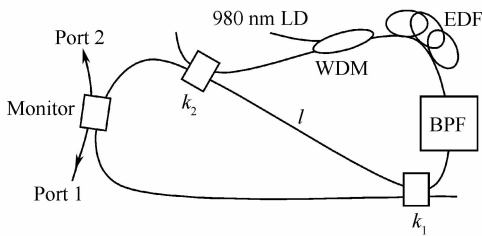


Fig. 1 Schematic diagram of the ring cavity erbium-doped fiber laser

为了便于分析环形谐振腔的单向特性,需要使用如图 2 所示的模型。与图 1 不同的是,原本连有掺铒光纤的一段光纤被断开以便模拟掺铒光纤两端的自发辐射沿两个不同的方向注入环形谐振腔。不失一般性,设两方向的注入光功率  $I_{in}^{CW} = I_{in}^{CCW}$  (即使不相等也不影响后面分析的结果)。要想实现激光沿逆时针单向运行,需要满足从端口 2 返回的光功率  $I_2^a$  大于从端口 6 返回的光功率  $I_6^a$ 。

在下面的分析中忽略光纤的传输与连接损耗,

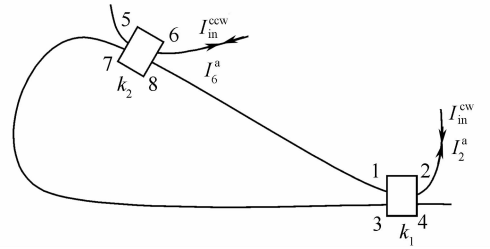


Fig. 2 The fiber ring cavity directionality analysis model.  $k_i$ : couplers,  $I_{in}^{CW}$ : clockwise input intensity,  $I_{in}^{CCW}$ : counterclockwise input intensity. The number 1-8 denote the coupler ports

而且为了模拟在光纤激光器中的自发辐射,认为两方向的输入光是非相干的,因而光强能够简单的直接相加。应用转移矩阵法可以得到

$$I_2^a = b_1^2 b_2^2 I_{in}^{CCW} + 2a_2^2 a_1^2 b_1^2 I_{in}^{CW}, \quad (1)$$

$$I_6^a = b_1^2 b_2^2 I_{in}^{CW}, \quad (2)$$

其中  $a_i = \sqrt{(1-k_i)(1-\gamma_i)}$ ,  $b_i = \sqrt{k_i(1-\gamma_i)}$ ,  $\gamma_i$  为耦合器的强度损耗系数。根据(1)式与(2)式,通过计算可以得到逆时针与顺时针返回的光功率比如图 3 所示。对于  $k_1$  确定,  $k_2$  变化的情况,横坐标为  $k_2$ ; 同理,对于  $k_2$  确定,  $k_1$  变化的情况,横坐标为  $k_1$ 。从图中可以看出,要想得到较高的逆时针与顺时针返回的光功率比,  $k_1$  与  $k_2$  都必须较小。

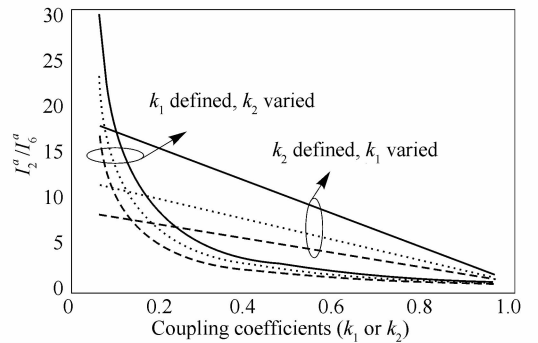


Fig. 3 Counterclock over clockwise returned intensity ratio as functions of coupling coefficients. For  $k_1$  is defined and  $k_2$  is varied from 0 to 1, solid:  $k_1 = 0.1$ , dotted:  $k_1 = 0.3$ , dashed:  $k_1 = 0.5$ . For  $k_2$  is defined and  $k_1$  is varied from 0 to 1, solid:  $k_2 = 0.1$ , dotted:  $k_2 = 0.15$ , dashed:  $k_2 = 0.2$

## 3 实验结果

为了说明设计的这种环形谐振腔的可行性,采用图 1 所示的装置进行了掺铒光纤激光器的实验研究。980 nm 的抽运光通过一 980/1550 波分复用器耦合到掺铒光纤中,带通滤波器的中心波长为

1556.86 nm,  $k_1$  与  $k_2$  均为 3 dB 耦合器, 输出耦合器的耦合比为 90:10。

从实验中得到激光器的阈值功率为 47 mW。在阈值抽运功率时监测器的两个输出端口的激光光谱如图 4 所示, 可以看出逆时针运行光的输出功率为 -29.6 dBm, 远高于顺时针运行光的输出功率, 其为 -48.74 dBm。激光波长都为 1556.68 nm, 与带通滤波器的中心波长一致, 激光的 3 dB 线宽为 0.05 nm, 窄于带通滤波器的 3 dB 线宽。图 5 进一步说明该环形腔结构不需要隔离器能实现单向运行, 它显示了光纤激光器在不同抽运功率下两个相反方向的输出功率, 从图可以看出, 在阈值及其以上抽运功率下, 两个相反方向的输出功率始终有大于 17 dBm 的功率差。

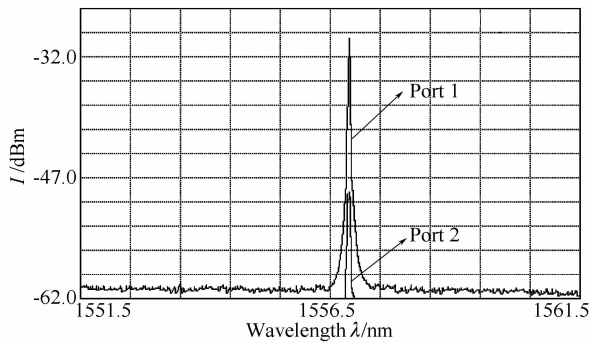


Fig. 4 The optical spectrum of the outputs of the monitor at the threshold pump. Port 1: outer spectrum, port 2: inner spectrum

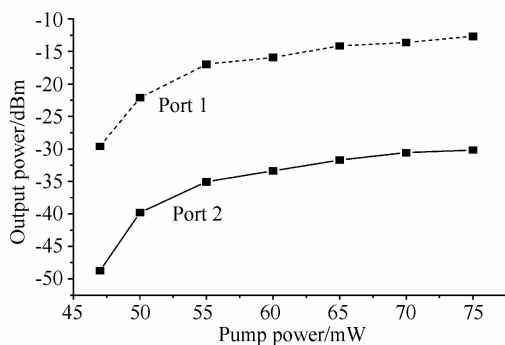


Fig. 5 Output characteristics of the erbium-doped fiber laser

从图 4 与图 5 可以看出, 虽然激光能够单向运行, 但是从端口 2 仍然有光功率输出, 为了分析光功率的来源, 在阈值抽运功率下比较了端口 2 的输出光谱与没有环形腔时直接经过带通滤波器滤波后在端口 2 输出的荧光谱, 如图 6 所示。从图 6 中可以看出, 此时从端口 2 输出的功率基本上是由于掺铒光纤中的自发辐射所致。随着抽运功率的提高, 由

于耦合器的光纤端面反射间接形成了激光谐振腔的结构致使端口 2 有输出功率, 而且随着抽运功率的增加而增高。进一步的尽量减小耦合器端面的反射以及根据前面的理论分析需要对耦合器耦合比的优化等措施留待后面的工作继续深入。

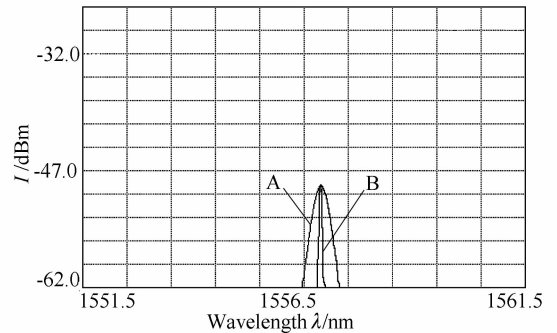


Fig. 6 The optical spectrum output from port 2 of the monitor at the threshold pump; A: outer spectrum; without ring resonator; B: inner spectrum; with ring resonator

**结论** 本文从理论上设计并从实验上实现了一种简单易行的仅由两个耦合器构成的环形谐振腔结构, 将此作为掺铒光纤激光器的谐振腔, 可以实现在不需要隔离器的情况下也能保证激光的单向运行, 从而简化了器件结构, 消除隔离器的插入损耗, 降低了成本。

## 参 考 文 献

- 1 Urquhart P. Compound optical-fiber-based resonators. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1988, **5**(6):803~812
- 2 Zhang J, Lit J W Y. Compound fiber ring resonator: Theory. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1994, **11**(6):1867~1873
- 3 Wie L, Lit J W Y. Three-coupler double-ring fiber resonator for lasers. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 1996, **12**(2):73~77
- 4 Wu Zhengmao, Xia Guangqiong, Chen Jianguo. Analytical studies on output characteristics of erbium-doped fiber lasers. *Acta Optica Sinica (光学学报)*, 1996, **16**(12):1676~1680 (in Chinese)
- 5 Xia Jiangzheng, Cai Haiwen, Ren Hong *et al.*. Study on output characteristics of erbium-doped fiber ring lasers. *Acta Optica Sinica (光学学报)*, 2003, **23**(7):823~827 (in Chinese)
- 6 Fan Wei, Chen Bai, Chen Jialin *et al.*. Bidirectional output wavelength characteristics of asymmetric phase-shifted distributed feedback fiber lasers. *Acta Optica Sinica (光学学报)*, 2003, **23**(7):828~833 (in Chinese)