

# 基于 FLM 的 L 波段双波长 EDFL 的双稳态变换\*

毛庆和<sup>†</sup> 冯素娟 蒋 建 朱宗玖 刘文清

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

(2006 年 3 月 24 日收到 2006 年 5 月 31 日收到修改稿)

提出和验证了一种 L 波段双波长掺铒光纤激光器(EDFL)双稳态控制变换和双波长开关切换的方法. 将偏振控制器(PC)插入基于 3 dB 光纤耦合器的光纤环镜(FLM)中, 并将该 FLM 用作 L 波段双波长级联线形耦合腔 EDFL 的公共腔镜. 结果表明, 调节 PC 可以改变 FLM 的反射率, 实现对 EDFL 双稳态特性的有效控制, 且双稳态特性随 FLM 反射率呈单调变化. 利用这一性质, 提出并证实, 对于处在 FLM 最大反射率对应的双稳态第一跃变点和最小反射率对应的双稳态第二跃变点之间的任意固定抽运光功率, 调节 PC 可实现两个稳态之间的相互变换和双波长之间的相互切换.

关键词: 掺铒光纤激光器, 光纤环镜, 偏振控制器, 光学双稳态

PACC: 4281, 4265P, 4260B, 4260D

## 1. 引 言

掺铒光纤激光器(erbium-doped fiber lasers, EDFLs)在光纤通信与传感、光谱学和光学分析测试等方面都具有重要应用. 目前, 全光纤化连续波 EDFL 大多已采用可调光纤 Bragg 光栅(fiber Bragg gratings, FBGs)作为波长调谐器件, 以同时获得宽带调谐和窄线宽特性<sup>[1-5]</sup>. 但是, 受可调 FBG 技术本身以及器件成本等因素的限制, 波长调谐范围往往难以覆盖 EDF 增益带宽, 尤其在 L 波段. 2002 年, 我们在 L 波段 FBG 级联线形耦合腔双波长 EDFL 中, 发现了一种具有大双稳区的新型双波长双稳态现象<sup>[6]</sup>. 利用这种双波长双稳态效应, 提出并实现了一种 L 波段双波长可调谐可开关 EDFL<sup>[7]</sup>. 通过双稳态之间的变换, 实现了两个大跨度波长之间的开关切换. 同时, 利用这种双稳态变换对波长调谐可进行积累的特性, 确保了总波长调谐范围. 但是, 在文献 [7] 中, 大跨度波长开关切换是通过触发抽运光实现双稳态变换获得的, 而这种电流触发无疑会影响抽运激光器的寿命, 甚至导致损坏.

本文提出一种新型稳态变换和波长切换方法. 我们在由 3 dB 光纤耦合器(OC)构成的光纤环镜(fiber loop mirror, FLM)中插入一光纤型偏振控制器

(PC), 调节 PC, FLM 反射率可在 3% 与 90% 之间变化. 将该 FLM 用作 L 波段双波长 EDFL 的公共腔镜. 实验发现, EDFL 的双稳态特性可通过 PC 控制与调节, 且双波长双稳区间随 FLM 反射率单调变化. 利用这种双波长双稳区间随 FLM 反射率单调变化的规律, 我们提出一种双波长双稳态相互变换、两波长相互切换的方法, 并进行了验证. 该方案与原有技术<sup>[7]</sup>相比, 避免了因电流触发对抽运激光器的损伤, 且具有简单方便、成本低等优点.

## 2. 结构方案与操作原理

图 1 为 L 波段双波长 EDFL 的结构示意图. FLM 分别与 FBG<sub>1</sub> 和 FBG<sub>2</sub> 构成两相互耦合的级联线形 F-P 腔. 激光振荡波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  由 FBG<sub>1</sub> 和 FBG<sub>2</sub> 的中心波长决定, 分别为 1573.9 nm 和 1598.2 nm, 两 FBG 的反射率均约 75%. FLM 由一耦合比为 3 dB 的 OC 构成, 其中接入了一个光纤型 PC. 1480 nm 半导体抽运激光器通过波分复用耦合器(WDM)为 EDF<sub>1</sub> 和 EDF<sub>2</sub> 提供抽运. 抽运源最大输出功率为 250 mW; EDF<sub>1</sub> 和 EDF<sub>2</sub> 均为标准单模 EDF, 数值孔径为 0.19, 截止波长为 955 nm, 在 1532 nm 处的吸收系数为 7.2 dB/m. EDFL 中还插入了另一优化了分光比的 OC, 其分光比优化原则是保证激光阈值时增益谱形状平

\* 中国科学院“百人计划”项目和国家自然科学基金(批准号: 60677050)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: mqinghe@aiofm.ac.cn

坦,它也起了文献[8]中光衰减器的作用,但因能将激光能量有效地由腔中抽取,从而提高了 EDFL 的

转换效率.EDFL 中所用 WDM 和 OC 均工作在 C 和 L 波段,激光器输出端为端口 1—4.

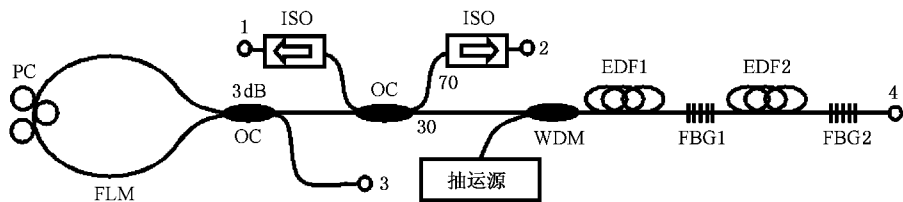


图 1 L 波段双波长线形耦合腔掺铒光纤激光器结构(图中,PC 为光纤型偏振控制器,FLM 为光纤环镜,OC 为光纤型耦合器,ISO 为光隔离器,WDM 为波分复用耦合器,EDF 为掺铒光纤,FBG 为光纤 Bragg 光栅)

图 1 所示的 EDFL 中存在着 EDF 可饱和吸收、有源耦合腔增益箝制和由 EDF 均匀加宽造成的  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  间的交叉增益饱和等效效应,这些效应的综合相互作用结果将使 EDFL 产生双波长双稳态现象<sup>[6]</sup>.理想情况下,基于 3 dB 耦合器的 FLM 具有全反射特性<sup>[9]</sup>,但由于器件微小的偏振依赖性和光纤应力双折射等因素的影响,实际 FLM 往往不能获得全反射<sup>[10]</sup>.在图 1 所示的 FLM 中插入 PC 后,相当于在 FLM 中引入了可控的双折射,那么,FLM 的反射率将随 PC 的状态不同而发生改变.于是,调节 PC 的状态,将改变对应于  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的腔损耗,进而改变  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  阈值处的增益谱形状及其与 L 波段 EDF 内禀平坦增益谱的偏离程度,这种增益谱形状的改变将使已起振激光  $\lambda_1$ ( $\lambda_2$ )和潜在振荡波长  $\lambda_2$ ( $\lambda_1$ )处反射的 ASE 所获得的增益因交叉增益饱和效应也随之改变,从而影响 EDF<sub>2</sub> 的漂白状态,而这种 EDF<sub>2</sub> 的漂白状态的变化(反映 EDF 的可饱和吸收效应)与有源耦合腔增益箝制和两波长间的交叉增益饱和效应相互作用,结果将使 EDFL 产生的双波长双稳态行为发生改变.这样,通过控制 PC 的状态,就可对 EDFL 的双稳态特性进行控制;而通过调节 PC 的状态,则可对 EDFL 的双稳态进行变换,进而切换振荡波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ .

### 3. 实验结果与讨论

实验首先对输出 OC 的分光比、EDF<sub>1</sub> 和 EDF<sub>2</sub> 的长度按文献[8]中的方法进行了优化,当 OC 的分光比为 70:30(见图 1)EDF<sub>1</sub> 和 EDF<sub>2</sub> 长度分别为 100 m 和 48 m 时,EDFL 呈现出典型的双波长双稳态现象.为了给出 PC 状态对 FLM 反射特性影响的定量关系,我们对 FLM 的反射谱特性进行了实验研

究.图 2 给出了调节 PC 使 FLM 的反射率分别为最大(图 2(a))和最小(图 2(b))时的反射谱,由图可见,FLM 最大和最小反射率分别约为 90%和 3%,图中 FLM 反射率与波长间的关系曲线呈现出振荡结构,这是由 PC 引入的偏振效应随波长呈周期性变化引起的<sup>[10]</sup>,该振荡结构也间接地反映了由 PC 引入的偏振效应对 FLM 反射率的控制.实验结果还表明,FLM 的反射率可通过调节 PC 在 3%和 90%之间改变,且具有很好的重复性.

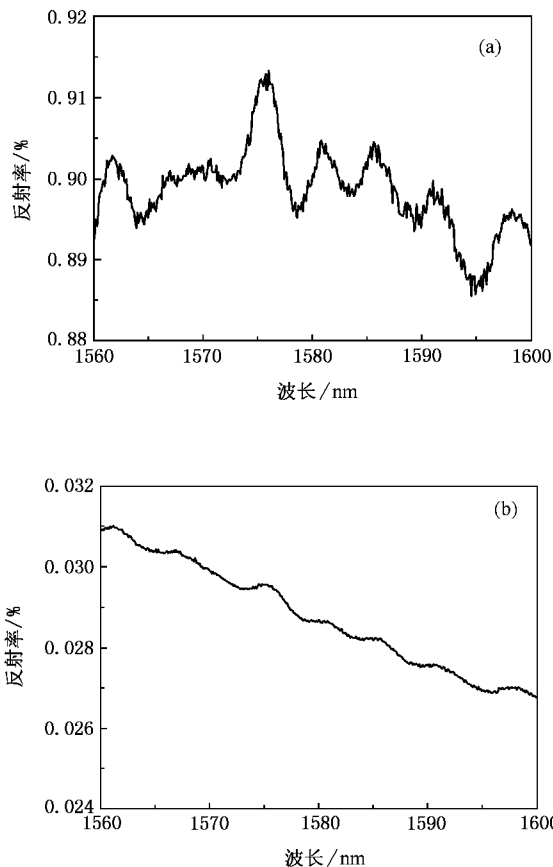


图 2 FLM 反射率与波长之间的变化关系 (a)和(b)分别为最大和最小反射率时的情况

EDFL 的双稳区间宽度可通过调整 PC 的状态进行控制. 当调整 PC 使 FLM 反射率增大时, 双稳区间单调减小, 而当调整 PC 使 FLM 反射率减小时, 双稳区间则单调增大. 图 3 给出了不同 FLM 反射率下 EDFL 的输出功率随抽运功率变化的规律. 由图可见, 对于不同的 FLM 反射率, 由  $\lambda_1$  变换到  $\lambda_2$  和由  $\lambda_2$  变换到  $\lambda_1$  所对应的抽运光功率(分别称为第一和第二跃变点, FTP 和 STP)不同, 从而给出不同的双稳区间(FTP 与 STP 之差); 当 FLM 处于最大反射率 90% 时, 如图 3(c) 所示, FTP 和 STP 最小, 分别为 108 mW 和 35 mW, 双稳区间也最小, 为 73 mW. 随着 FLM 的反射率减小, FTP 和 STP 均增大, 但 FTP 比 STP 增加得快, 从而使得双稳区间随 FLM 反射率的减小而增加. 当 FLM 反射率小于 30% 时, FTP, STP 及其对应的双稳区间急骤增加. 实验测得的最大 FTP, STP 及其双稳区间分别为 240 mW, 113 mW 和 127 mW, 对应的 FLM 反射率为 17% (见图 3(a)), 若再减小 FLM 的反射率, 受抽运源最大输出功率的限制, FTP 无法测出, 但按图 3 所呈现的 FTP 和 STP 随 FLM 反射率的单调变化规律, 可以预料, 这时 FTP 和 STP 及其双稳区间依然存在且具有更大的值.

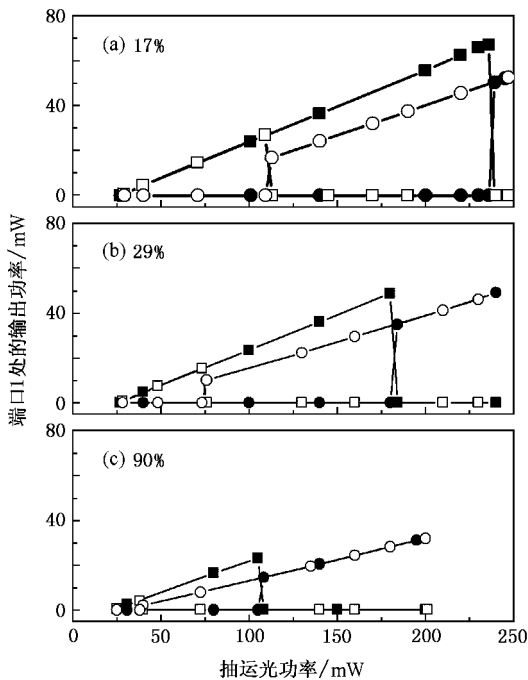


图 3 不同 FLM 反射率下 EDFL 的输出功率随抽运功率之间的变化曲线 (a)(b) 和 (c) 对应的 FLM 反射率分别为 17%、29% 和 90% (图中, 方形和圆形符号分别对应于  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的测量值, 实心符号和空心符号则分别对应于增加和减小抽运光功率时的情况)

图 3 所示的双稳态特性随 FLM 反射率单调变化的规律隐含了一种稳态变换和波长切换的方法, 即通过调整 PC 状态可以实现两稳态之间的变换和两波长之间的切换. 根据图 3, FLM 反射率为 90% 时的 FTP 为 108 mW, 而 FLM 反射率为 17% 时的 STP 为 113 mW. 那么, 当在 108 mW 和 113 mW 之间固定抽运光功率, 通过调节 PC 使 FLM 分别增加至 90% 和减小至 17%, 将会使 EDFL 的两个稳态进行变换.

图 4 为验证这种双稳态变换的实验结果. 实验时将 PC 置于使 FLM 反射率处于 90% 和 17% 之间的状态(约为 55%), 并将抽运光增加并固定在 110 mW (大于 FLM 反射率为 90% 时的 FTP, 且小于 FLM 反射率为 17% 时的 STP), 这时, EDFL 处于  $\lambda_1$  振荡的稳态, 其输出如图 4 曲线 a 所示; 然后, 调节 PC 使 FLM 反射率增加到 90%, 则 EDFL 从稳态 a 变换到稳态 b (如图 4 曲线 b 所示), 振荡波长也从  $\lambda_1$  切换到  $\lambda_2$ . 这时, 将 PC 恢复至初时状态, EDFL 的稳态和振荡波长都不变化, 输出状态如图 4 曲线 c 所示; 若再调节 PC 使 FLM 反射率减小到 17%, EDFL 的稳态发生改变, 振荡波长则由  $\lambda_2$  切换到  $\lambda_1$ , 输出状态如图 4 曲线 d 所示; 再将 PC 恢复至初始状态, EDFL 的稳态和振荡波长也恢复到初始状态, 输出状态如图 4 曲线 e 所示. 由此可见, 通过调节 PC 可实现 EDFL 的稳态 a(e) 和稳态 c 之间的变换和波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  之间的切换. 此外, 这种由 PC 控制的稳态变换和波长切换与 PC 的初始状态无关.

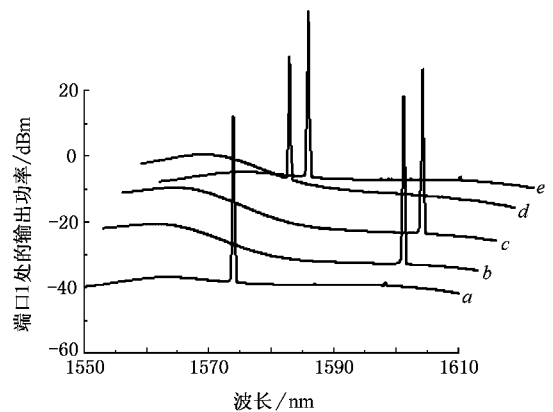


图 4 调节 PC 使 FLM 反射率在 90% 和 17% 之间变化时, EDFL 双稳态变换和两波长切换的实验结果(抽运光功率为 110 mW; 稳态 b 和 d 对应的 FLM 反射率分别为 90% 和 17%; 稳态 a, c 和 e 对应的反射率相同, 约为 55%)

实验发现, 当抽运光功率小于 108 mW (FLM 反射率为 90% 时的 FTP) 时, 调节 PC 不能实现由  $\lambda_1$  到

$\lambda_2$  的切换,当将抽运光功率置于大于 113 mW(大于 FLM 反射率为 17% 时的 STP),若依然将 FLM 的反射率限定在 90% 和 17% 之间改变,调节 PC 则不能实现由  $\lambda_2$  向  $\lambda_1$  的切换.但是,若将 PC 的调节范围扩大到使 FLM 在其最大(90%)和最小(3%)反射率之间变化,当将抽运光功率大于 113 mW 时,调节 PC 则仍然能实现双稳态的相互变换和两波长的双向切换.图 5 给出了当抽运光功率固定在 200 mW 时,通过调节 PC 获得的双稳态变换和波长切换情况,其中稳态  $b$  和  $d$  对应的 FLM 反射率分别为 90% 和 3%,稳态  $a$ 、 $c$  和  $e$  对应的反射率相同、约为 50%.事实上,对于给定的 FLM 反射率调节范围,能实现双波长切换的最大抽运光功率正好对应着给定 FLM 调节范围最小反射率时双稳曲线的 STP(尽管该值因所用抽运源最大输出功率的限制而无法测得).实验发现,当抽运光功率一直增加到 250 mW 时,在

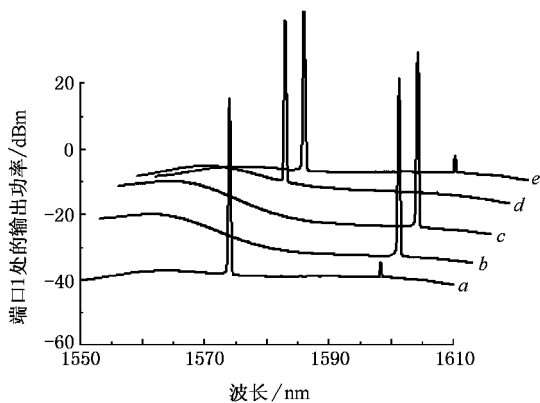


图 5 调节 PC 使 FLM 在其最大和最小反射率之间变化时,EDFL 双稳态变换和两波长切换的实验结果(抽运光功率为 200 mW,稳态  $b$  和  $d$  对应的 FLM 反射率分别为 90% 和 3%,稳态  $a$ 、 $c$  和  $e$  对应的反射率相同、约为 50%)

FLM 最大和最小反射率内调节 PC,依然能够实现双稳态变换和波长切换,表明 FLM 反射率为 3% 时,其双稳态曲线的 STP 大于 250 mW.

图 4 和图 5 的结果还表明,在由稳态  $a$  变换到稳态  $c$ 、再由稳态  $c$  变换回到稳态  $d$  ( $e$ ) 的过程中,分别要经过稳态  $b$  和  $d$ ,尽管稳态  $b$  和  $c$ 、稳态  $d$  和  $e$  ( $a$ ) 对应的振荡波长分别相同,但稳态  $b$  和  $d$  的 PC 状态不同于稳态  $a$  ( $e$ ) 和  $c$  的 PC 状态,即 FLM 反射率不同,从而导致了处于稳态  $b$  与  $c$ 、稳态  $d$  与  $e$  ( $a$ ) 时分别对应的  $\lambda_2$  和  $\lambda_1$  输出功率也不相同,但稳态  $a$  与  $e$  时的  $\lambda_1$  的输出功率相同,稳态  $c$  时的  $\lambda_2$  输出功率在重复变换过程中也不变.

## 4. 结 论

我们通过基于 3 dB 光纤型 OC 构成的 FLM 中插入 PC,实现了对 FLM 反射率的调节,实验测得,调节 PC 可使 FLM 反射率在 3% 到 90% 之间变化.将这种具有可控反射率的 FLM 用作 L 波段双波长线形耦合腔 EDFL 的公共腔镜,发现该 EDFL 所表现的双稳态特性与 FLM 的反射率有关,从而通过调节 PC 实现了对双稳态特性的有效控制,并且,双稳态特性随 FLM 反射率呈单调变化.在此基础上,利用这种单调变化的规律,我们提出了一种双波长双稳态相互变换、两波长相互切换的方法,并进行了实验验证,结果表明,当调节 PC 使 FLM 在其最大和最小反射率之间变化时,对于处于大于 FLM 最大反射率时的 FTP 和小于 FLM 最小反射率时的 STP 之间的任意固定抽运光功率,均可实现双稳态的相互变换和两波长的相互切换,且这种由 PC 控制的双稳态变换和波长切换与 PC 的初始状态无关.

- [1] Ball G A, Morey W W 1992 *Opt. Lett.* **17** 420
- [2] Ball G A, Morey W W 1994 *Opt. Lett.* **19** 1979
- [3] Song Y W, Havstad S A, Starodubov D, Xie Y, Willner A E, Feinberg J 2001 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **13** 1167
- [4] Guan B O, Tam H Y, Chan H L W, Dong X Y, Choy C L, Demokan M S 2002 *Opt. Commun.* **202** 331
- [5] Feng X H, Liu Y G, Sun L, Yuan S Z, Kai G Y, Dong X Y 2005

*Chin. Phys.* **14** 779

- [6] Mao Q H, Lit J W Y 2002 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **14** 1252
- [7] Mao Q H, Lit J W Y 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 1335
- [8] Mao Q H, Lit J W Y 2003 *IEEE J. Quantum Electron.* **39** 1252
- [9] Mortimore D B 1988 *J. Lightwave Technol.* **6** 1217
- [10] Birks T A, Morkel P 1988 *Appl. Opt.* **27** 3107

# Bistability-mapping of L-band dual-wavelength erbium-doped fiber laser based on fiber loop mirror<sup>\*</sup>

Mao Qing-He Feng Su-Juan Jiang Jian Zhu Zong-Jiu Liu Wen-Qing

(*Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)

(Received 24 March 2006; revised manuscript received 31 May 2006)

## Abstract

A technique for controlling and mapping the optical bistability of an L-band dual-wavelength erbium-doped fiber laser (EDFL) with cascaded linearly coupled cavities was presented and demonstrated in this paper. By using a fiber loop mirror (FLM) with a polarization controller (PC) in the loop as the common mirror of the laser, we found that the bistability of the laser may be efficiently controlled by adjusting the reflectivity of the FLM which is determined by the PC state. Moreover, the bistability varies monotonically with the reflectivity of the FLM. By making use of this property, the two stable states and the two potential lasing wavelengths of the laser may be respectively mapped and switched with respect to each other by adjusting the PC for any fixed pump powers, as long as the pump power lies between the first turning point of the bistability for the maximum reflectivity of the FLM and the second turning point of the bistability for the minimum reflectivity of it.

**Keywords** : erbium-doped fiber laser (EDFL), fiber loop mirror (FLM), polarization controller (PC), optical bistability

**PACC** : 4281, 4265P, 4260B, 4260D

---

<sup>\*</sup> Project supported by the "Hundred of Talents Program" of the Chinese Academy of Sciences, and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60677050).