

# 多偏振控制高双折射光纤环形镜输出特性的理论和实验研究\*

王静<sup>†</sup> 张晨芳 康泽新 孙将 郑斯文 林楨 王春灿 简水生

(北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

(2011年1月18日收到; 2011年6月21日收到修改稿)

针对光纤环形镜(FLM)在单偏振控制下波长间隔不可调等缺点, 对多偏振控制 FLM 的输出特性进行了理论和实验研究. 用 Jones 矩阵法分析了单偏振、双偏振和三偏振控制 FLM 的透射谱, 研究发现: 相比单偏振控制 FLM, 多偏振控制 FLM 具有波长间隔可调 and 边频抑制等特性; 透射谱的偏振可调性随偏振控制级数的增加而增强, 实验结果与理论研究一致. 实验中利用双偏振控制 FLM 作为波长选择的光纤激光器输出激光的边模抑制比较采用单偏振控制 FLM 时提高了近 5 dB.

**关键词:** 光纤光学, 光纤环形镜, 偏振控制, 边频抑制

**PACS:** 42.81.-i, 42.81.Gs, 42.79.Ci

## 1. 引言

光纤环形镜(FLM)因具有梳状滤波和偏振可调节特性在光纤通信系统中有着极其重要的应用<sup>[1-3]</sup>. 目前, 主要使用的全光纤滤波器还有 Mach-Zehnder(M-Z)干涉仪、Fabry-Pérot(F-P)滤波器和光纤 Bragg 光栅(FBG)等. FLM 由耦合器、偏振控制器和多段光纤连接而成, 在环路中两干涉光反向经过相同的器件, 因此它具有比 M-Z 干涉仪的输出更加稳定, 比 F-P 滤波器的制作成本低、调节性强, 比 FBG 的波长调节范围更宽<sup>[4-6]</sup>等优势. 近年来, 对 FLM 的报道大多集中在单偏振控制下 FLM 的输出特性, 并且理论模型不够直观. 文献[7]虽通过理论和实验研究了由多段高双折射光纤组成的 FLM 中双折射光纤对滤波特性的影响, 但没有涉及偏振控制的影响.

本文通过理论和实验研究了由多段高双折射偏振保持光纤(PMF)和多个偏振控制器(PC)组成的多偏振控制 FLM 的滤波特性. 在文献[8,9]中我们利用 Jones 矩阵法已经给出了单偏振控制 FLM 和双偏振控制 FLM 的一些特性, 并且在多波长光纤激光器

中可作为滤波器件使用. 本文将推广到多偏振控制 FLM, 重点研究了输出光的偏振调节特性. 由多偏振控制 FLM 的透射谱发现其具有下列特性: 多偏振控制 FLM 的可调性随级数增加而增强; 它不仅显示出了单偏振控制 FLM 的输出特性, 而且多偏振控制 FLM 的波长间隔随偏振控制可调并且表现出很好的边频抑制特性; 多偏振控制 FLM 可以实现窄线宽、宽间隔的滤波输出. 作为滤波装置将其应用在光纤激光器中时, 由双偏振控制 FLM 作为波长选择器件的环形腔掺铒光纤激光器的边模得到了有效抑制.

## 2. 理论分析

图 1 为多偏振控制 FLM 的结构示意图, 它由一个 3 dB 耦合器、多段 PMF、多个 PC 通过单模光纤连接而成. FLM 的工作过程是当输入光  $E_1$  从端口 1 进入 3 dB 耦合器后, 分为从端口 3 出射的 50% 正向传输光和端口 4 出射的 50% 逆向传输光. 经过每段 PMF 后偏振光会旋转一个角度, 在快慢轴上出现一个相位延迟  $\Delta\phi = |\phi_x - \phi_y|$ ; PC 可以控制光的偏振状态, 经它调节的光可以得到任意偏振态. 两束光反向分别经过 PC 和 PMF 后回到耦合器实现相干

\* 中央高等学校基本科研基金(批准号:2011YJS218)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: 07111001@bjtu.edu.cn

输出. 反射光 $E'_1$ 和透射光 $E'_2$ 分别由端口 1 和端口 2 输出.

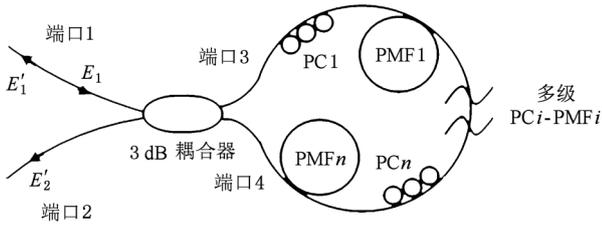


图 1 多偏振控制 FLM 结构示意图

我们用 Jones 矩阵来分析整个传输过程. 图 2 为多偏振控制 FLM 的 Jones 矩阵示意图. 每一级偏振控制包含一个 PC 和一段 PMF, 顺时针的光依次经过第 1 级偏振控制、第 2 级偏振控制, 直至第  $n$  级偏振控制; 逆时针的光将反向依次经过第  $n$  级偏振控制、第  $n-1$  级偏振控制, 直至第 1 级偏振控制. 图 2 中的  $M_j$  和  $M'_j$  分别代表第  $j$  级 ( $j=1, 2, \dots, n$ ) 偏振控制在顺时针和逆时针传输时的 Jones 矩阵.

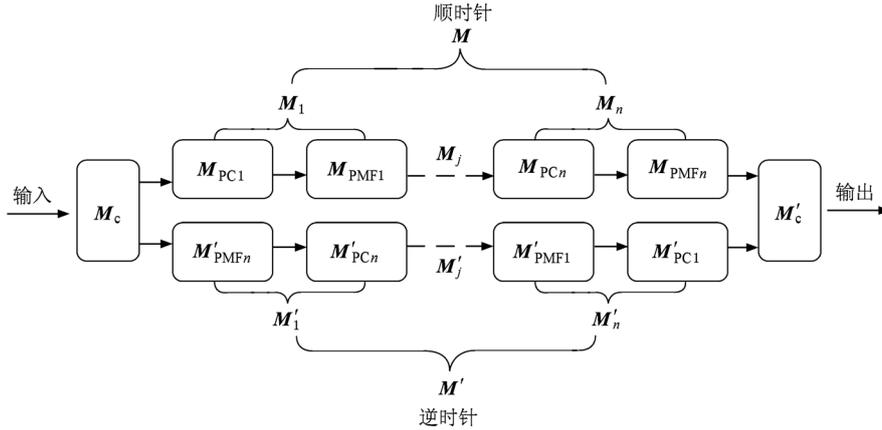


图 2 多偏振控制 FLM 的 Jones 矩阵示意图

每一级偏振控制 Jones 矩阵可以表示为每个器件 Jones 矩阵的乘积,  $M_j = M_{PCj} M_{PMFj}$  和  $M'_j = M'_{PMFj} M'_{PCj}$ . 顺时针和逆时针的总 Jones 矩阵  $M$  和  $M'$  又可以表示为所有偏振控制 Jones 矩阵的乘积,

$$M = M_n M_{n-1} \cdots M_1, \quad (1)$$

$$M' = M'_1 M'_2 \cdots M'_n. \quad (2)$$

由(1), (2)式和 FLM 的传输矩阵表达式<sup>[9]</sup>可得到多偏振控制 FLM 的输出光与输入光的关系为

$$\begin{bmatrix} E'_1 \\ E'_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} i(M'_1 M'_2 \cdots M'_n + M_n M_{n-1} \cdots M_1) E_1 \\ (M'_1 M'_2 \cdots M'_n - M_n M_{n-1} \cdots M_1) E_1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

其中端口 1 的入射光场可以表示为

$$E_1 = \begin{pmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_1 \cos\theta \\ E_1 \sin\theta \end{pmatrix},$$

$\theta$  为入射光的偏振方向与  $x$  轴的夹角.  $M_{PC}$  和  $M_{PMF}$  均为  $4 \times 4$  矩阵, 此时透射光  $E'_2$  可表示为

$$\begin{bmatrix} E'_{2x} \\ E'_{2y} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} (M'_1 M'_2 \cdots M'_n - M_n M_{n-1} \cdots M_1) \begin{bmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

利用(4)式可以计算得到输出光的透射率

$$T(\lambda) = |E'_2|^2 / |E_1|^2.$$

依据以上分析, 本文模拟了多偏振控制 FLM 的透射谱. 在实际光纤系统中, 由于光纤熔接原因每一段 PMF 的快轴不会完全保持平行. 当两光纤之间存在一个角度  $\alpha$  时, 一束光经过第二段 PMF 时在其快慢轴上产生的相移  $\phi_x$  和  $\phi_y$  可以分解到第一段 PMF 的快慢轴上,

$$\phi_x = \phi_x \cos\alpha - \phi_y \sin\alpha,$$

$$\phi_y = \phi_x \sin\alpha + \phi_y \cos\alpha.$$

因此, 只需考虑在第一段 PMF 上的最终相移量. 模拟中假设每一段 PMF 的快轴互相平行.

### 2.1. 偏振无关性

在实际光纤系统中, 光的偏振状态在传输过程中会发生改变, 因此研究不同偏振态的输入光经过 FLM 后的输出特性十分重要. 文献[8, 9]研究表明, 单偏振控制 FLM 和双偏振控制 FLM 是偏振无关的, 本文以三偏振控制 FLM 为例研究了多偏振控制 FLM 的偏振依赖特性. 图 3 中曲线  $a$ 、曲线  $b$  和曲线  $c$  是在相同偏振控制状态和相同 PMF 参数的情况下, 当入射光的偏振方向与光纤

快轴夹角分别为  $\pi/3, \pi/4$  和  $\pi/5$  时的透射谱. 从图 3 可以看出: 三条曲线完全重合, 说明三偏振控制 FLM 是偏振无关的, 这种特性使其可以广泛应用于光纤通信系统中.

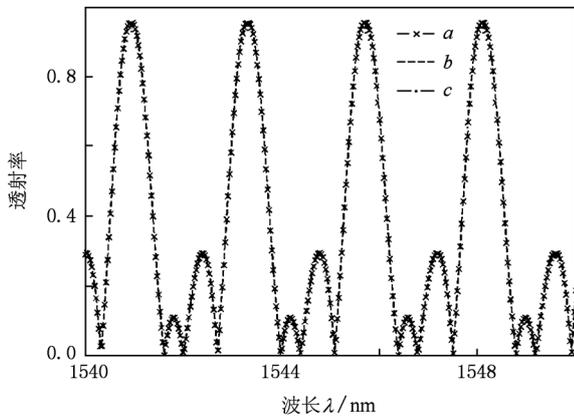


图 3 三偏振控制 FLM 的偏振无关性

### 2.2. PMF 对滤波的影响

PMF 的相移  $\exp(i2\pi\Delta nL/\lambda)$  由快慢轴的折射率差  $\Delta n$  引起, 其中  $L$  为 PMF 的长度,  $\lambda$  为光波长,  $\Delta n = n_x - n_y$  表示了光纤的双折射系数. 文献[8]研究得出, 单偏振控制 FLM 的滤波周期随  $\Delta n$  或  $L$  的增大而减小. 图 4 给出了在相同偏振控制态下 PMF 的参数  $L\Delta n$  对三偏振控制 FLM 输出的影响. 模拟中选取各级偏振控制中的 PMF 均等长. 图 4 曲线  $a$  对应  $L = 9$  m,  $\Delta n = 5 \times 10^{-4}$ , 曲线  $b$  对应  $L = 3$  m,  $\Delta n = 7.5 \times 10^{-4}$ , 曲线  $c$  对应  $L = 3$  m,  $\Delta n = 5 \times 10^{-4}$ . 图 4 显示透射谱的波长间隔为  $\Delta\lambda_1 : \Delta\lambda_2 : \Delta\lambda_3 = 3 : 2 : 1$ ,

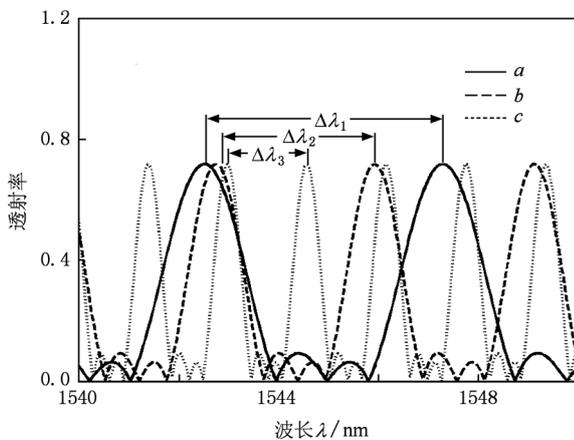


图 4 PMF 参数对三偏振控制 FLM 输出的影响

与  $L\Delta n$  成反比, 这可以解释为 PMF 在快慢轴产生的相位差是由于  $\Delta n$  在  $L$  上的积累所致.

### 2.3. PC 对滤波的影响

偏振控制对 FLM 透射谱的影响主要通过调节 PC 来实现. 实验中的 PC 由三个刚性圆盘组成, 调整普通单模光纤缠绕圈数使其作用等效为“ $\lambda/4$  波片 +  $\lambda/2$  波片 +  $\lambda/4$  波片”. 第一个  $\lambda/4$  波片的作用是将输入光的偏振态变为线偏振,  $\lambda/2$  波片旋转线偏振的方向, 第二个  $\lambda/4$  波片的作用是将线偏振态变为任意的圆偏振态输出. 因此, 在实验中调节三个刚性圆盘的倾斜角度可以完全控制输出光的偏振态, 达到 Poincaré 球中的任意偏振态<sup>[10, 11]</sup>. 在单偏振控制 FLM 中 PC 对透射谱的调节作用有限, 而在多偏振控制 FLM 中 PC 的偏振调节性增强. 图 5 比较了单偏振控制 FLM、双偏振控制 FLM 和三偏振控制 FLM 透射谱的偏振调节特性.

模拟中 PMF 总长度均为 3 m, 且各级偏振控制中 PMF 均等长. 图 5(a) 中单偏振控制 FLM 显示出梳状滤波特性, 透射谱的峰值和峰位随偏振控制态的变化而改变, 但谱峰间隔保持不变, 与文献[8]中讨论的结果一致. 图 5(b) 为双偏振控制 FLM 在不同偏振控制态下的透射谱, 图 5(c) 和 (d) 为三偏振控制 FLM 的透射谱. 从图 5(b) 的曲线  $c$  和图 5(d) 可看出, 双偏振控制 FLM 和三偏振控制 FLM 均显示出单偏振控制 FLM 的输出特性, 特别是在图 5(d) 中透射谱的峰值和峰位随偏振控制变化但波长间隔不变, 这与单偏振控制 FLM 的调节特性一致. 由于模拟中选取的 PMF 长度  $L$  相同, 故三种 FLM 的最小波长间隔也相同. 与图 5(a) 的情形相比, 图 5(b) 和 (c) 显示出双偏振和三偏振具有更灵活的调节特性. 当调节 PC 时发现, 多偏振控制 FLM 透射谱的波长间隔也随之发生变化, 如图 5(b) 的曲线  $a$ 、曲线  $b$  和图 5(c) 所示. 进一步的观察发现, 多偏振控制 FLM 可通过以下两种方式实现滤波间隔调节: 一种是由于边频抑制导致的谱峰间隔变化, 如图 5(b) 中曲线  $a$  和图 5(c) 中曲线  $a$  所示; 另一种是没有通过边频抑制现象直接实现了谱峰间隔的调节, 属于纯间隔调节, 如图 5(c) 中曲线  $b$  和曲线  $c$  所示. 相比纯间隔调节, 边频抑制特性实现了窄线宽、宽间隔的梳状滤波输出. 这些特性在实验中得到验证.

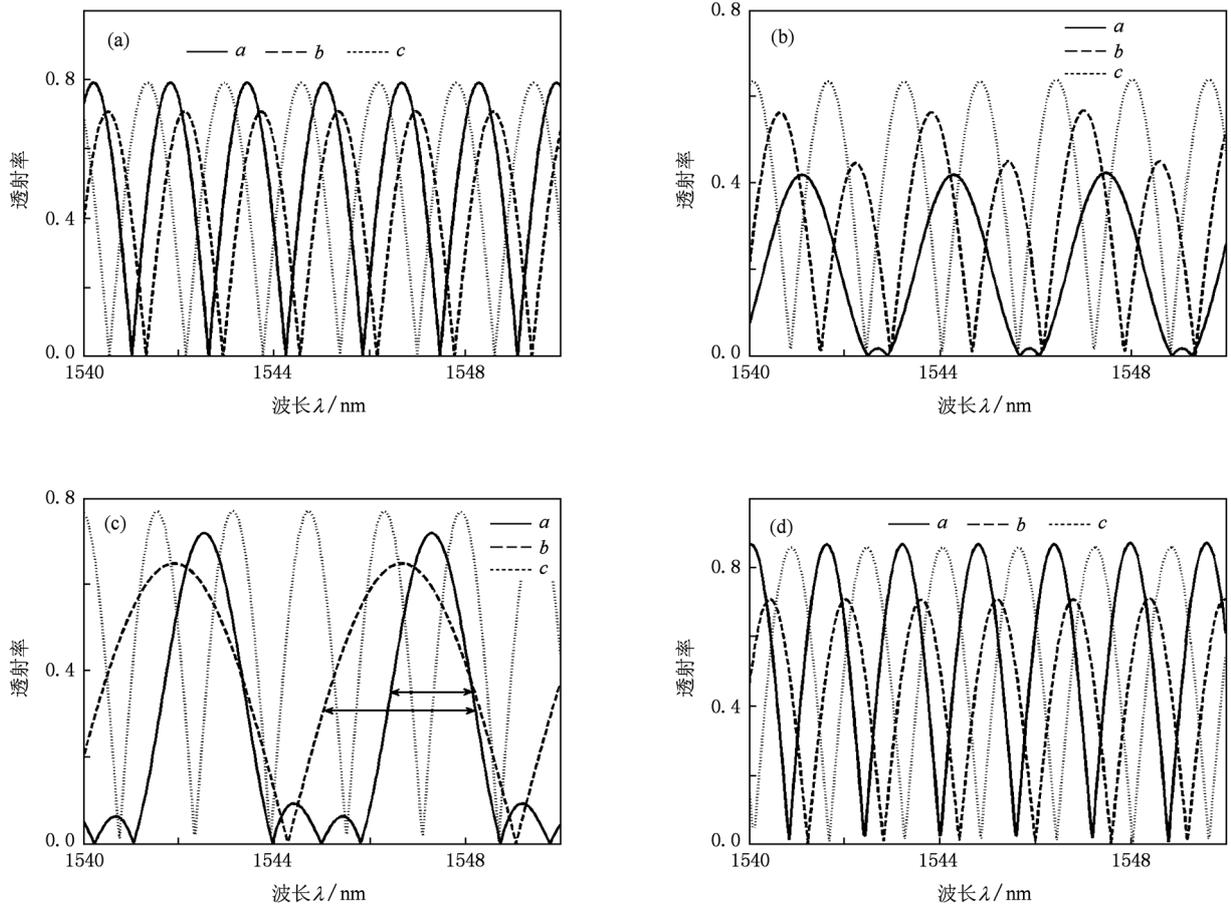


图5 不同偏振控制态下的透射谱 (a)单偏振控制 FLM,(b)双偏振控制 FLM,(c)三偏振控制 FLM,(d)可实现单偏振输出的三偏振控制 FLM

### 3. 实验结果及讨论

实验中通过图 6 所示的透射谱测量装置对单偏振控制 FLM、双偏振控制 FLM 和三偏振控制 FLM 的透射谱进行了研究. 一个由 980 nm 抽运源、掺铒光纤和隔离器组成的放大自发辐射光源连接到 FLM 的输入端(端口 1), 隔离器用于防止端口 1 的反射光损害光源, 在透射端(端口 2)连接一个光谱分析仪来检测透射光谱. 实验中使用 ANDO 公司生产的测量范围为 600—1700 nm 的 AQ6317 型光谱分析仪, 测量精度为 0.01 nm, 自制 PMF 的非线性系数  $\Delta n$  约为  $3 \times 10^{-4}$ , PMF1, PMF2 和 PMF3 长度分别为 4, 6 和 3 m. 图 7 显示了单偏振控制 FLM、双偏振控制 FLM 和三偏振控制 FLM 在不同控制态下的透射谱.

从图 7(a)可以看出, 透射谱峰值位置和大小随偏振控制态的变化而改变, 但谱峰间隔保持不变.

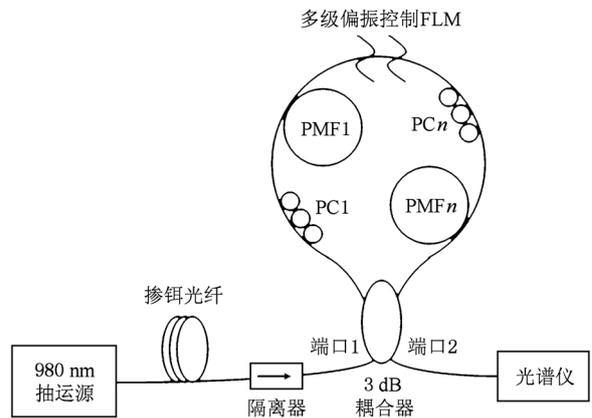


图6 透射谱测量装置示意图

这与理论分析一致. 图 7(b)和(c)透射谱的谱峰间隔随偏振控制可调并且显示出边频抑制特性. 同时还可以看到, 多偏振控制 FLM 显示出单偏振控制 FLM 的输出特性, 这时滤波的最小谱峰间隔取决于 PMF 的总长度, 如图 7(b)曲线 c 和图 7(c)曲线 d

所示. 图 7(c) 的谱峰间隔可调性和边频抑制特性都优于图 7(b) 的情形, 实现了大范围波长间隔的调节, 图 7(c) 四条曲线的谱峰间隔依次为 3, 3, 1.5 和 1 nm. 而图 7(c) 的曲线 a、曲线 c 和曲线 d 中没有出现边频抑制现象, 属于纯间隔调节, 这时当实现

大谱峰间隔输出时其线宽也必将变大. 观察图 7(c) 的曲线 b 和曲线 a 可以发现, 当其谱峰间隔相同时, 由于图 7(c) 曲线 b 的边频抑制特性, 透射谱的线宽变窄. 边频抑制现象实现了大间隔、窄线宽的梳状滤波输出, 这些与理论分析一致.

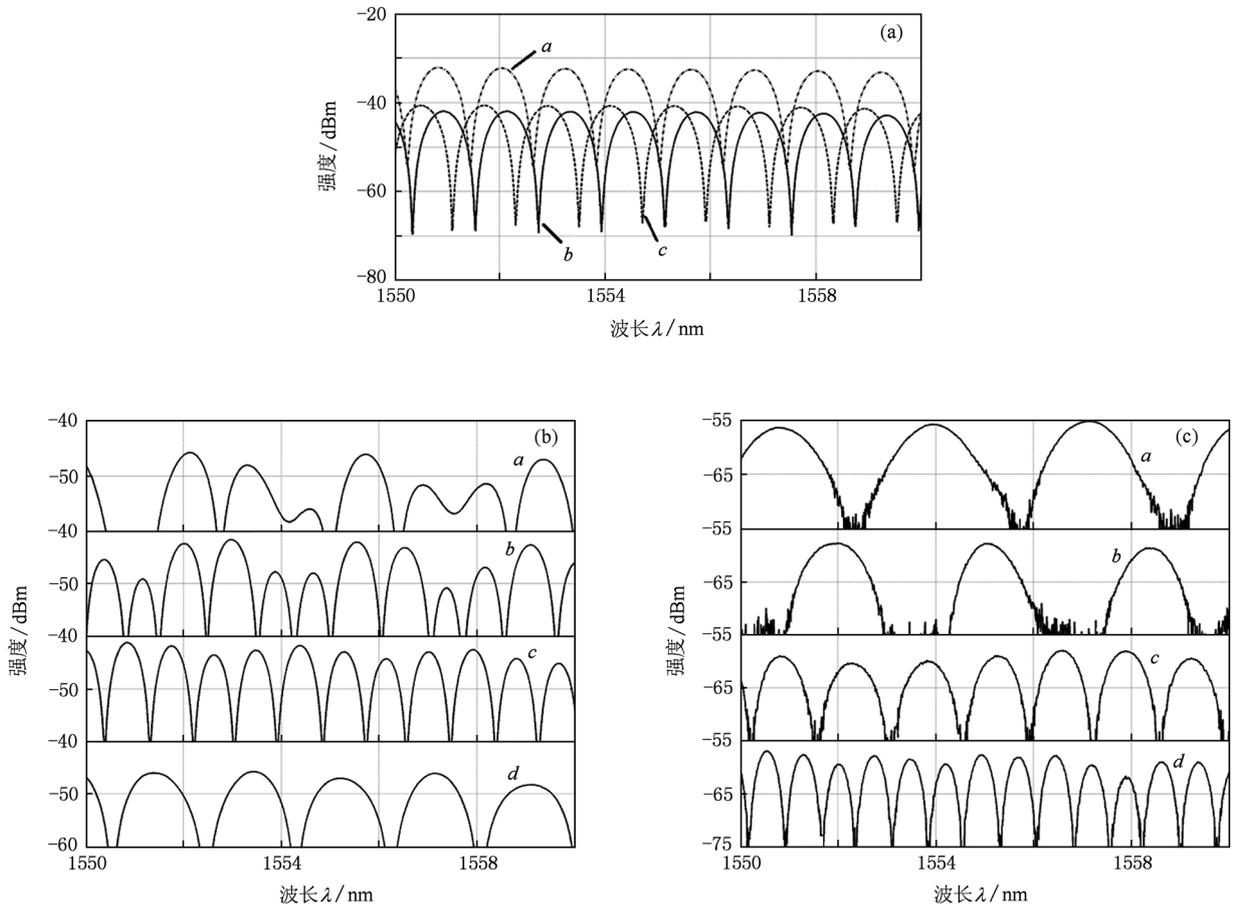


图 7 不同偏振控制态下的透射谱 (a) 单偏振控制 FLM, (b) 双偏振控制 FLM, (c) 三偏振控制 FLM

以上讨论了多偏振控制 FLM 的输出调节特性, 特别是边频抑制特性. 这里我们将其应用在光纤激光器中, 用以观察边频抑制性的实际应用. 多偏振控制 FLM 作为滤波器件用于环形腔光纤激光器的结构如图 8 所示.

图 8 中 980 nm 半导体激光器作为抽运源, 隔离器保证了光的单向传输, 多偏振控制 FLM 起波长选择的作用, 环形腔中的光经过 3dB 耦合器进入 FLM, 光在环形腔中形成振荡, 并由输出耦合器的 5% 端输出激光, 95% 端反馈回环形腔. 图 9 和图 10 分别示出了由单偏振控制 FLM 和双偏振控制 FLM 作为波长选择的环形腔光纤激光器单波长激光输出结果.

在相同抽运功率输入的情况下, 图 10 所示为双

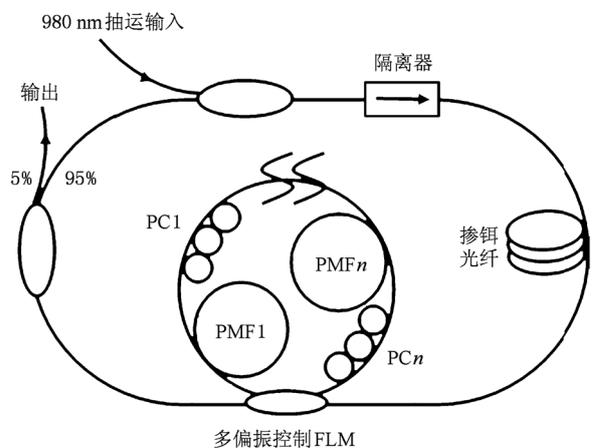


图 8 多偏振控制 FLM 组成的环形腔光纤激光器结构示意图

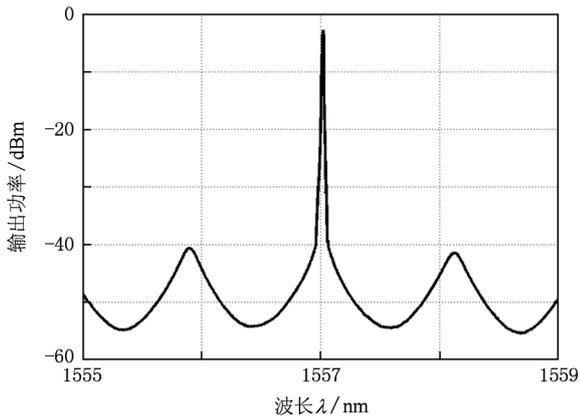


图9 单偏振控制 FLM 组成光纤激光器的激光输出

偏振控制 FLM 组成光纤激光器调节 PC 时在 1533.468 和 1531.968 nm 的激光输出. 实验中的单偏振控制 FLM 环形腔光纤激光器在 1530 nm 波段附近更容易形成多模输出, 图 9 显示了单偏振控制 FLM 环形腔光纤激光器在 1557.334 nm 处的激光输出, 两种激光器输出激光的 3 dB 线宽都小于 0.03 nm. 从图 9 和图 10(a) 可以看出, 激光边模没有得到有效的抑制, 边模抑制比 (SMSR) 为 35 dB 左右. 但调节 PC 时观察到图 10(b) 表现出明显的边模抑制特性, 在激光中心波长 5 nm 附近的边模被有效抑制, SMSR 达到 40 dB 左右, 比没有边模抑制的情况提高近 5 dB. 将边频抑制特性用于光纤激光器时可以有效地抑制其他模式, 进一步提高 SMSR.

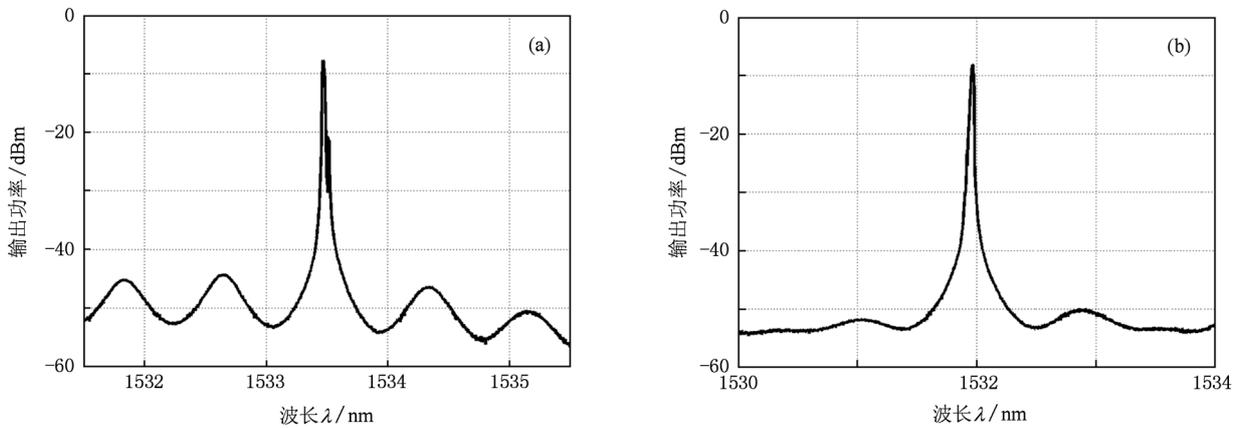


图 10 双偏振控制 FLM 组成光纤激光器在不同偏振状态下的激光输出 (a)无边模抑制, (b)有边模抑制

#### 4. 结 论

针对单偏振控制 FLM 的波长间隔随偏振控制不可调等缺点, 本文讨论了多偏振控制 FLM 的滤波特性和应用. 多偏振控制 FLM 不仅显示出单偏振控制 FLM 的输出特性, 还表现出更强的谱峰间隔可调和边频抑制等特性, 并且随级数的增加而

增强. 边频抑制现象使多偏振控制 FLM 从理论和实验上都实现了窄线宽、宽间隔的滤波输出. 本文进行了实验验证并将其应用在环形腔掺铒光纤激光器中, 观察到由于边频抑制作用输出激光的 SMSR 较没有边模抑制情形时提高了近 5 dB. 多偏振控制 FLM 所表现出来的结构简单、调节灵活性强、偏振无关、成本低等优势, 可以使其广泛应用于光纤通信中.

[1] Mirza M A, Stewart G 2008 *Appl. Opt.* **47** 5242  
 [2] Simova E, Golub I, Picard M J 2005 *J. Opt. Soc. Am. B* **22** 1723  
 [3] Dong X Y, Zhao C L, Guan B O, Tan H Y, Yuan S Z, Kai G Y, Dong X Y 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2750 (in Chinese) [董

新永、赵春柳、关柏鸥、谭华耀、袁树忠、开桂云、董孝义 2002 物理学报 **51** 2750]  
 [4] Sun X T, Liu J Q, Zhou J, Chen W B 2008 *Chin. J. Lasers* **35** 2005 (in Chinese) [孙旭涛、刘继桥、周军、陈卫标 2008 中国激光 **35** 2005]

- [5] Pan J J, Shi Y 1995 *Electron. Lett.* **31** 1164  
 [6] Kråkenes K, Bløtekjær K 1995 *J. Lightwave Technol.* **13** 682  
 [7] Zhou G, Zhao Q D, Liu Y G, Kai G Y, Dong X Y 2004 *Acta Opt. Sin.* **24** 341 (in Chinese)[周 广、赵启大、刘艳阁、开桂云、董孝义 2004 光学学报 **24** 341]  
 [8] Wang J, Zheng K, Li J, Liu L S, Chen G X, Jian S S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7695 (in Chinese)[王 静、郑 凯、李 坚、刘利松、陈根祥、简水生 2009 物理学报 **58** 7695]  
 [9] Wang J, Zheng K, Peng J, Liu L S, Li J, Jian S S 2009 *Opt. Express* **17** 10573  
 [10] Feng S J, Shang L, Mao Q H 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4677 (in Chinese)[冯素娟、尚 亮、毛庆和 2007 物理学报 **56** 4677]  
 [11] Heismann F 1994 *J. Lightwave Technol.* **12** 690

## The transmission characteristic of the multi-polarization controlled fiber loop mirror<sup>\*</sup>

Wang Jing<sup>†</sup> Zhang Chen-Fang Kang Ze-Xin Sun Jiang Zheng Si-Wen  
 Lin Zhen Wang Chun-Can Jian Shui-Sheng

(*Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*)

(Received 18 January 2011; revised manuscript received 21 June 2011)

### Abstract

The multi-polarization controlled fiber loop mirrors (FLMs) are presented and their characteristics are studied, because of the non-tunable characteristic of the wavelength interval for single-polarization controlled FLM. The multi-polarization controlled FLMs are studied theoretically with the Jones matrix. We experimentally study the single-, double- and triple-polarization FLMs, and the results show that compared with the single-polarization controlled FLM, the multi-polarization controlled FLM possesses the interval tunability and the side-frequency restriction are shown. The experimental results are in good agreement with theoretical results. The side-frequency restriction characteristic is shown in a ring fiber laser of double-polarization FLM and the side-mode suppression ratio is enhanced by 5 dB compared with the one of single-polarization FLM.

**Keywords:** fiber optics, fiber loop mirror, polarization controlled, side-frequency restriction

**PACS:** 42.81.-i, 42.81.Gs, 42.79.Ci

<sup>\*</sup> Project supported by the Fundamental Scientific Research Foundation for the Central Universities of China (Grant No. 2011YJS218).

<sup>†</sup> E-mail: 07111001@bjtu.edu.cn