

# 利用偏振控制器连续调节光纤环镜的反射率<sup>\*</sup>

冯素娟 尚 亮 毛庆和<sup>†</sup>

(中国科学院安徽光学精密机械研究所,合肥 230031)

(2006 年 10 月 30 日收到 2007 年 1 月 22 日收到修改稿)

研究了一种新型光纤环镜 (FLM) 的原理与特性,这种 FLM 由在普通光纤环镜中插入光纤型偏振控制器 (PC) 构成.通过等效光路分析建立了该 FLM 的理论模型,并对其反射特性进行了数值模拟.研究表明,通过改变 PC 的状态,即改变其双折射效应的快轴取向或强度,可连续调节 FLM 的反射率,反射率谱具有宽带特性,主要受光纤耦合器工作带宽的影响.此外,对 FLM 的反射特性还进行了实验研究.实验结果也证实,通过调节 PC 状态,FLM 反射率可在其最大和最小值之间连续调节,实验测得 FLM 最大和最小反射率分别可达 93% 和 2%.根据 PC 双折射效应的快轴取向和强度与其三个圆盘倾斜角度之间的对应关系,比较实验与模拟结果后发现,两者符合很好.

关键词:光纤环镜,偏振控制器,光纤耦合器,反射率

PACC:4280M,4281F,4281M,4230Q

## 1. 引 言

光反射镜是一种基本的光学元件,应用广泛.光纤型反射镜是众多光纤器件与部件的基本单元,是构建全光纤传输系统的基础,在光纤通信、光纤传感以及光信号检测与处理等方面都具有重要的应用<sup>[1-3]</sup>.目前,全光纤型反射镜主要有光纤 Bragg 光栅 (FBG) 和基于光纤耦合器的不同拓扑结构的光纤环两类<sup>[4,5]</sup>.FBG 是通过在纤芯中沿光纤轴向引入折射率扰动,形成纵向折射率光栅,实现对输入光波的反射,其反射中心波长、反射带宽和反射率大小由纵向折射率光栅的光栅周期、折射率扰动的调制指数以及光栅长度决定<sup>[4]</sup>.虽然施加外力或改变温度可改变 FBG 的反射中心波长及其带宽<sup>[6,7]</sup>,但是,FBG 反射率一般难以改变.对于由光纤耦合器构成的各种光纤环<sup>[5,8-10]</sup>,虽然利用不同拓扑结构(如复合环<sup>[8,9]</sup>等)可对其反射特性进行特殊设计,但是因这类光纤环的反射率主要由光纤耦合器的耦合系数决定,一般也难以实现对其反射率大小的调节.因此,如何获得反射率宽带可调的全光纤型反射器件依然值得研究.在基于光纤耦合器的各种光纤环中,光纤环镜 (FLM) 是最简单且具有宽带特性的反射镜,其

反射特性也研究应用得最多<sup>[5,8-11]</sup>.文献<sup>[11]</sup>研究了偏振效应对 FLM 反射特性的影响.以文献<sup>[11]</sup>为基础,我们在 FLM 中通过接入光纤型偏振控制器 (PC) 以引入可控双折射效应,实现了对该 FLM 反射率的控制和大范围调节,并应用于双波长掺铒光纤激光器<sup>[12,13]</sup>,以实现双稳态变换和双波长开关操作<sup>[14]</sup>.

本文将详细研究这种带有 PC 的 FLM 的原理和特性,通过对结构和原理的分析,给出这种 FLM 的等效光路.以此为基础,利用矩阵光学原理建立描述该 FLM 输入与输出光场之间关系的理论模型,从而揭示 PC 双折射效应的快轴取向和强度对 FLM 反射率的影响.进而利用理论模型对 FLM 反射特性进行数值模拟,定量给出 PC 双折射效应的快轴取向和强度与 FLM 反射率之间的关系.并阐明当光纤耦合器 (OFC) 耦合系数为 3 dB 且忽略各器件损耗时,改变 PC 双折射效应的快轴取向或强度均可实现 FLM 反射率在 0—1 范围内的连续调谐.通过考察 FLM 反射率所受 OFC 耦合系数的影响,并考虑 OFC 工作带宽和 PC 双折射效应强度的波长依赖性,对 FLM 的反射率谱特性进行数值研究.此外,利用耦合系数为 3 dB 的 OFC 和普通商售光纤型 PC 构成的这种 FLM,对其反射特性进行实验研究,进

<sup>\*</sup> 中国科学院“百人计划”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

一步验证改变PC 状态以连续调节 FLM 反射率的结论.

## 2. 结构及原理

图 1 为本文研究的 FLM 结构,是在基于 OFC 的普通 FLM 中插入一只光纤型 PC 而构成.对于普通 FLM 若输入光场为  $E_i$ ,由 OFC 分为相位相差  $\pi/2$ 、分别依顺时针沿光纤环传输的光场  $E^{cw}$  和依逆时针传输的光场  $E^{ccw}$  经光纤环相向传输一周回到 OFC 时为  $E_o^{cw}$  和  $E_o^{ccw}$ .理想情况下  $E_o^{ccw}$  相对于  $E^{cw}$  和  $E_o^{cw}$  相对于  $E^{ccw}$  的相位延迟相同,因而普通 FLM 的反射率由 OFC 分光比决定,当 OFC 为 3 dB 耦合器时,FLM 具有全反射特性<sup>[5]</sup>.当在普通 FLM 中插入 PC 后(如图 1 所示)相当于在 FLM 中引入了可控的双折射效应,尽管 PC 对相向传输的  $E^{cw}$  和  $E^{ccw}$  的双折射强度相同,但由于  $E^{cw}$  和  $E^{ccw}$  进入 PC 的方向相反,导致  $E^{cw}$  和  $E^{ccw}$  偏振方向与 PC 双折射效应的快轴取向之间的夹角不同,从而使得  $E^{cw}$  和  $E^{ccw}$  经 PC 传输产生的相位延迟也不同.这样,FLM 的反射率将由 OFC 分光比和 PC 引入的双折射效应共同决定.由于 PC 双折射效应是可控的,即改变 PC 状态可改变其双折射效应的快轴取向和强度,因此改变 PC 的状态就可改变图 1 所示的 FLM 的

反射率.

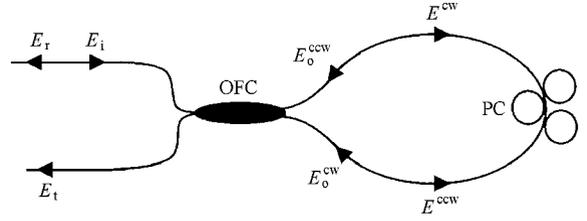


图 1 FLM 结构示意图

## 3. 理论模型

根据光波在光纤环内的传输路径,图 1 中的 FLM 可等效成图 2 所示的传输光路.为描述同一光波经 FLM 的 OFC 分束并在环内相遇时在同一坐标系下的偏振特性,图 2 唯象地引入了旋光器<sup>[15]</sup>.由图 2 可见,在 FLM 中,  $E^{cw}$  和  $E^{ccw}$  将分别沿图 2 所示的独立路径传输,即  $E^{cw}$  和  $E^{ccw}$  的传输路径分别为单模光纤 1 (SMF1<sup>cw</sup>)→旋光器 1 (ROT1<sup>cw</sup>)→PC<sup>cw</sup>→旋光器 2 (ROT2<sup>cw</sup>)→单模光纤 2 (SMF2<sup>cw</sup>) 和单模光纤 2 (SMF2<sup>ccw</sup>)→旋光器 2 (ROT2<sup>ccw</sup>)→PC<sup>ccw</sup>→旋光器 1 (ROT1<sup>ccw</sup>)→单模光纤 1 (SMF1<sup>ccw</sup>).那么,应用矩阵光学原理就可获得 FLM 的输入光  $E_i$  与其反射光  $E_r$  和透射光  $E_t$  之间的关系.

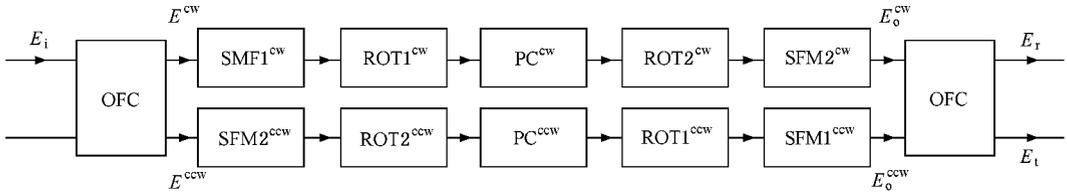


图 2 FLM 的等效传输光路示意图

设输入光场、顺时针和逆时针沿光纤环传输的光场分别为

$$E_i = \begin{bmatrix} E_{i,x} \\ E_{i,y} \end{bmatrix},$$

$$E^{cw} = \begin{bmatrix} E_x^{cw} \\ E_y^{cw} \end{bmatrix},$$

$$E^{ccw} = \begin{bmatrix} E_x^{ccw} \\ E_y^{ccw} \end{bmatrix},$$

则  $E^{cw}$ 、 $E^{ccw}$  与  $E_i$  之间满足

$$\begin{bmatrix} E_n^{cw} \\ E_n^{ccw} \end{bmatrix} = T_{OFC} \begin{bmatrix} E_{i,n} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

这里  $n = x, y$ ,  $T_{OFC}$  为耦合器的传输矩阵,

$$T_{OFC} = (1 - \gamma)^{1/2} \begin{bmatrix} (1 - K_n)^{1/2} & jK_n^{1/2} \\ jK_n^{1/2} & (1 - K_n)^{1/2} \end{bmatrix},$$

其中  $K_n$  为 OFC 的耦合系数,  $\gamma$  为 OFC 的插入损耗(这里忽略了该损耗的偏振依赖性).根据图 2 所示的等效光路,  $E_o^{cw}$  和  $E_o^{ccw}$  与  $E^{cw}$  和  $E^{ccw}$  之间有下列关系:

$$\begin{bmatrix} E_o^{cw} \\ E_o^{ccw} \end{bmatrix} = T_{SMF2}^{cw} T_{ROT2}^{cw} T_{PC}^{cw} T_{ROT1}^{cw} T_{SMF1}^{cw} \begin{bmatrix} E_x^{cw} \\ E_y^{cw} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} E_o^{ccw} \\ E_o^{cw} \end{bmatrix} = T_{SMF1}^{ccw} T_{ROT1}^{ccw} T_{PC}^{ccw} T_{ROT2}^{ccw} T_{SMF2}^{ccw} \begin{bmatrix} E_x^{ccw} \\ E_y^{ccw} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

这里  $T_{SMF1,2}^{cw}$  和  $T_{SMF2,1}^{ccw}$  为单模光纤的传输矩阵,

$$T_{SMF1,2}^{cw} = T_{SMF2,1}^{ccw} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \exp\{j(-kl_{1,2} + j\alpha l_{1,2})\},$$

其中  $k$  为波矢,  $\alpha$  为单模光纤损耗系数,  $l_{1,2}$  分别为单模光纤 1 和单模光纤 2 的长度.  $T_{ROTI,2}^{cw}$  为旋光器的传输矩阵<sup>[16]</sup>, 并且  $T_{ROTI,2}^{cw}$  和  $T_{ROTI,2}^{ccw}$  互为转置矩阵, 即

$$T_{ROTI,1}^{cw} = (T_{ROTI,1}^{ccw})^T = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$T_{ROTI,2}^{cw} = (T_{ROTI,2}^{ccw})^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$T_{PC}^{cw}$  为 PC 的传输矩阵,

$$T_{PC}^{cw} = \begin{bmatrix} \cos\delta + j\sin\delta\cos 2\Omega & j\sin\delta\sin 2\Omega \\ j\sin\delta\sin 2\Omega & \cos\delta - j\sin\delta\cos 2\Omega \end{bmatrix},$$

并有<sup>[11,16]</sup>

$$T_{PC}^{ccw} = (T_{PC}^{cw})^T,$$

其中  $2\delta$  为光场经 PC 后在其快慢轴上产生的相位延迟,  $\Omega$  为 PC 双折射效应的快轴取向相对于水平方向的夹角.

$E_r$  和  $E_t$  可由  $E_o^{cw}$  和  $E_o^{ccw}$  经下列公式得出:

$$\begin{bmatrix} E_{r,x} \\ E_{t,x} \end{bmatrix} = T_{OFC} \begin{bmatrix} E_{o,x}^{ccw} \\ E_{o,x}^{cw} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} E_{r,y} \\ E_{t,y} \end{bmatrix} = T_{OFC} \begin{bmatrix} E_{o,y}^{ccw} \\ E_{o,y}^{cw} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

由各器件的传输矩阵及(1)–(5)式可得

$$R = \frac{(AE_{i,x} + BE_{i,y})(AE_{i,x} + BE_{i,y})^* + (CE_{i,x} + DE_{i,y})(CE_{i,x} + DE_{i,y})^*}{E_{i,x}E_{i,x}^* + E_{i,y}E_{i,y}^*} (1 - \gamma) \exp[-2\alpha(l_1 + l_2)], \quad (9)$$

$$T = \frac{(EE_{i,x} + FE_{i,y})(EE_{i,x} + FE_{i,y})^* + (GE_{i,x} + HE_{i,y})(GE_{i,x} + HE_{i,y})^*}{E_{i,x}E_{i,x}^* + E_{i,y}E_{i,y}^*} (1 - \gamma) \exp[-2\alpha(l_1 + l_2)]. \quad (10)$$

再利用(8)式, 并忽略偏振效应对 OFC 耦合系数的影响, 即  $K_x = K_y = K$  则有

$$R = 4K(1 - K)(1 - \gamma) \exp[-2\alpha(l_1 + l_2)] \times (\cos^2\delta + \sin^2\delta\cos^2 2\Omega), \quad (11)$$

$$T = (1 - \gamma) \exp[-2\alpha(l_1 + l_2)] [\sin^2\delta\sin^2 2\Omega + (2K - 1)(\cos^2\delta + \sin^2\delta\cos^2 2\Omega)]. \quad (12)$$

由(11)(12)式可知, FLM 的反射率和透射率是 PC 引入的双折射快轴取向角  $\Omega$  和强度  $2\delta$  的函数. 因

$$\begin{bmatrix} E_{r,x} \\ E_{r,y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{i,x} \\ E_{i,y} \end{bmatrix} (1 - \gamma) \times \exp\{[-k(l_1 + l_2) + j\alpha(l_1 + l_2)]\} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} E_{t,x} \\ E_{t,y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E & F \\ G & H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{i,x} \\ E_{i,y} \end{bmatrix} (1 - \gamma) \times \exp\{[-k(l_1 + l_2) + j\alpha(l_1 + l_2)]\} \quad (7)$$

式中

$$A = \chi \sin\delta \cos 2\Omega - j\cos\delta K_x^{1/2}(1 - K_x^{1/2}),$$

$$B = C = \sin\delta \sin 2\Omega [K_y^{1/2}(1 - K_x^{1/2}) - K_x^{1/2}(1 - K_y^{1/2})],$$

$$D = \chi \sin\delta \cos 2\Omega + j\cos\delta K_y^{1/2}(1 - K_y^{1/2}),$$

$$E = (\cos\delta + j\sin\delta \cos 2\Omega)(2K_x - 1), \quad (8)$$

$$F = j\sin\delta \sin 2\Omega [K_x^{1/2}K_y^{1/2} + (1 - K_x)^{1/2}(1 - K_y)^{1/2}],$$

$$G = -j\sin\delta \sin 2\Omega [K_x^{1/2}K_y^{1/2} + (1 - K_x)^{1/2}(1 - K_y)^{1/2}],$$

$$H = (\cos\delta - j\sin\delta \cos 2\Omega)(1 - 2K_y).$$

定义 FLM 的反射率

$$R = \frac{E_r E_r^*}{E_i E_i^*},$$

透射率

$$T = \frac{E_t E_t^*}{E_i E_i^*}.$$

利用(6)(7)式并忽略正交偏振态之间的交叉项, 可得

此, 当改变 PC 的状态时, FLM 的反射和透射特性将随之改变.

#### 4. 数值模拟

首先忽略环内光纤的传输损耗和 OFC 的插入损耗, 并假定 OFC 为 3 dB 耦合器, 数值研究 PC 状态对 FLM 反射特性的影响. 图 3(a) 给出了几组不同

$2\delta$  时 FLM 反射率随  $\Omega$  的变化行为. 由图 3 可见, 当  $2\delta = 0, 2\pi$  时, FLM 的反射率不随  $\Omega$  变化, 恒为 1. 若  $2\delta \neq 0, 2\pi$ , FLM 的反射率随  $\Omega$  呈周期性变化, 当  $\Omega = 0, \pi/2, \pi$  时, FLM 的反射率达到最大值 1, 与  $2\delta$  的取值无关. 而当  $\Omega = \pi/4, 3\pi/4$  时, FLM 的反射率达到最小值, 但 FLM 所能达到的最小值与  $2\delta$  的取值有关, 仅当  $2\delta = \pi$  时, 该最小值才为零. 事实上,  $\Omega$  和  $2\delta$  分别代表着 PC 双折射效应的快轴取向和强度. 这样, 当  $2\delta = 0, 2\pi$  时, 对应于 PC 的双折射强度为零, 图 1 所示的 FLM 退化为普通的 FLM, 从而使得 FLM 的反射率不随  $\Omega$  变化且恒等于 1. 当  $\Omega = 0, \pi/2, \pi$  时, PC 的快轴取向处于水平或垂直平面, 这时不论 PC 的双折射强度如何, 由 PC 双折射引起的、偏振方向处于水平或垂直平面内的两相向传输光场

的相位延迟均相同, 使得图 1 所示的 FLM 也退化为普通的 FLM, 导致这时的 FLM 反射率为 1. 而当 PC 快轴取向与水平方向间的夹角  $\Omega = \pi/4, 3\pi/4$  时, PC 的双折射强度对 FLM 反射率影响最大. 图 3(b) 给出了几组不同  $\Omega$  下 FLM 反射率随 PC 双折射强度  $2\delta$  的变化关系. 由图 3(b) 可见, 当  $2\delta = 0, 2\pi$  时, 即 PC 双折射强度最小时, FLM 反射率最大且为 1. 当  $2\delta = \pi$  时, 即 PC 双折射强度最大时, FLM 反射率最小. 同样, 该最小反射率与  $\Omega$  有关, 当  $\Omega = 0$  时, FLM 反射率恒为 1 且与  $2\delta$  的大小无关. 图 3(c) 进一步给出了 FLM 反射率随  $\Omega$  和  $2\delta$  的变化行为. 可见, 当  $\Omega = \pi/4$  或  $3\pi/4$  且  $2\delta = \pi$  时, FLM 反射率为零; 而当  $2\delta = 0$  或  $2\pi$  和  $\Omega = 0, \pi/2$  或  $\pi$  时, FLM 反射率均为 1.

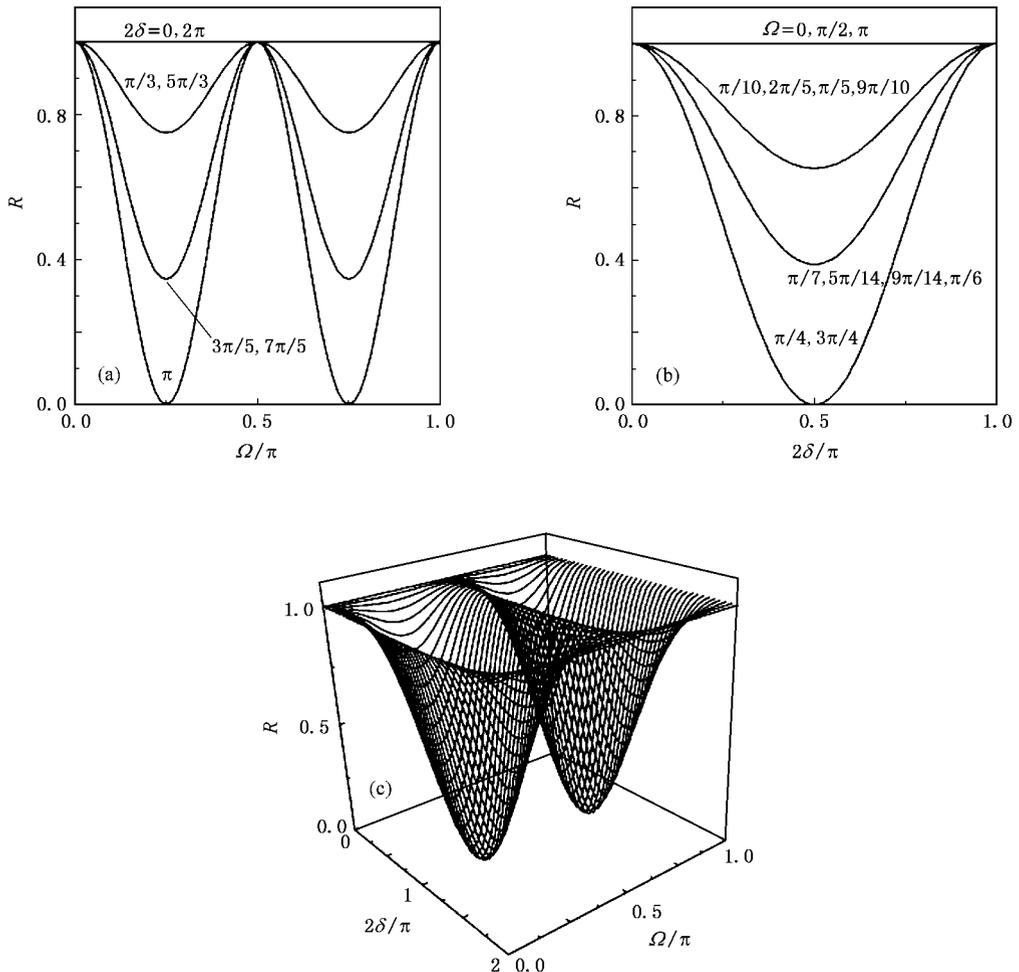


图 3 FLM 反射率  $R$  随  $\Omega$  和  $2\delta$  的变化 (a) 当  $2\delta$  取不同值时反射率  $R$  随  $\Omega$  的变化 (b) 当  $\Omega$  取不同值时反射率  $R$  随  $2\delta$  的变化 (c) 反射率  $R$  随  $\Omega$  和  $2\delta$  的变化

OFC 的耦合系数对 FLM 的反射率有影响, 图 4 给出了这种影响的数值模拟结果, 图 4(a) 为  $2\delta =$

$3\pi/5$  时反射率  $R$  与  $\Omega$  和  $K$  之间的关系, 图 4(b) 为  $\Omega = \pi/7$  时反射率  $R$  与  $2\delta$  和  $K$  之间的关系. 由图 4

可见,  $K$  的大小决定了 FLM 反射率可达到的最大值. 当  $K = 0.5$  时, FLM 反射率最大, 且仅在这时 FLM 反射率才可达最大 1. 当  $K$  偏离 0.5 时, FLM 反射率降低, 且偏离量越大反射率下降越大. 值得指出的是, 数值模拟显示, 当  $2\delta = \pi$ , 且  $\Omega = \pi/4$  或  $3\pi/4$  时, FLM 反射率为零, 不受  $K$  值的影响.

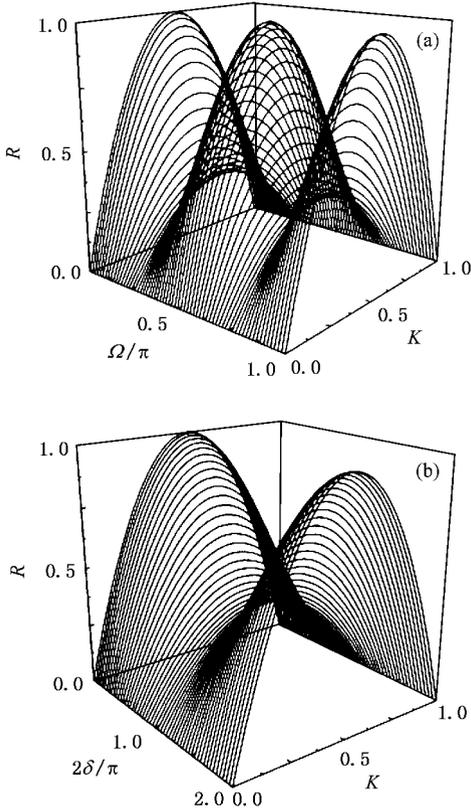


图 4 FLM 反射率  $R$  与  $\Omega$ ,  $K$  和  $2\delta$  的关系 (a) 当  $2\delta = 3\pi/5$  时  $R$  随  $\Omega$  和  $K$  的变化 (b) 当  $\Omega = \pi/7$  时  $R$  随  $2\delta$  和  $K$  的变化

即使 OFC 的耦合系数  $K = 0.5$ , 实际工作时 OFC 耦合系数也将随工作波长而变化. 一般而言, OFC 的耦合系数随波长  $\lambda$  的变化可近似表示为

$$K(\lambda) = \frac{1}{2} [\cos(\omega\lambda - \varphi)].$$

假定 OFC 的中心工作波长为 1570 nm,  $K(\lambda)$  曲线半高全宽为 60 nm (C 波段和 L 波段), 则有  $\omega = \pi/90$ ,  $\varphi = 157\pi/9$ . 另一方面, PC 快轴取向与水平方向间的夹角  $\Omega$  一般受工作波长的影响较小, 可忽略其波长依赖性. 光波经 PC 后在其快慢轴之间产生的相位差  $2\delta$  为波长的函数, 即

$$2\delta(\lambda) = \frac{2\pi}{\lambda} L_{PC} \Delta n,$$

其中  $L_{PC}$  为 PC 的光纤长度,  $\Delta n = |n_o - n_e|$  为快慢

轴上等等效折射率之差. 若忽略  $\Delta n$  的波长依赖性, 将上述  $K(\lambda)$  和  $2\delta(\lambda)$  代入 (11) 式, 可得 FLM 反射率与工作波长之间的关系. 图 5 (a) 给出了当  $\Omega = \pi/4$  时,  $\Delta n$  分别为  $0$ ,  $1.5 \times 10^{-7}$ ,  $2.5 \times 10^{-7}$  和  $3.95 \times 10^{-7}$  时的数值模拟结果. 图 5 (b) 给出了当  $\Delta n = 3.95 \times 10^{-7}$  时,  $\Omega$  分别为  $0$ ,  $\pi/12$ ,  $\pi/8$  和  $\pi/4$  时的数值模拟结果. 计算时, 取  $L_{PC}$  为 2 m. 可见, FLM 的反射率具有平坦的谱特性, 改变  $\Omega$  或  $2\delta$  均可在 60 nm 的带宽内调节 FLM 的反射率. 在 OFC 中心工作波长处 FLM 的反射率最大, 偏离中心波长后则反射率降低. 这表明 OFC 耦合系数的波长依赖性对 FLM 反射率的影响起着主要作用.

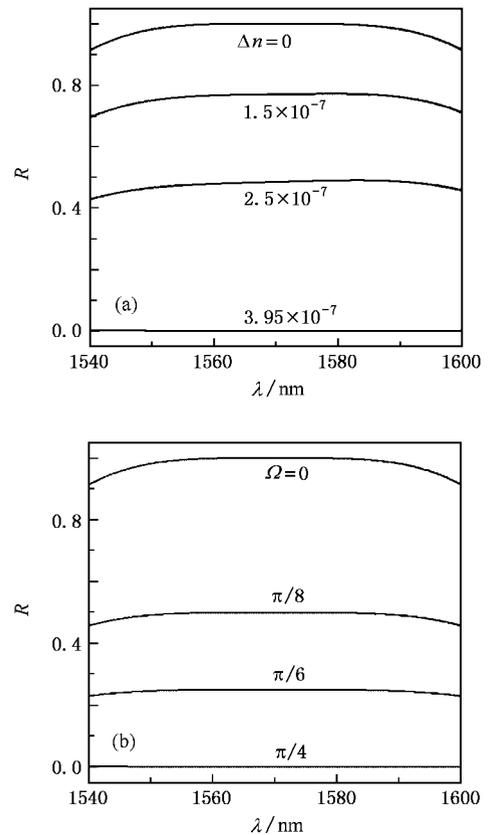


图 5 FLM 反射率谱 (a)  $\Omega = \pi/4$  (b)  $\Delta n = 3.95 \times 10^{-7}$

## 5. 实验验证

为验证上述模拟结果, 对 FLM 的反射特性也进行了实验研究, 测试方案如图 6 所示. 实验中, 构成 FLM 的 OFC 为 3 dB 光纤型耦合器, 中心工作波长为 1570 nm, 工作带宽为 C 波段和 L 波段, 所使用的是普通光纤型 PC. 测试光源分别为可调激光器和掺铒

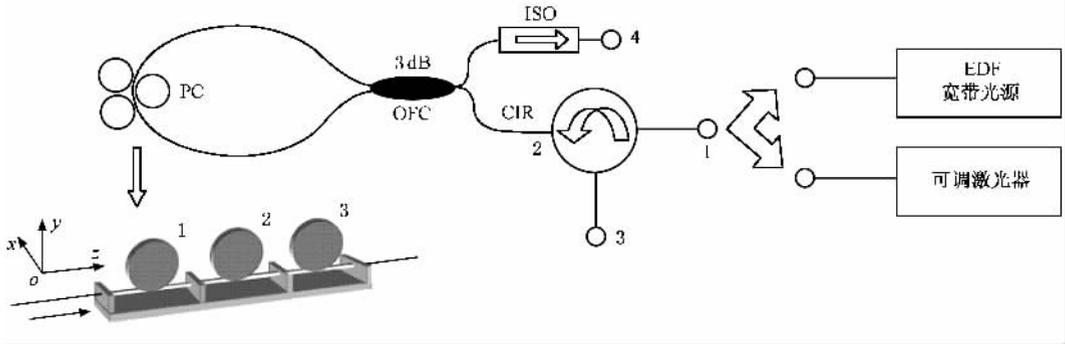


图 6 FLM 反射特性实验测试装置示意图

光纤 (EDF) 宽带光源, 测试光源的输出经三端口环形器 (CIR) 输入至待测 FLM, 由 FLM 反射的光信号分别由光功率计和光谱分析仪在 CIR 的端口 3 检测, 而透射光则在图中的端口 4 测量. 为消除系统中的不连续性产生的反射影响, 提高测量精度, 在 FLM 的透射端接入了光隔离器 (ISO), 而在 FLM 的输入 (反射) 端则采用 CIR, 这样既可起光隔离器的作用, 又便于测量实验.

如图 6 中插图所示, 普通光纤型 PC 结构包含三个刚性圆盘, 单模光纤缠绕于这三个圆盘之上, 通过将圆盘绕  $oz$  轴旋转使缠绕在圆盘上的光纤产生应力双折射, 从而起到控制偏振态的作用. 一般地, 这三个缠绕了光纤的圆盘起着  $\lambda/m$  波片的作用, 其中  $m$  为实数<sup>[17]</sup>. 为方便实验验证, 实验中所用 PC 的三个圆盘分别相当于  $\lambda/4$ ,  $\lambda/2$  和  $\lambda/4$  波片, 若设这三个圆盘所在的平面与  $ox$  轴之间的夹角分别为  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  和  $\theta_3$ , 由  $\lambda/4$  波片和  $\lambda/2$  波片的传输特性<sup>[18]</sup>可知, 第一个圆盘和第三个圆盘的传输矩阵可表示为

$$T_{1,3} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 + j\cos 2\theta_{1,3} & j\sin 2\theta_{1,3} \\ j\sin 2\theta_{1,3} & 1 - j\cos 2\theta_{1,3} \end{bmatrix},$$

而第二个圆盘的传输矩阵则为

$$T_2 = j \begin{bmatrix} \cos 2\theta_2 & \sin 2\theta_2 \\ \sin 2\theta_2 & -\cos 2\theta_2 \end{bmatrix}.$$

于是, PC 的传输矩阵可表示成

$$T_{PC}(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = T_3 T_2 T_1,$$

那么 PC 的传输特性就由三个圆盘相对于水平方向的倾斜角决定.

如上所述, PC 也可看作快轴取向与水平方向夹角为  $\Omega$ , 快慢轴相位差为  $2\delta$  的线性双折射器<sup>[11]</sup>, 其传输矩阵又可表示为

$$T_{PC}(\delta, \Omega) = \begin{bmatrix} \cos \delta + j\sin \delta \cos 2\Omega & j\sin \delta \sin 2\Omega \\ j\sin \delta \sin 2\Omega & \cos \delta - j\sin \delta \cos 2\Omega \end{bmatrix}.$$

这样就有

$$T_{PC}(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = T_{PC}(\delta, \Omega).$$

从而可建立实验测量参数  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  与理论模拟量  $\delta, \Omega$  之间的关系

$$\begin{aligned} \cos 2\theta_2 - \cos(2\theta_1 - 2\theta_2 + 2\theta_3) &= 2\sin \delta \cos 2\Omega, \\ \cos(2\theta_1 - 2\theta_2) + \cos(2\theta_2 - 2\theta_3) &= -2\cos \delta, \\ \sin(2\theta_1 - 2\theta_2) + \sin(2\theta_2 - 2\theta_3) &= 0, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\sin 2\theta_2 - \sin(2\theta_1 - 2\theta_2 + 2\theta_3) = 2\sin \delta \sin 2\Omega.$$

由此可见, PC 的快轴取向  $\Omega$  和双折射强度  $\delta$  可通过调节 PC 圆盘的倾斜角度  $\theta_1, \theta_2$  和  $\theta_3$  实现.

实验首先利用可调光源分别测试了 FLM 反射率随 PC 的  $\Omega$  和  $2\delta$  的变化行为. 根据 (13) 式, 不难确定 PC 的双折射快轴取向  $\Omega$  和双折射强度  $2\delta$  与 PC 三个圆盘的倾斜角  $\theta_1, \theta_2$  和  $\theta_3$  之间的关系. 为了方便实验操作且不失一般性, 在考察 FLM 反射率随  $2\delta$  的变化行为时, 取  $\theta_1 = \theta_3 = 0$ , 这样就有  $\Omega = \pi/4$ ,  $2\delta = 2\pi - 4\theta_2$ , 即固定第一个圆盘、第三个圆盘的倾斜角度  $\theta_1$  和  $\theta_3$  均为零, 通过改变第二个圆盘的倾斜角度  $\theta_2$  来改变  $2\delta$  的大小. 实验发现, 当调节  $\theta_2$  在  $0-\pi/2$  和  $\pi/2-\pi$  内变化时, FLM 反射率可在其最大值和最小值之间变化. 图 7(a) 给出了在 1570 nm 处 FLM 反射率  $R$  随  $2\delta$  变化的实验测试结果, 其中实心 and 空心圆点分别对应于  $\theta_2$  在  $0-\pi/2$  和  $\pi/2-\pi$  之间变化时的测量数据. 将这些测量值与模拟结果 (实线所示, 考虑了器件损耗因素并取  $\gamma = 0.05$ ) 相比较后可知, 两者很好地相符. 图 7(b) 给出了在 1570 nm 处 FLM 反射率  $R$  随  $\Omega$  变化的测试结果. 图 7(b) 的测量条件是固定 PC 的第三个圆盘的倾斜角度  $\theta_3$  为  $\pi/2$ , 在  $0-\pi$  范围内调整第一个圆盘的倾斜角度  $\theta_1$ , 同时调整第二个圆盘并始终保持其倾斜角度  $\theta_2$  为  $\frac{\theta_1}{2}$  或  $\frac{(\theta_1 + \pi)}{2}$ . 由 (13) 式可知, 该测量

条件相当于  $2\delta = \pi$ ,  $\Omega = \theta_2$ , 即保持  $2\delta$  为  $\pi$  不变, 而通过调整  $\theta_2$  改变 PC 的快轴取向  $\Omega$ . 由图 7(b) 可见, 当  $\Omega$  在  $0-\pi$  范围内变化时, FLM 反射率也可在其最大值和最小值之间连续变化, 且与模拟结果(实线)较好地一致. 值得指出的是, 实验中对其他波长及  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  和  $\theta_3$  取不同值时的 FLM 反射率也进行了测试, 所得实验结果均与模拟结果相符.

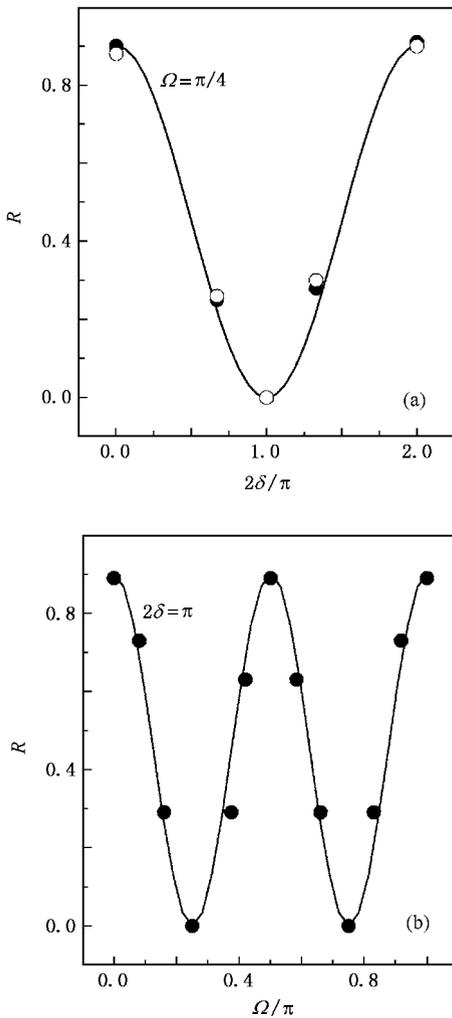


图 7 实验测量 PC 状态对 FLM 反射率  $R$  的影响 (a)  $R$  随  $2\delta$  的变化 (b)  $R$  随  $\Omega$  的变化

采用 EDF 宽带光源, 通过分别测量 FLM 的输入光波与反射输出光波的光谱, 研究了 FLM 的反射率谱特性. 图 8 给出了 PC 典型状态下实验测量的 FLM 反射率谱, 图 8 的测量条件是固定第一个圆盘和第三个圆盘的倾斜角度均为零, 调节第二个圆盘的倾斜角度, 即固定  $\Omega = \pi/4$ , 通过改变第二个圆盘的倾斜角度  $\theta_2$  来改变  $2\delta$  的大小. 由图 8 可见, FLM 可达到的最小和最大反射率分别为 2% 和 93%, 通过调

整第二个圆盘的倾斜角度  $\theta_2$ , FLM 的反射率可处于 2% 与 93% 之间的任意值. 从图 8 还可以看出, FLM 的反射率  $R$  具有宽带特性, 在 60 nm 光谱范围内反射率的变化仅为 4%. 与图 5 相比, 实验测得的 FLM 反射率  $R$  随波长  $\lambda$  变化不明显, 这是由于实验中所用的 OFC 带宽较大所致. 同样值得指出的是, 实验对  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  和  $\theta_3$  取不同值时的 FLM 反射率谱特性也进行了测试, 结果均表明 FLM 的反射率谱具有宽带特性, 且反射率大小均可连续调节, 但是对于不同的测量条件, FLM 可达到的最大和最小反射率不同.

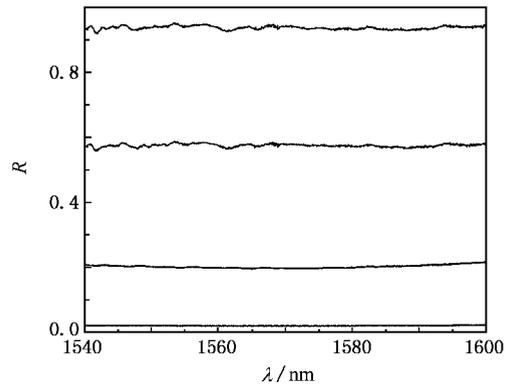


图 8 实测的典型 FLM 反射率谱

## 6. 结 论

本文研究了一种新型的反射率连续可调的 FLM, 该 FLM 由在普通 FLM 内插入光纤型偏振控制器构成. 通过对其工作原理的分析, 给出了该 FLM 的等效光路, 进而建立了理论模型. 利用建立的理论模型, 对 FLM 的反射特性进行了数值模拟. 结果表明, 当 OFC 的耦合系数为 0.5 且忽略各器件损耗时, 通过调节 PC 的状态, 即改变其双折射效应的快轴取向或强度, FLM 反射率可在  $0-1$  之间连续变化; 当 OFC 的耦合系数偏离 0.5 时, 调节 PC 的状态也可连续调谐 FLM 的反射率, 但可达到的最大和最小反射率将相应减小和增大. 对 FLM 反射率谱的模拟结果表明, 反射率谱具有宽带特性, 在最大反射率附近主要受到 OFC 工作带宽的影响. 此外, 对 FLM 的反射特性还进行了实验研究. 实验结果表明, 通过调节 PC 的状态, 即改变其三个圆盘的倾斜角度, FLM 反射率可在其最大和最小反射率之间连续调谐, 实验测得 FLM 可达到的最大和最小反射率分别为 93% 和 2%. 根据 PC 快轴取向和快慢轴相位差与其三个圆盘的倾斜角度之间的对应关系, 将实验结

果与模拟结果比较后发现,两者能很好地一致.显然,这种新型 FLM 因具有反射率连续可调、宽带特

性以及全光纤结构等优点,在光纤系统与器件中将发挥重要的作用.

- 
- [ 1 ] Rossi G , Jerphagnon O , Olsson B E , Blumenthal D J 2000 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **12** 897
- [ 2 ] Dong B , Zhao Q D , Feng L J , Guo T , Xue L F , Li S H , Gu H 2006 *Appl. Opt.* **45** 7767
- [ 3 ] Bigo S , Lecelre O , Desurvire E 1997 *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* **3** 1208
- [ 4 ] Lee T P , Zah C E , Bhat R , Young W C , Pathak B , Favire F , Lin P S D , Andreadakis N C , Caneau C , Rahjel A W , Koza M , Gamelin J K , Curtis L , Mahoney D D , Lepore A 1996 *J. Lightwave Technol.* **14** 967
- [ 5 ] Birks T A , Morkel P 1988 *Appl. Opt.* **27** 3107
- [ 6 ] Guan B O , Tam H Y , Chan H L W , Dong X Y , Choy C L , Demokan M S 2002 *Opt. Commun.* **202** 331
- [ 7 ] Feng X H , Liu Y G , Sun L , Yuan S Z , Kai G Y , Dong X Y 2005 *Chin. Phys.* **14** 779
- [ 8 ] Zhang J L , Lit J W Y 1994 *J. Opt. Soc. Am. A* **11** 1867
- [ 9 ] Kim S W , Kang J U 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 494
- [ 10 ] Han M , Lou C Y , Li Y H , Gao Y Z 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 751 [ 韩 明、姜采云、李玉华、高以智 2000 物理学报 **49** 751 ]
- [ 11 ] Mortimore D B 1988 *J. Lightwave Technol.* **6** 1217
- [ 12 ] Mao Q H , Lit J W Y 2002 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **14** 1252
- [ 13 ] Mao Q H , Lit J W Y 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 1335
- [ 14 ] Mao Q H , Feng S J , Jiang J , Zhu Z J , Liu W Q 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 296 [ 毛庆和、冯素娟、蒋 建、朱宗玖、刘文清 2007 物理学报 **56** 296 ]
- [ 15 ] Roman K , Byoung Y K 1998 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **10** 340
- [ 16 ] Yu A , Siddiqui A S 1995 *IEE Proc. Optoelectron.* **142** 165
- [ 17 ] Lefevre H C 1980 *Electron. Lett.* **16** 778
- [ 18 ] Heismann F 1994 *J. Lightwave Technol.* **12** 690

# Continuously adjusting the reflectivity of fiber loop mirror using a polarization controller<sup>\*</sup>

Feng Su-Juan Shang Liang Mao Qing-He<sup>†</sup>

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

( Received 30 October 2006 ; revised manuscript received 22 January 2007 )

## Abstract

Reflection characteristics of a novel fiber loop mirror ( FLM ) , which is formed by inserting a fiber polarization controller ( PC ) into the loop , are investigated. Based on the equivalent optical-path analysis , a theoretical model for the FLM is presented. The reflection characteristics of the FLM are then simulated in detail with the model. Our simulation results show that , by varying the PC working conditions , i. e. the fast axis orientation or the intensity of the birefringence induced by the PC , the reflectivity of the FLM may be continuously tuned between 0 and 1. The spectral characteristic of reflectivity of the FLM is wide and flattened , limited only by the operating bandwidth of the optical fiber coupler used. Moreover , the reflection characteristics of the FLM are further investigated experimentally. The experimental results also show that by varying the working conditions of the PC , the reflectivity of the FLM may actually be continuously adjusted between its maximum and minimum values , which were measured to be 93% and 2% , respectively. The experimentally determined dependence of the fast axis orientation and intensity of the birefringence induced by the PC on the inclination angle of the three rigid discs with respect to the level of the PC verified the results of theoretical simulations.

**Keywords** : fiber loop mirror , polarization controller , optical fiber coupler , reflectivity

**PACC** : 4280M , 4281F , 4281M , 4230Q

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

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