

# 基于 Lyot 型光纤消偏器特性的研究

延凤平 姚毅 简水生

(北方交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

**摘 要** 在对 Lyot 型光纤消偏器的特性进行系统的理论分析的基础上, 首次推导出并讨论了其偏振度与相应变量之间的函数关系。实际制作了偏振度为 2.0% 的 Lyot 型光纤消偏器, 并由此验证了理论分析结果。

**关键词** 偏振度, 光纤消偏器, 保偏光纤。

## 1 引 言

Bohm、Burns 等人在 Lyot 型光纤消偏器的理论方面作过不少工作<sup>[1~3]</sup>。但是, 他们所做的工作都是仅仅限于理想状态——两光纤的双折射主轴之间的夹角为 45° 的情况进行了分析, 并且对于影响消偏器的主要性能指标——偏振度的各参数未作详细的阐述。本文首次将两光纤的双折射主轴之间的夹角  $\theta$  视为变量, 在普遍的意义详细地分析了光纤消偏器的工作特性与影响其偏振度的各个参数之间的关系, 从而为实际制作和应用消偏器的工作提供了全面的理论指导。

在理论分析的基础上, 本文还建立了实验系统。并且实际制作了偏振度为 2.0% 的 Lyot 型光纤消偏器。实验表明, 理论分析与实际结果能够很好地吻合。

## 2 理论分析

Lyot 型光纤消偏器的结构如图 1 所示。从物理意义上说, 这种光纤消偏器的工作原理是利用沿保偏光纤的两双折射主轴传输的光的时延特性, 将偏振光的两种偏振本征态 ( $x$  轴偏振态,  $y$  轴偏振态) 从时间上拉开。从而实现输入光的消偏。

假定光纤为线性双折射, 并且两个偏振本征状态的复数光场幅度为  $A_x$ 、 $A_y$ 。它们的传输常数为  $\beta_x$ 、 $\beta_y$ 。当忽略光纤的损耗时, 有:

$$\frac{dA_x}{dz} + j\beta_x A_x = jk(z)A_y, \quad \frac{dA_y}{dz} + i\beta_y A_y = jk^*(z)A_x \quad (1)$$

式中  $z$  为轴向坐标,  $k(z)$  为介于两个偏振本征状态间的随机耦合系数,  $*$  为复数共扼。实际上  $|k(z)| \ll \beta_x$  或  $\beta_y$ , 于是在零次近似 ( $k(z) = 0$ ) 下, 得:  $A_x(z) = A_x(0) \exp(-j\beta_x z)$ ,  $A_y(z) = A_y(0) \exp(-j\beta_y z)$ 。

如果定义一个向量  $A(z) = \begin{pmatrix} A_x(z) \\ A_y(z) \end{pmatrix}$ ，则输出向量  $A(z=L)$  (即光纤的末端) 就是输入向量  $A(z=0)$  与一个琼斯(Jones)矩阵  $M$  的乘积，即

$$A(L) = MA(0) \tag{2}$$

$$M = \begin{pmatrix} \exp(-j\delta L) & 0 \\ 0 & \exp(j\delta L) \end{pmatrix} \exp(-j\bar{\phi}) \tag{3}$$

其中,  $\delta = (\beta_x - \beta_y)/2$ ,  $\bar{\phi} = (\beta_x + \beta_y)L/2$ ,  $M = M_2 R_\theta M_1$ ,  $R_\theta = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$ 。  $M_1$ 、 $M_2$  分别为光纤段  $L_1$ 、 $L_2$  所对应的琼斯矩阵。 $\theta$  为在  $L_1$ 、 $L_2$  的接头处两光纤双折射主轴之间的夹角。通常  $L_1$ 、 $L_2$  均由同一光纤制成，因此  $\delta_1 = \delta_2$ 。使用一阶近似  $\beta_x = \beta_{x0} + \beta_{x0}(\omega - \omega_0)$ ,  $\beta_y = \beta_{y0} + \beta_{y0}(\omega - \omega_0)$ ,  $\beta_{x0} = \beta_x(\omega)|_{\omega=\omega_0}$ ,  $\beta_{y0} = \beta_y(\omega)|_{\omega=\omega_0}$ 。并利用傅里叶反变换，可以得到时域函数  $E_x(t)$ ,  $E_y(t)$ 。于是相干矩阵  $J$  可以表示为

$$J = \langle E \cdot E^+ \rangle = \begin{pmatrix} \langle E_x E_x^+ \rangle & \langle E_x E_y^+ \rangle \\ \langle E_y E_x^+ \rangle & \langle E_y E_y^+ \rangle \end{pmatrix} \tag{4}$$

其中，“+”表示哈密顿转置， $\langle \rangle$  表示时间平均。经过一系列复杂的运算，得到消偏器的偏振度为：

$$\begin{aligned} P = & \{ 1 - \sin^2(2\theta) (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) - \sin^2(2\theta_y) (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \\ & + \frac{1}{2} \sin(4\theta) \sin^4 \theta \cos(\Delta\beta_0 L_1) r(L_1) \\ & + \sin^2(2\theta) \sin^2(2\theta_y) \cos^2(\Delta\beta_0 L_1) r^2(L_1) + \sin^2(2\theta) \cos^2(2\theta_y) r^2(L_2) \\ & + \cos^4 \theta \sin^2(2\theta_y) r^2(L_2 + L_1) + \sin^4 \theta \sin^2(2\theta_y) r^2(L_2 - L_1) \\ & - \sin(2\theta) \cos^2 \sin(4\theta_y) \cos(\Delta\beta_0 L_1) r(L_2) r(L_2 + L_1) \\ & - \frac{1}{2} \sin^2(2\theta) \sin^2(2\theta_y) \cos(2\Delta\beta_0 L_1) r(L_2 + L_1) r(L_2 - L_1) \\ & + \sin(2\theta) \sin^2 \theta \sin(4\theta_y) \cos(\Delta\beta_0 L_1) r(L_2) r(L_2 - L_1) \\ & + \sin(2\theta) \sin^2 \theta \sin(4\theta_y) \cos(\Delta\beta_0 L_1) r(L_2) r(L_2 - L_1) \}^{1/2} \end{aligned} \tag{5}$$

式中  $\theta$  为在入射面处入射光的偏振方向与  $X$  轴之间的夹角， $r(z)$  表示光源的相干度。对于如图 2 所示的三种常见的光源谱，有：Rectangular  $r = \frac{\sin \alpha}{\alpha}$ , Gaussian  $r = \exp(-(\frac{\alpha}{2\sqrt{\ln 2}})^2)$ , Lorentzian:  $r = \exp(-\alpha)$ 。

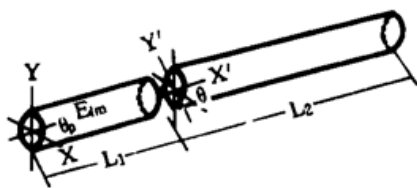


Fig. 1 Model for the Lyot depolarizer- formed with the birefringent fiber

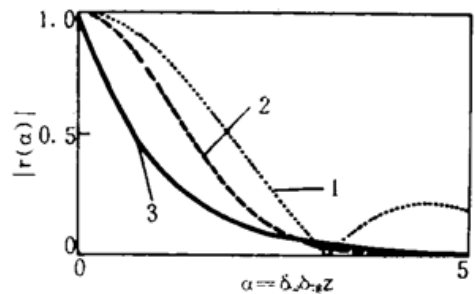


Fig. 2 The corresponding function for the degree of coherence to the sources with various band shape spectra  
1. Rectangular band shape spectrum, 2. Gaussian band shape spectrum, 3. Lorentzian band shape spectrum

$$\alpha = \frac{2\pi \Delta\lambda}{\lambda L_p} z \tag{6}$$

式中  $L_p$  为保偏光纤的拍长,  $\Delta\lambda$  为光源的谱宽。当  $\Delta\lambda = 20 \text{ nm}$ ,  $\lambda = 1.30 \mu\text{m}$ ,  $L_p = 2.5 \text{ mm}$  时, 得到:  $\alpha \approx 38.64z$ 。于是:

1) 对于矩形谱, 只有当  $\alpha = N\pi$ ,  $N$  为整数, 即  $z = 0.081 Nm$  时, 才有  $r(\alpha) = 0$ 。此时,  $L_1 = 0.081 \text{ m}$ ,  $L_2 = 2L_1 = 0.162 \text{ m}$ 。只是这种光源谱并不常见, 它只适合于短波长的红光激光器, 因此这里不作详细的讨论。

2) 对于高斯及洛仑兹谱, 由图 2 可知, 它们的变化趋势是一致的。本文取具有代表性的洛仑兹谱进行数值分析, 结果如图 3、图 4 所示。

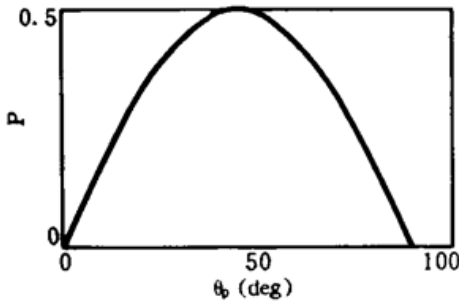


Fig. 3 The relationship between  $P$  and  $\theta_p$ , with  $L_2 : L_1 = 1 : 1$  and  $\theta = 45^\circ$

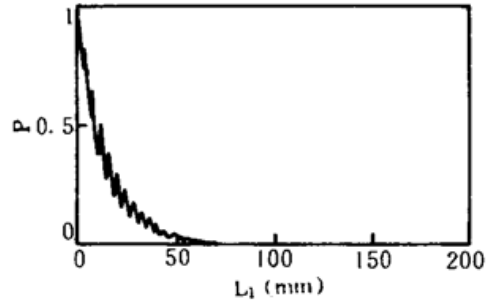


Fig. 4 The relationship between  $P$  and  $L_1$  with  $\theta = 45^\circ$  and  $L_2 : L_1 = 2 : 1$

由图 3 可以看出, 光纤消偏器对两光纤  $L_1$ 、 $L_2$  的长度比例是有要求的 (即  $L_2 : L_1 \geq 2 : 1$ ), 虽然在两光纤熔接点处双折射轴的转角  $\theta$  为  $45^\circ$ , 但是当两光纤的长度之比趋近于 1 时, 也不能达到消偏的目的。

由图 4 可以看出, 当  $\theta = 45^\circ$  并且  $L_2 : L_1 = 2 : 1$  时, 消偏器的偏振度  $P$  随着光纤  $L_1$  的长度的增加而呈振荡性的指数下降趋势。从理论上说, 只有当  $\alpha \rightarrow \infty$  时, 才能使  $r(\alpha) = 0$ 。但是, 当  $\alpha = 6.908$ , 即  $z = 0.179 \text{ m}$  时,  $r(\alpha) \approx 0.001$ 。此时可认为  $r(\alpha) \approx 0$ 。由此可得  $L_1 = 0.179 \text{ m}$ ,  $L_2 = 2L_1 = 0.358 \text{ m}$ 。据上述分析可知, 对于给定的光源谱和光纤, 通过合理选取  $L_1$ ,  $L_2$ , 可以做到  $r(L_1)$ ,  $r(L_2)$ ,  $r(L_1 + L_2)$  及  $r(L_2 - L_1)$  均为零。于是, 消偏器的偏振度  $P$  为:

$$p = \{1 - \sin^2(2\theta) - \sin^2(2\theta_p) + \sin^2(2\theta) \sin^2(2\theta_p)\}^{1/2} = |\cos(2\theta_p)| |\cos(2\theta)| \tag{7}$$

(7)式表明,  $\theta_p$  和  $\theta$  对于  $P$  具有同样的效应。也正如图 5(a)所表示的那样,  $P$  是  $\theta$  的周期为  $\pi/2$  的函数, 只有当  $\theta = 45^\circ$  时才产生消偏。表 1 表示了在  $\theta = 45^\circ$  附近时  $P$  的变化情况, 它表明在  $\theta = 45^\circ$  附近,  $P$  对于  $\theta$  的变化很敏感。只有具备了高分辨率的光纤旋转机构, 才能制作出高性能的光纤消偏器。

Table 1. The relationship between  $P$  and  $\Delta\theta = |45^\circ - \theta|$  near  $\theta = 45^\circ$

$\Delta\theta(^{\circ})$	1.0	0.5	0.1
$P$	0.0348995	0.0174524	0.0034907
$\Delta\theta(^{\circ})$	0.017	0.01	0.001
$P$	0.0005817	0.0003491	0.0000349

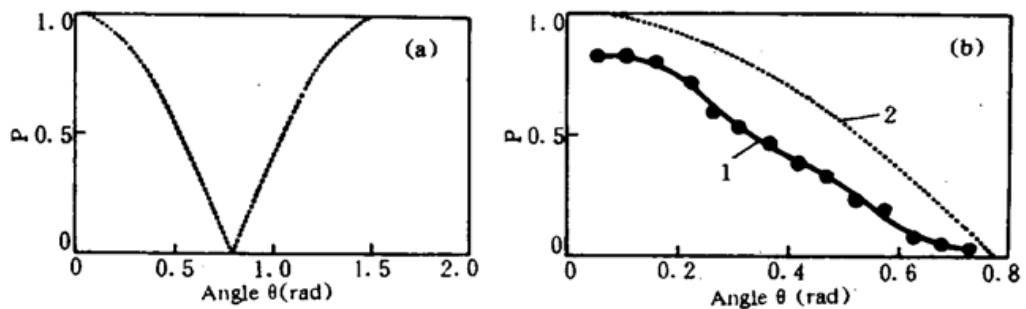


Fig. 5 (a) The theoretical curve, (b) The comparison of the experimental curve and the theoretical curve. 1, experimental curve 2, theoretical curve

### 3 实 验

实验装置示意图如图 6 所示, 其中, 实验用 PANDA 光纤具有如下参数: 损耗为 2.7 dB/km, 消光比为 28 dB, 截止波长为 1.12  $\mu\text{m}$ , 工作波长为 1.3  $\mu\text{m}$ , 拍长为 2.5mm。本系统由如下三部分构成: 入射部分 (SLD, PC1,  $P_1$ ,  $\lambda/2$  波片), 光纤调整部分, 检测部分 (M,  $P_2$ , Detector)。

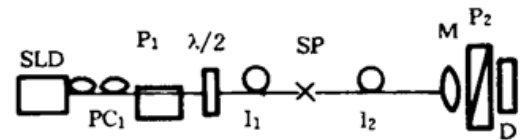


Fig. 6 The experimental system used to make the Lyot optical fiber depolarizer

光源 SLD 发出部分偏振光, 调节偏振控制器 PC1, 使其输出光的偏振方向与起偏器  $P_1$  的通过光轴方向一致, 从而使  $P_1$  输出光的强度及消光比达到最大。 $\lambda/2$  波片被插入到光纤  $L_1$  的前面, 用来改变入射角  $\theta$ , 使偏振光可以以任意角度输入光纤。其作用有两个: 一方面使开始制作消偏器时的  $\theta$ , 为  $45^\circ$  从而以最大的动态范围和灵敏度调整  $\theta$  角; 另一方面也可以在最后定性地判别消偏器偏振度的大小。聚焦透镜 M 具有一定的消偏作用 (约 0.01%)。在本实验中光纤 (长度为 1.5 m) 未在 1:2 处截断时, 检偏器检测到的消光比仍有 30 dB, 这一动态范围足以用来适应  $0.2 \sim 1^\circ$  的角的调整。

实验使用 Ericsson 保偏光纤熔接机并配以特殊的旋转机构制作光纤消偏器, 其转动精度可以达到  $0.2^\circ$ 。利用本实验系统制作了一大批光纤消偏器, 偏振度为 1%~3%。其中之一的偏振特性如图 5(b) 所示。这些光纤消偏器大部分已被应用到消偏型光纤陀螺中, 实验证明它们均具有良好的性能。

**总 结** 光纤消偏器以其突出的优点能够代替价格昂贵的保偏光纤应用在低、中级精度的光纤陀螺中。本文利用导出的公式从理论上完整地分析了光源的谱宽 ( $\delta_\omega$ ), 光纤的偏振模色散 ( $\delta_{\nu}$ ), 光纤的长度 ( $L_1, L_2$ ) 以及光纤偏振主轴的错位角 ( $\theta$ ) 等诸因素对消偏器的偏振度  $P$  的影响。并且指出  $\delta_\omega, \delta_{\nu}$  及  $L_1, L_2$  对于  $P$  具有同样的效应。数值分析的结果表明, 当  $\alpha = \delta_\omega \delta_{\nu} z > 6.908$  时, 增大  $\alpha$  对于  $P$  的效应已经变得很不明显了, 此时仅有  $\theta$  对于  $P$  起很大的作用。因此, 必须具备高精度的光纤旋转机构才能制作出高性能的光纤消偏器。实际制作的光纤消偏器已经证实了这一理论分析结果。

## 参 考 文 献

- [1] K. Bohm, K. Peterman, E. Weidel, Performance of depolarizers with birefringent single-mode fibers. *J. Ligh. Tech.*, 1983, LT-1(1): 71~74
- [2] W. K. Burns, Degree of polarization in the Lyot Depolarizer. *J. Ligh. Tech.*, 1983, LT-1(3): 475~479
- [3] A. P. Loeber, Depolarization of white-light by a birefringent crystal. I. the Lyot depolarizer. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, 72(5): 650~656
- [4] Du Xinzhen, Zhang Weixu, Single-mode fiber optic gyroscopes. Beijing, China, *China Sixth Anniversary of Optical Fiber Communication*, Oct, 1993: 896~899

## Characteristics of Lyot Optical Fiber Depolarizer

Yan Fengping      Yao Yi      Jian Shuishing

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

(Received 12 October 1994; revised 11 August 1995)

**Abstract** The characteristics of a Lyot optical fiber depolarizer has been investigated theoretically and experimentally. The formulas with respect to the degree of polarization and the corresponding parameters have been derived and discussed for the first time. Experimental results verified the validity of this depolarizer architecture. A depolarizer with a degree of polarization of 2.0% has been obtained.

**Key words** degree of polarization, optical fiber depolarizer, polarization maintaining fiber.