

在线单模光纤偏振控制器研究

姚毅 施昆 路伟东 庞翠珠 简水生

(北方交通大学光波所, 100044)

摘 要 利用 Poincare 球理论首次全面分析了在线全光纤偏振[SOP(state of polarization)]控制器。结果发现该偏振器可以有八种不同路径, 实现任意两偏振态之间的转化。最后通过实验验证了其工作性能。

关键词 光纤, 偏振控制, Poincare 球。

1 引 言

在相干光通信、光纤陀螺及一系列干涉型传感器中都要求两束相干光的偏振态一致以获得最佳干涉效果^[1]。德国的 Ulrich 和 Johnson 等人已为此做了许多工作^[2~6]。利用弯曲光纤引入应力线性双折射, 通过控制光纤弯曲半径及弯曲圈数制成在线单模光纤 $\lambda/4$ 波片和 $\lambda/2$ 波片^[3]。主轴方向可以改变的两个 $\lambda/4$ 波片和一片 $\lambda/2$ 波片便可构成一个偏振控制器。第一个 $\lambda/4$ 波片将光纤中传播的椭圆偏振态变成线性偏振态。 $\lambda/2$ 波片将此线性偏振态旋转至所需要的方向。最后一个 $\lambda/4$ 波片将 $\lambda/2$ 波片输出的线偏态变成所需的椭圆偏振态。这样, 偏振控制器就能实现任意两个偏振态之间的转化。换句话讲: 无论光纤端口处输入任何偏振态都可以通过调节偏振控制器, 在输出端得到任意所需要的偏振态。利用 Poincare 球描述法分析了光的偏振态在控制器中的变化过程并推导出相应的公式^[8]。实验结果证明按计算参数设计的偏振控制器能完成偏振控制功能。并按成功地用于干涉型光纤陀螺实验系统^[9]。

2 理论分析

2.1 在线单模光纤双折射波片

光纤波片如图 1 所示。设快轴在光纤环平面沿直径 x 方向。慢轴在垂直于环平面 y 方向。图中 A、O、A' 三点固定, 光纤环可绕 AA' 轴转动。偏振光由 A 点输入 A' 点输出。AO 和两段由于扭曲而引入的双折射可以忽略。令快轴与实验水平轴成 θ 角。图中光纤弯曲半径为 R 。光纤自身半径为 b 。光纤中心的折射率差 Δn 最大^[3]。

$$\Delta n = \frac{n^3}{4R^2} (P_{11} - P_{12})b^2(1 + \nu) \quad (1)$$

故光纤弯曲一周, x, y 两方向上可产生的相位差为:

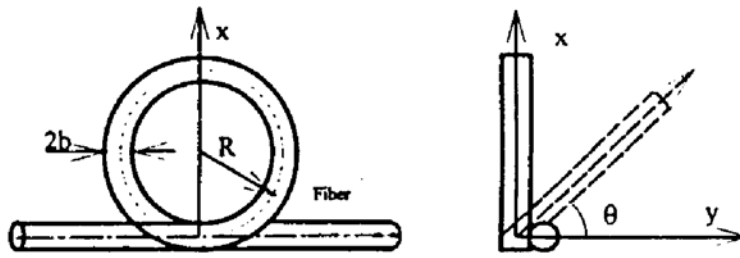


Fig. 1 (a) Schematic diagram optical fiber wavelength plate, (b) The side view

$$\sigma = \pi^2 n^3 (P_{11} - P_{12}) b^2 \frac{1 + \nu}{\lambda R} \tag{2}$$

式中泊松系数 $\nu = 0.16$ ；弹光系数 $P_{11} = 0.121$ ； $P_{12} = 0.27$ ； $n = 1.46$ ； $b = 45 \mu\text{m}$ ；不同波长下 σ 与 R 的关系如图 2 所示。对于 632.8 nm 的 $\lambda/4$ 波片要求 R 值约 1 cm ，此弯曲半径离光纤弯曲极限半径 0.125 cm 还相差甚远，因此不会折断光纤。

2.2 在线单模光纤偏振控制器

在两 $\lambda/4$ 波片中间放置一个 $\lambda/2$ 波片的结构便可完成偏振控制的功能。三波片在一根光纤上绕成如图 3 所示。偏振光由 A 点输入， D 点输出。其中 A ， O_1 ， O_2 ， O_3 ， D 诸点均用胶粘固。三个波片分别独立转动，互不干扰。

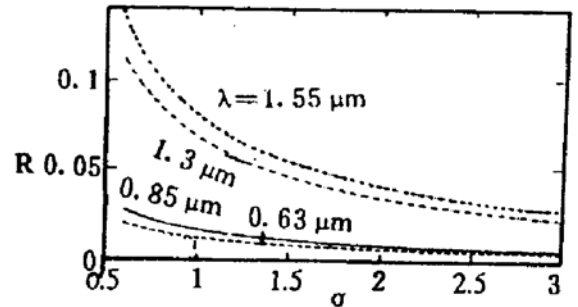


Fig. 2 The cure of phase delay (σ) with respect to R

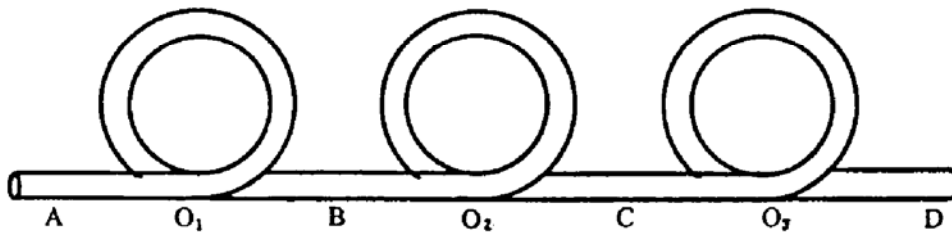


Fig. 3 Schematic diagram of SOP controller

2.3 在线光纤偏振控制器理论分析

偏振态的变化过程可由琼斯矩阵描述，也可用 Poincare 球(简称 P-球)描述。本文采用 P-球描述。首先以水平方向 OY 为 P-球基础，建立坐标系如图 4 所示。令北极为 N ，南极 S 。假设偏振控制器输入输出态为 P-球上任意两点 $P_i(2\alpha_i, 2\theta_i)$ ； $P_0(2\alpha_0, -2\theta_0)$ 。为了画图方便，将 P_i 选在北半球， P_0 选在南半球。

各波片以快轴方向与 Y 轴之间夹角来描述其状态。令第一 $\lambda/4$ 波片快轴与 OY 方向的夹角为 θ_1 ，其双折射矢量 $\overline{OS_1}$ 应表示为 $(2\theta, 0)$ ，同理可设 $\lambda/2$ 波片的快轴与 OY 方向为 φ 。双折射矢量为 $\overline{OS_2}(2\varphi, 0)$ 。第二个 $\lambda/4$ 波片的双折射矢量为 $\overline{OS_3}(2\theta_2, 0)$ 。

下面分析这三个光纤波片实现任意两偏振态之间的转化。并用输入输出偏振态的 $\alpha_i, \theta_i, \alpha_0, \theta_0$ ，四个量作自变量求出实现二者变化的三波片状态量 $(\theta_1, \varphi, \theta_2)$ 的函数关系。 P_i 经三波片转化到 P_0 路径分别为三个过程 I、II、III。

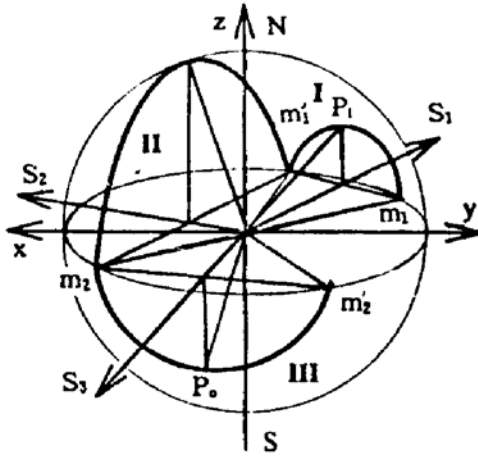


Fig. 4 Poincare sphere representation

2.3.1 过程 I

当第一 $\lambda/4$ 波片快轴与 P_1 的长轴垂直时, 由它输出的线性偏振态为 $m_1[2(\alpha_1 - \theta_1), 0]$ 。这表示 $\lambda/4$ 波片的双折射矢量 $\overline{OS_1}$ 在 P_1 点的赤道投影上, 变换路径是: P_1 点以 $\overline{OS_1}$ 为轴逆时针转 90° 至 m_1 点的圆弧。此时

$$\theta_1 = \alpha_1 \quad (3a)$$

如果将 $\lambda/4$ 波片旋转 90° , 即快轴与椭圆长轴重合。 P_1 点以 $\overline{OS_1}$ 为轴顺时针转 90° 至 $m_1'[2(\alpha_1 + \theta_1), 0]$ 。

$$\theta_1 = \alpha_1 + 90^\circ \quad (3b)$$

因此第一 $\lambda/4$ 波片可以两条不同路径将 P_1 变成两个不同的线性偏振态 m_1, m_1' 。下面为了清楚起见, 先分析过程 III, 再分析过程 I。

2.3.2 过程 III

过程 III 是将从 $\lambda/2$ 波片输出的线偏振态变成所需要的椭圆偏振态。在功能上它属过程 I 的逆过程。因此设第二 $\lambda/4$ 波片的状态为:

$$\theta_2 = \alpha_0, \quad \theta_2 = \alpha_0 + 90^\circ \quad (4)$$

上面 θ_2 取两个值表示第二 $\lambda/4$ 波片可以以两个线偏振态变换成所需要的椭圆偏振态 $P_0(2\alpha_0, 2\theta_0)$ 。这两个线偏振态分别为: $m_2[2(\alpha_0 - \theta_0), 0]$, $m_2'[2(\alpha_0 + \theta_0), 0]$ 。

2.3.3 过程 I

偏振控制器中间的 $\lambda/2$ 波片的功能是实现 (m_1, m_1') 与 (m_2, m_2') 之间的转化。此时存在 $m_1 \rightarrow m_2$; $m_1 \rightarrow m_2'$; $m_1' \rightarrow m_2$; $m_1' \rightarrow m_2'$ 四个路径。下面将其中的 $m_1' \rightarrow m_2$ 过程详细分析。按前面分析结果知 m_1, m_2 两线性偏振态的坐标分别为 $[2(\alpha_1 + \theta_1), 0]$; $[2(\alpha_0 - \theta_0), 0]$ 。为了分析清楚起见, 图 5 将 P-球赤道面单独画出: 要实现 $m_1 \rightarrow m_2$ 的变换, $\lambda/2$ 波片的双折射矢量 $\overline{OS_2}$ 需要处在 $\angle m_1 O m_2$ 的平分线上。同时 m_1' 可按两个不同的路径变换到 m_2 , 对应 P-球上两段不同的圆弧。当 $\overline{OS_2}$ 处于图中方向时, 表示 m_1' 绕 $\overline{OS_2}$ 轴以南半球上半圆弧到达 m_2 。此时:

$$\varphi = (\alpha_1 + \theta_1 + \alpha_0 - \theta_0)/2 \quad (5a)$$

当 $\overline{OS_2}$ 旋转 180° 后, 相当于在实际中将 $\lambda/2$ 波片的快轴方向按逆时针方向转 90° 。此时 m_1' 绕北半球的半圆弧到达 m_2 。故此时的 $\lambda/2$ 波片的状态为:

$$\varphi = (\alpha_1 + \theta_1 + \alpha_0 - \theta_0)/2 + 90^\circ \quad (5b)$$

综上三过程分析可得如图 6 所示的路径图: S 表示过程 I 的路径在南半球。N 表示过程 I 的路径在北半球。从图中可知光纤偏振控制器实现固定 $P_1 P_0$ 间的转化共有 8 条路径。对应偏振控制器中三个波片有 8 种不同的状态。下面列出这八条路径相应的偏振态控制器的状态函数表。

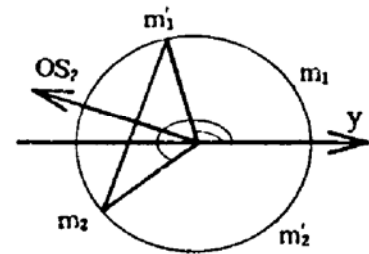


Fig. 5 End view of equator on Poincaré sphere

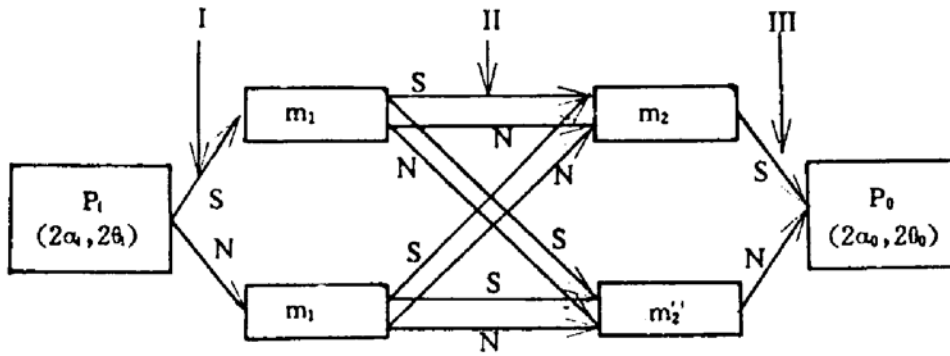


Fig. 6 Eight paths of the SOP controller

Table 1. SOP controller function table

state of SOP controller (paths)	θ_1	φ	θ_2
$P_1 m_1 S m_2 P_0$	$\alpha_1 + 90^\circ$	$(\alpha_1 + \theta_1 + \alpha_0 - \theta_0)/2$	α_0
$P_1 M_1 N m_2 P_0$	$\alpha_1 + 90^\circ$	$(\alpha_1 + \theta_1 + \alpha_0 - \theta_0)/2 + 90^\circ$	α_0
$P_1 m_1 S m_2' P_0$	$\alpha_1 + 90^\circ$	$(\alpha_1 + \theta_1 + \alpha_0 + \theta_0)/2$	$\alpha_0 + 90^\circ$
$P_1 m_1 N m_2' P_0$	$\alpha_1 + 90^\circ$	$(\alpha_1 + \theta_1 + \alpha_0 + \theta_0)/2 + 90^\circ$	$\alpha_0 + 90^\circ$
$P_1 m_1 S m_2 P_0$	α_1	$(\alpha_1 - \theta_1 + \alpha_0 - \theta_0)/2$	α_0
$P_1 m_1 N m_2 P_0$	α_1	$(\alpha_1 - \theta_1 + \alpha_0 - \theta_0)/2 + 90^\circ$	α_0
$P_1 m_1 S m_2' P_0$	α_1	$(\alpha_1 - \theta_1 + \alpha_0 + \theta_0)/2$	$\alpha_0 + 90^\circ$
$P_1 m_1 N m_2' P_0$	α_1	$(\alpha_1 - \theta_1 + \alpha_0 + \theta_0)/2 + 90^\circ$	$\alpha_0 + 90^\circ$

3 设计与实验

3.1 偏振控制器结构设计

三个波片要求在一根光纤上，各自独立转动。转动调节范围： $[0, 180^\circ]$ 由于光纤易受温度、应力等因素影响。因此，必须将光纤与外界隔离。需要人为调节光纤圈的取向，所以光纤圈应用别的结构带动转动，避免用手直接接触光纤圈。基于以上要求，设计加工成手动在线单模光纤偏振控制器。设计的偏振控制器在绕光纤波片时非常容易，并且可多次重复使用，整个器件由铝材料制成。

3.2 偏振控制器功能测试

测试偏振控制器实验光路如图 7 所示。实验中，光源为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器，起偏和检偏分别由两个 (>55 dB) Gian-Thamson 棱镜完成。输出光的椭圆偏振态由 $\lambda/4$ 波片与一个检波器完成。用一小透镜将线偏振光注入单模光纤中。由于单模光纤偏振控制器所用光纤并非理想光纤，其中存在本征双折射和感应双折射，所以不可能测得其输入输出偏振态来验证前面的公式。不过可以做到另外一点：在给定输入偏振态下，调节偏振控制器，在输出端

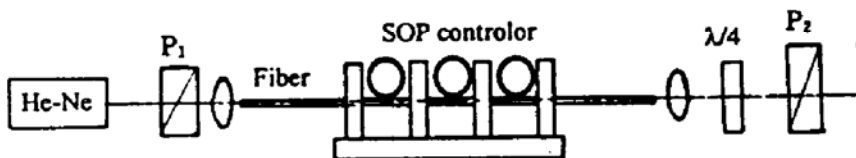


Fig. 7 Experimental setup

得到 O 球上任一偏振态 (β)^[9]。如表 2 所示。反之在不同输入偏振态下, 通过调节偏振态控制器, 总能得到一个需要偏振态。这说明设计的偏振控制器能完成任意两偏振态间的转换达到理论预计目的。最后成功地将它用于干涉型光纤陀螺实验系统^[9]。

Table 2. Experimental results

state of SOP controller output angles	θ_1	φ	θ_2
0°	45°	-40°/55°	50°
15°	40	-35°/35°	55°
30°	45°	-20°	60°
45°	25°	60°	10°
60°	30°	75°	15°
75°	120°	140°	15°
80°	125°	150°	20°
90°	125°	170°	25°

参 考 文 献

- [1] Takanori Okoshi, Overview of optical coherence communication. *J. Lightwave Tech.*, 1985, T-3(6): 1232~1237
- [2] R. Ulrich, S. C. Rashleigh, Eichoff, Bending-induced birefringence in single-mode fibers. *Opt. Lett.*, 1980, 5(6): 273~275
- [3] H. C. Lefvce, In-line fiber optic polarization controller and component. *Electron. Lett.*, 1980, 6(20): 176~178
- [4] R. Ulrich, M. Johnson, Single-mode fiber optical polarization rotator. *Appl. Opt.*, 1979, 18(9): 1857~1861
- [5] Mark. Johnson, In-line fiber-optical polarization transformer. *Appl. Opt.*, 1979, 18(11): 1810~1819
- [6] E. Giese, K. Schatzel, E. O. Shvlz-Dvbias, Single-loop polarization stabilization for single-mode fiber. *Opt. Lett.*, 1982, 7(7): 337~339
- [7] R. Ulrich, Polarization stabilization on single-mode fiber. *Appl. Phys. Lett.*, 1979, 35(11): 196~198
- [8] 通信学报. 1983, (7): 15
- [9] 姚 毅, 光纤陀螺中 PZT 相位调制器及 SOP 控制研究. 硕士论文, 西安电子科技大学, 1988

In-Line Single Mode Fiber Polarization Controller

Yao Yi Shi Kun Ku Weidong Pang Cuizhu Jian Shuisheng

(Institute of Lightwave Technology, North Jiaotong University, Beijing 100044)

(Received 9 March 1994; revised 14 November 1994)

Abstract The theoretical analysis on the characteristics of the in-line single mode optical fiber state of polarization (sop) controller is given in this paper. The results show that there exist eight paths in the sop controller to realize the transformation between any two sops. The experimental results are concord with the theoretical analysis properly.

Key words optical fiber, polarization control.