

庞加莱球的光纤应力测量

王 静 王士东 庄其仁

( 华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362011)

摘要 推导用斯托克斯参数表示的光纤应力计算公式. 指出在一个无损单元内, 从一个偏振态到另一个偏振态的任何变化, 都对应着庞加莱球相对于直径的一个旋转. 如果令球的半径为  $R = k$  ( 相位应力系数), 则压应力  $F$  可用球与  $S_2OS_3$  平面相交圆上的一段大圆弧表示. 当入射光为线偏振光时, 若单模光纤无固有双折射, 则  $F = k[ \operatorname{tg}^{-1}( S_3/S_2 ) ]$ ; 若单模光纤存在固有双折射, 可将固有双折射看成一初始附加压力  $F_0$  的作用结果. 给出斯托克斯参数测量值和光纤应力计算值, 并比较实际外加应力, 结果与实际情况相符.

关键词 庞加莱球, 斯托克斯参数, 光纤应力

中图分类号 O 436. 3 文献标识码 A

椭圆偏振光是单色光波最一般的偏振态. 它的表示方法有很多种, 庞加莱球就是其中一种很直观、实用的表示方法. 在光纤技术中, 光纤有应力时, 其折射率会发生变化, 产生双折射现象. 当光纤中传输的是偏振光时, 这种双折射现象就可以用庞加莱球简洁的表示出来. 为此, 本文介绍一种用庞加莱球表示的光纤应力测量方法.

1 原理

1. 1 庞加莱球模型<sup>[1]</sup>

设沿  $OZ$  方向传播的椭圆偏振光的两个线性偏振分量为  $E_x = e_x \cos( t - kz + x )$ ,  $E_y = e_y \cos( \omega t - kz + \delta_y )$ . 两个线性偏振分量的相位差  $\delta = \delta_y - \delta_x$ , 令  $\operatorname{tg} \alpha = e_y / e_x$ , 则椭圆的方位角  $\Psi$  满足

$$\operatorname{tg}(2 \Psi) = \operatorname{tg}(2 \alpha) \cos \delta,$$
 (1)

椭圆率角  $\chi$  满足

$$\sin(2 \chi) = \sin(2 \alpha) \sin \delta.$$
 (2)

其中方位角  $\Psi$  是椭圆主轴与  $X$  轴正方向之间的夹角, 它决定了椭圆在该平面内的取向(  $-\pi/2 \leq \Psi \leq \pi/2$  ). 椭圆率角  $\chi$  定义为  $\operatorname{tg} \chi = \pm b / a$ , 其中  $a$  为椭圆半长轴,  $b$  为椭圆半短轴,  $\chi$  的正负分别对应于右旋偏振和左旋偏振. 对于 TEM 平面波的各种可能偏振态, 可以用斯托克斯参数进行表示. 斯托克斯参数的定义为<sup>[2, 3]</sup>

$$S_0 = e_x^2 + e_y^2, \quad S_1 = e_x^2 - e_y^2, \quad S_2 = 2e_x e_y \cos \delta, \quad S_3 = 2e_x e_y \sin \delta.$$
 (3)

显然  $S_2^2 + S_3^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2$ , 所以式(3)中只有 3 个变量是独立的, 且有

$$\operatorname{tg}(2 \Psi) = S_2 / S_1,$$
 (4)

$$\sin(2 \chi) = S_3 / S_0.$$
 (5)

理想情况下( 即在无损传输时), 有  $S_0 =$  常数, 所以  $S_1, S_2, S_3$  所表示的是一个球面.  $S_0 = 1$  的球就是庞加莱球. 球壳上各点与光的全偏振态一一对应.

1. 2 光纤应力的庞加莱球表示

当单模光纤具有应力时, 其折射率会发生改变而产生应力双折射. 若单模光纤仅受到正交横方向的

收稿日期 2003- 07- 18

作者简介 王 静( 1978- ), 女, 硕士研究生, 主要从事光电子技术的研究. E-mail: wjd@ hqu. edu. cn

基金项目 国务院侨务办公室科研基金资助项目( 020ZR03)

应力差, 且忽略光纤纵向长度的变化. 应力差由外加横向挤压力  $F$  产生, 附加相位差  $\Delta\delta$  的关系可以表示为<sup>[4~6]</sup>

$$\Delta\delta = \frac{8n^3}{\mathcal{M}}(1-\nu)(P_{12}-P_{11})\frac{F}{d}. \tag{6}$$

在式(6)中,  $n$  为纤芯的折射率,  $\nu$  为泊松比,  $P_{12}, P_{11}$  为光弹张量,  $E$  为杨氏弹性模量,  $\lambda$  为入射光波长,  $d$  为光纤纤芯直径. 设  $P_1$  和  $P_2$  为施加应力前后通过光纤的两个偏振态在庞加莱球上表示的两个点, 坐标分别为  $(S_{01}, S_{02}, S_{03})$  和  $(S_1, S_2, S_3)$ . 由式(1), (2), (4), (5)可以得到

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg}(2 \times) / \sin (2 \Psi) = S_3 / S_2, \tag{7}$$

所以

$$\Delta\delta = \operatorname{tg}^{-1}(S_3 / S_2) - \operatorname{tg}^{-1}(S_{03} / S_{02}). \tag{8}$$

光纤外加横向挤压力  $F$  可表示为

$$F = k \Delta\delta, \tag{9}$$

式中

$$k = \frac{d \mathcal{M}}{8 n^3 (1+\nu)\left(P_{12}-P_{11}\right)} \tag{10}$$

定义为相位应力系数. 在一个无损耗单元内, 从一个偏振态到另一个偏振态的任何变化, 都对对应着庞加莱球相对于直径的一个旋转. 球上任一点所在的大圆面与赤道面的夹角, 为两个分量  $E_x$  和  $E_y$  的相位差  $\delta$ , 如图 1 所示.  $AOB$  和  $HOV$  为互相垂直的两直径. 大圆  $P_1BPAP_1$  和  $P_2BQAP_2$  为过已知点  $P_1, P_2$  和直径  $AB$  的大圆. 而  $P, Q$  为这两个大圆与竖直大圆  $HLVR$  的交点, 则  $\angle POV$  为  $P_1$  点的相位差角. 那么,  $\angle POQ$  为  $P_1$  和  $P_2$  的相位差  $\Delta\delta$ . 如果令球的半径  $R = k$ , 则大圆弧  $QLP$  为

$$QLP_{\text{圆弧}} = k \Delta\delta = F.$$

即外加横向挤压力(应力)  $F$ , 可用球与  $S_2OS_3$  平面相交圆上的一段大圆弧表示. 由式(8)可以看出, 当  $S_3 = S_{03} = 0$  时,  $\Delta\delta = 0$  或  $\pm n\pi (n = 1, 2, 3, \dots)$ . 所以, 应力不能使一种线偏振态连续变化到另一个线偏振态. 因此, 当入射光为线偏振光时, 若单模光纤无固有双折射, 则没有外加压力时, 出射光也为线偏振光. 此时,  $S_{03} = 0, F = k[\operatorname{tg}^{-1}(S_3 / S_2)]$ . 若单模光纤存在固有双折射, 则没有外加应力时, 出射光一般为椭圆偏振光,  $S_{03} \neq 0$ . 若引入附加压力  $F_0$ , 令

$$F_0 = k[\operatorname{tg}^{-1}(S_{03} / S_{02})], \tag{11}$$

则

$$F = k[\operatorname{tg}^{-1}(S_3 / S_2)] - F_0. \tag{12}$$

2 参数测量

由于理论上的斯托克斯参数很难直接得到, 所以在实验中可以用下面的实验方法测量, 如图 2 所示. 设  $I(\theta, \varepsilon)$  表示光通过与  $X$  轴夹角为  $\theta$  的检偏器后的光强,  $\varepsilon$  为  $Y$  方向的分量. 由于插入  $\lambda/4$  波片而引起的相位延迟, 则  $S_0 = I(0, 0) + I(\frac{\pi}{2}, 0), S_1 = I(0, 0) - I(\frac{\pi}{2}, 0), S_2 = I(\frac{\pi}{4}, 0) - I(\frac{3\pi}{4}, 0)$  和  $S_3 = I(\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}) - I(\frac{3\pi}{4}, \frac{\pi}{2})$ .

实验采用水平线偏振光输入, 挤压器作用力方向垂直于水平面. 测量结果, 如表 1 所示. 斯托克斯参数已作归一化处理, 即令  $S_0 = 1$ . 将光纤参数  $E = 7.2 \times 10^{10} \text{ Pa}, \nu = 0.17, P_{11} = 0.121, P_{12} = 0.27$  和  $d =$

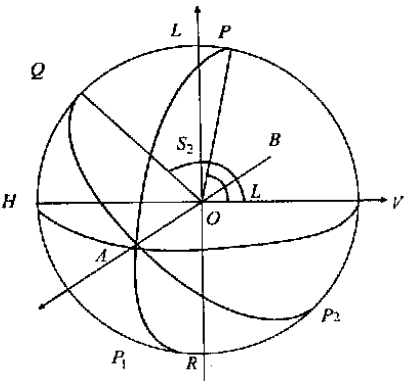


图 1 球上任一点所在的大圆面与赤道面的夹角为相位差

0.12 mm,  $\lambda=1.3\text{ }\mu\text{m}$ ,  $n=1.45$  代入式(10), 求出  $k=2.64\text{ N}$ . 通过式(11), (12), 计算得初始附加压力  $F_0=7.682\text{ N}$ . 计算外加压力值, 如表 1 所示. 表中  $F_{\text{外}}$  为外加压力,  $F_{\text{计}}$  为外加压力计算值.

由表 1 可以看出, 应力测量计算值与实际外加压力有较好的对应关系, 并且测量计算值都大于实际外加压力. 这是由于外加压力是作用在光纤包层上, 引起压力分散, 使真正作用在纤芯上的作用力比外加压力小. 如果对包层压力分散进行修正, 则可使测量计算值更为准确. 另外由外加压力  $F_{\text{外}}=0$  时,  $S_{03}\neq 0$  可知, 被测光纤存在固有双折射.

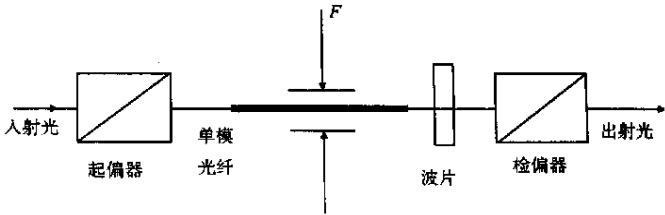


图 2 光纤应力斯托克斯参数测量原理图

表 1 斯托克斯参数测量值及应力测量结果

$F_{\text{外}}/\text{N}$	$S_2$	$S_3$	$\text{tg}^{-1}(S_3/S_2)/\text{rad}$	$K/\text{tg}^{-1}(S_3/S_2)/\text{N}$	$F_{\text{计}}/\text{N}$
0	-0.288	0.068	2.910	7.682	0
0.51	-0.436	0.197	2.717	7.173	0.49
2.02	-0.295	0.458	2.143	5.657	1.48
3.32	-0.038	0.456	1.654	4.366	2.45
3.76	0.014	0.165	1.486	3.923	3.43

3 结束语

利用庞加莱, 可以用来表示光纤的应力. 理论上, 应力  $F$  可用球与  $S_2OS_3$  平面相交圆上的一段大圆弧表示. 实际测量中, 一般光纤存在固有双折射, 可以等价于一附加压力  $F_0$  的作用结果. 通过实验, 测量了斯托克斯参数, 并用式(7)计算光纤应力.

参 考 文 献

1 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. 86~ 91  
2 陆书龙, 李国华. 斯托克斯子空间引入卡布列球[J]. 曲阜师范大学学报, 1999, 25(1): 75~ 76  
3 朱化凤, 李国华. 全偏振光通过延迟器件后的卡布列球表示[J]. 光学技术, 2002, 28(4): 193~ 194  
4 孙圣和, 王廷云, 徐 颖. 光纤测量与传感技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000. 106~ 110  
5 阿查姆 R M A, 马夏拉 N M 著. 椭圆偏振光测量术和偏振光[M]. 梁民基等译. 北京: 科学出版社, 1986. 31~ 34  
6 Smith A M. Single mode fiber pressure sensitivity[J]. Electronics Letters., 1980, 16(20): 773~ 774

Fiber Stress Measurement Based on Poincare Sphere

Wang Jing    Wang Shidong    Zhuang Qiren

(College of Info. Sci. & Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou, China)

**Abstract** A formula is derived for calculating fiber stress showing by stokes parameter. In a lossless unit, any change from a polarization state to another polarization state is pointed out to be corresponded to a rotation of Poincare sphere relative to the diameter. Let the radius of sphere be equal to phase stress factor  $k$ , then, the pressure stress  $F$  can be shown by a section of orthodrome on the circle where the sphere and the  $S_2OS_3$  plane intersect. When the incident light is linearly polarized light and there is no inherent birefringence in single mode fibre optical, then,  $F=k[\text{tg}^{-1}(S_3/S_2)]$ ; when there is inherent birefringence in single mode fibre optical, the inherent birefringence can be seen as result from the action of an initially additional pressure  $F_0$ . The measured value of stokes parameter and calculated value of fiber stress are compared with actually applied stress. The results conform to actual state.

**Keywords** Poincare sphere, Stocks parameter, fiber stress