

这一表象和大芯径极限下光波偏振的传统庞加莱表象相同,双折射导致的偏振态演化在该表象中具有直观的几何意义.据此分析传统的应力型高线性双折射保偏光纤对输入线偏光的调制,如图 2.与

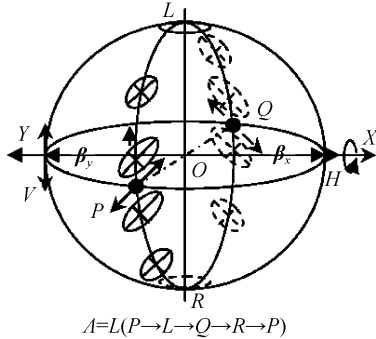


图 2 传统保偏光纤的偏振态演化
Fig. 2 Evolution of SOP in PMFs

应力区引入的高线性双折射相比,纤芯石英本身的圆双折射小得可以忽略.此时旋转轴矢量 $\omega(z)$ 近似位于 XOY 轴上,其大小是输入光的偏振态的代表点在 XOY 轴上的投影矢量^[5].可用正交偏振模式的传播常量及其表示矢量将旋转轴表示为

$$\begin{cases} \omega(z) \approx \beta(z) = OX - OY \\ |\omega(z)| = \Delta\beta = \beta_x - \beta_y \end{cases} \quad (2)$$

其引起的偏振态演化用球面绕 XOY 轴的旋转表示.只有沿主轴方向的输入线偏振代表点在旋转中保持不动,亦即偏振态保持不变,对应上文线双折射调制线偏振态的情形,此时拍长 Λ 的几何意义是球面旋转一周所对应的光纤长度.如图 2 中在以在两轴夹角平分线上的 45° 线偏振输入为例,偏振态的演化轨迹为 $\Lambda = L(P \rightarrow L \rightarrow Q \rightarrow R \rightarrow P)$,该角度线偏输入时,注入端两正交轴向等振幅激励,即 $a_1 = a_2$,根据式(1)有 $2\chi = 0, 2\xi = 0$.

在旋光纤中线性双折射 β 减小到石英本身的圆双折射 α 量级(尽管二者均很小,但相对而言不可忽略其中之一)时,在线偏输入条件下,庞加莱球以 $\omega(z)$ 为轴的旋转使得偏振态将在赤道附近振荡形成螺旋线轨迹^[2-4].这是线双折射和圆双折射共同调制的结果.在这一螺旋线中将旋转分解为分别代表线双折射调制和圆双折射调制的两个连续的正交旋转,则圆双折射引起的偏振态角坐标 2χ 连续叠加,而线双折射引起的偏振态角坐标 2ξ 在赤道上下振荡.如图 3,由扭转前的固有线性双折射 $\Delta\beta$ 和扭转速率 τ 可以得到^[1]

$$\begin{cases} \xi(L) = (\Delta\beta/\tau) \sin(\tau L) \\ 2\chi = (\Delta\beta)^2 L / 8\tau \end{cases} \quad (3)$$

这样,偏振态变化一个周期对应庞加莱球绕极轴旋转一圈,引起的本地正交线偏振模的“相延”为 $\chi(L_b) = 2\pi$,对应的光纤长度即“拍长”为

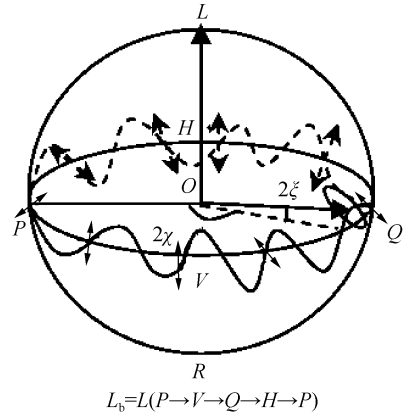


图 3 旋光纤的拍长
Fig. 3 The Beat Length of spun fiber

$$L_b = 16\pi\tau / (\Delta\beta)^2 \quad (4)$$

需要区别的是该相延和拍长由材料本身的圆双折射,即石英纤芯的旋光性引起;与传统保偏光纤线双折射引起的本地正交偏振模相延为 2π 的拍长 Λ ,在庞加莱表象中具有不同的几何意义.于是旋光纤在单位长度上的相延,即平均相延 R 为

$$R = 2\pi/L_b = (\Delta\beta)^2 / 8\tau = 2\chi/L \quad (5)$$

式(5)的物理意义是线偏光偏振面旋转的角度,等价于介质旋光率.同样,可将线双折射引起的输出光偏振椭圆度的变化周期对应的光纤长度称为“等效拍长” L_e ,并以该长度上的线性相延为 2π ,可确定“等效相延” $R' = 2\pi/L_e$;其物理意义与传统线性双折射光纤两正交偏振模式的传播常量差 $\Delta\beta$ 相同.根据这一线性等效,可以利用传统理论直接计算旋光纤的线双折射参量和差分群时延.具有线性相位延迟 $\Delta\beta L$ 的理想线性双折射光纤的差分群时延亦即主偏振态的群时延差为 $\Delta\tau_0 = Ld(\Delta\beta)/cdk$,式中 k 是自由空间波数, c 是自由空间光速.则由旋光纤的平均相延 R 可得旋光纤等效于本征色散的群时延差为

$$\Delta\tau_0 = Bn/c = n \cdot \Delta\beta/\omega = n \cdot R'/ck \quad (6)$$

再根据随机双折射差分群时延 $\Delta\tau$ 和偏振模色散 σ 关系,可以得到

$$\sigma^2(\Delta\tau) = \langle (\Delta\tau)^2 \rangle = 2(\Delta\tau_0 l)^2 [\exp(-L/l) + L/l - 1] \approx (\Delta\tau_0 \sqrt{2l\sqrt{L}})^2 = (D\sqrt{L})^2$$

可求得偏振模色散系数 D ,其中相关长度 l 取为“等效拍长” L_e , L 为光纤长度.

2 实验结果

根据理论分析,在线偏输入条件下,线双折射引起输出偏振椭圆度的周期性变化,对应庞加莱球的上下振荡.圆双折射引起输出偏振椭圆长轴方向的连续变化,对应庞加莱球绕极轴的旋转.于是可在线偏输入角度固定的条件下,通过截断法对不同端面的输出光进行偏振分析,就可以得到输出光偏振椭

圆的相关参量,即圆双折射和线双折射分别引起的经度和纬度角坐标的变化.如果测量线双折射导致的纬度角坐标 2ξ ,然后根据式(3)计算光纤扭转前的固有双折射从而得到经度角 2χ ,进而也可以计算得到线双折射和圆双折射参量的全部参量.而测量纬度角坐标就只需常用的准直器和起偏器两种传统分立光学元件即可构成测量光路.

由于轨迹 $C(z)$ 上任意点 z 所代表的偏振态与光纤长度 z 处的本地偏振态一致,而且光纤总功率 $(|a_1|^2 + |a_2|^2)$ 和两正交模式之间的普通相位是偏振不变量^[2],于是根据平方律探测器探测到的光强 $I = c\epsilon \langle EE^* \rangle = c\epsilon a^2$,由式(1)和消光比的定义式 $ER = 10\lg(I_{\max}/I_{\min})$ 得到纬度角与消光比关系为

$$2\xi = \arctan [(10^{ER/10} - 1)/(10^{ER/10} + 1)] \quad (7)$$

对于多根不同扭转速率的旋光纤,本文首先测量其差分群时延,然后用截断法测量并将两种结果进行了比较,发现非常吻合.其中典型的测量结果如图4,图中光纤扭转速率为 $\tau = 10$ r/m,工作波长为

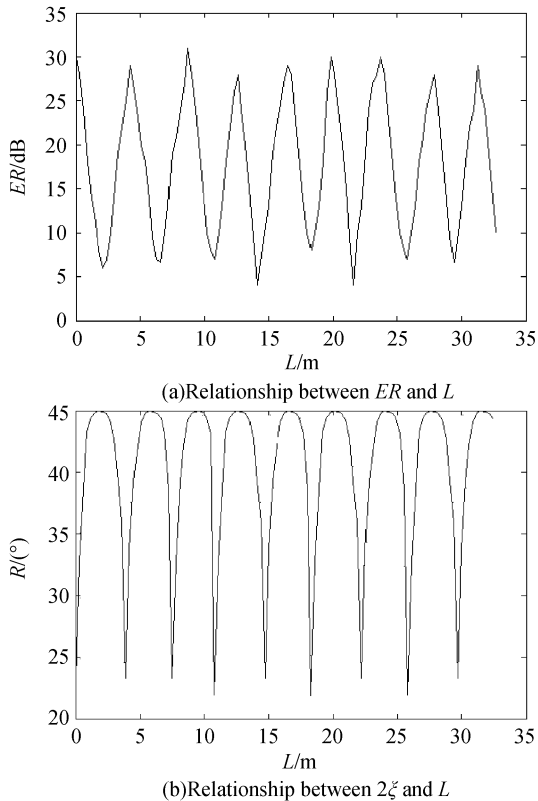


图4 消光比和纬度角对长度的依赖关系
Fig. 4 Relationship between $ER, 2\xi$ and L

$\lambda = 1310$ nm,截断距离为 30 cm.图4(a)为在 $\pi/4$ 线偏振输入角度条件下实际测量的消光比也就是输出光椭圆度随长度的周期性变化.图4(b)为由式(7)计算得到的纬度角坐标 2ξ 的绝对值随长度的变化,其振荡同样具有明显的空间周期性.该光纤的计算结果为:圆双折射引起的拍长 $L_b \approx 4.54$ m,相延 $R = 79^\circ/\text{m}$;线双折射引起的等效拍长 $L_e \approx 8.16$ m,等效相延 $R' = 44^\circ/\text{m}$,因而该光纤归一化线性双折射 $B = \lambda/L_e = 1.6 \times 10^{-7}$.弱取纯石英折射率 $n = 1.458$,则差分群时延和偏振模色散分别为 $\Delta\tau = 3.4285 \times 10^{-14}$ s和 $\sigma^2(\Delta\tau) = 0.0085$ ps/ $\sqrt{\text{km}}$,这一差分群时延的计算值与偏振模色散测试仪的测量结果 $\Delta\tau_0 = 0.035$ ps 吻合很好.

3 结论

通过分析旋光纤双折射调制入射线偏振态的规律,区分了旋光纤的线双折射和圆双折射参量.在此基础上提出一种测量旋光纤低双折射的截断法,仅需要简单的传统分立光学元件,通过消光比的测量和相应计算可以得到旋光纤的线双折射和圆双折射两类参量,并可通过线双折射参量计算差分群时延和偏振模色散.实验结果表明,差分群时延的直接测量值与采用该方法的理论计算值吻合.

参考文献

- [1] BARLAW A J, RAMSKOV-HANSON J J, PAYNE D N. Birefringence and polarization mode-dispersion in spun single-mode fibers[J]. *Appl Opt*, 1981, **20**(17):2962-2967.
- [2] ULRICH R, SIMON A. Polarization optics of twisted single-mode fibers[J]. *Appl Opt*, 1979, **18**(13):2241-2251.
- [3] GALTAROSSA A, GRIGGIO P, PALMIERI L, et al. Polarization properties of randomly-birefringent spun fibers [J]. *Optic Fiber Technology*, 2006, **12**:205-216.
- [4] PALMIERI L. Polarization properties of spun single-mode fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, **24**(11):4075-4088.
- [5] ULRICH R. Representation of codirectional coupled waves[J]. *Opt Lett*, 1977, **1**(3):109-111.
- [6] HURWITZ H, JONES R C. A new calculus for the treatment of optical systems[J]. *JOSA*, 1941, **31**:493-499.

Measurement of Spun Fiber Based on the Conventional Discrete Optical Elements

LIU Jun-hao, DUAN Yun-feng, LIU Yong-jian, NING Ding

(The 46th Research Institute of China Electronic Technology Group Company, Tianjin 300220, China)

Abstract: The rules of birefringence in the waveguide modulating the state of polarization of the incident lightwave was presented in terms of the Poincare geometrical representation. The polarization characteristic of the optical fibers, in particular of the spun fibers, was analyzed under these modulation rules. A new method for measuring spun fibers was introduced which utilizes conventional discrete optical element only. The differential group delay also can be calculated from the results of this measurement. By the comparing with the conventional measurement value, it is shown that the calculated value of differential group delay has a good agreement with it.

Key words: Fiber optics; Low birefringence; Spun fiber; Polarization mode dispersion



LIU Jun-hao works at the 46th Research Institute of China Electronic Technology Group Company. And his research interests focus on optical passive device, and especially waveguide optics.