

文章编号:1004-4213(2011)06-0894-4

横向应力对保偏光纤偏振耦合特性的影响

蒋治国,刘继芳,马琳,宋家争,韩彪

(西安电子科技大学 技术物理学院, 西安 710071)

摘 要:在考虑到各向同性光纤和各向异性光纤在横向应力作用下介电常量变化量差别的条件下,利用弹光效应和折射率椭球得到了外界横向应力与保偏光纤介电常量变化量的关系.采用耦合模理论分析了横向应力作用下保偏光纤偏振耦合特性,数值模拟了横向应力大小、方向以及作用长度对偏振耦合强度的影响,应力作用方向与主轴(未受外力)成 45°时,光纤受扰最敏感;输出消光比随力作用长度呈现周期性变化,力的作用大小不同,交换能量周期也不同;在应力大小部分区域输出消光比和横向应力大小成线性关系,结论与已有实验结果一致.

关键词:保偏光纤;偏振耦合;横向应力;耦合模理论

中图分类号: TN252

文献标识码: A

doi: 10. 3788/gzxb20114006. 0894

0 引言

保偏光纤因具有良好的偏振保持特性,被广泛应用于光纤通信和光纤传感中.当保偏光纤受到外界横向应力微小扰动时,会引起受扰处两正交偏振基模即 HE_{11} 和 HE_{11} 发生能量耦合,使保偏光纤偏偏性变差.分析保偏光纤两正交基模耦合的理论方法主要有耦合模法,但现有文献中关于耦合模法在计算横向应力作用下保偏光纤介电常量变化量时,普遍没有考虑到各向异性光纤和各向同性光纤在横向应力作用下其介电常量变化量的差别^[1-4].

本文在考虑到各向同性光纤和各向异性光纤在横向应力作用下介电常量变化量差别的条件下,利用弹光效应和折射率椭球得到了外界横向应力与保偏光纤介电常量变化量的关系,并利用此关系数值模拟分析了横向应力对保偏光纤的影响,结果与文献[1-4]中的实验结论一致,此关系为工程上研究由应力引起的保偏光纤偏振耦合及保偏光纤应力传感器提供了便利.

1 横向应力对保偏光纤介电常量的影响

保偏光纤在受到横向应力作用后感应折射率椭球方程可写为

$$\left(\frac{1}{n_o^2} + \Delta\beta_{xx}\right)x^2 + \left(\frac{1}{n_e^2} + \Delta\beta_{yy}\right)y^2 + 2\Delta\beta_{xy}xy + \frac{z^2}{n_z^2} = 1 \quad (1)$$

图 1 为保偏光纤受横向应力时模型,单位长度内受力为 $F(N/mm)$,通过保偏光纤快慢轴(未受外力作用时)建立 (x, y) 坐标系, x 轴为光纤慢轴, y 轴

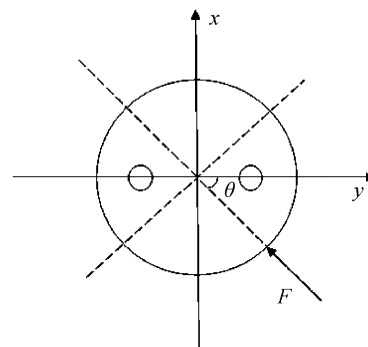


图 1 保偏光纤受力模型

Fig. 1 The model of PMF by transversal force

为光纤快轴,根据弹性力学理论^[5],保偏光纤中心处应力张量 $[\sigma_{ij}]$ 在 (x, y) 坐标下可表示为

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \frac{f}{\pi a} \cos^2 \theta - \frac{f}{\pi a} \sin^2 \theta \\ \sigma_{yy} &= \frac{f}{\pi a} \sin^2 \theta - \frac{f}{\pi a} \cos^2 \theta \\ \sigma_{xy} &= \frac{2f}{\pi a} \sin 2\theta \end{aligned} \quad (2)$$

基金项目:航空科学基金(No. 20070881001)资助

第一作者:蒋治国(1986-),男,硕士研究生,主要研究方向为保偏光纤和光学信息处理. Email: xidianzhiguo@163.com

导师:刘继芳(1957-),男,教授,主要研究方向为非线性光学和光电技术应用. Email: jfliu@xidian.edu.cn

收稿日期:2010-11-23;修回日期:2011-03-31

式中 θ 为 F 的作用方向与光纤快轴的夹角。

由胡克定律可得应变张量 $[S_{ij}]$ 和应力张量 $[\sigma_{ij}]$ 的关系,由弹光效应可得 $\Delta\beta_{ij}$ 与 $[S_{ij}]$ 的关系,最后得

$$\begin{aligned}\Delta\beta_{xx} &= -2.4895 \times 10^{-12} \frac{f}{\pi a} \cos 2\theta \\ \Delta\beta_{yy} &= 2.4895 \times 10^{-12} \frac{f}{\pi a} \cos 2\theta \\ \Delta\beta_{xy} &= -9.962 \times 10^{-12} \frac{2f}{\pi a} \sin 2\theta\end{aligned}\quad (3)$$

感应折射率椭球可由原折射率椭球绕着 z 轴旋转 α 得到,即感应折射率椭球也可写成

$$\frac{x'^2}{n_o^2} + \frac{y'^2}{n_e^2} + \frac{z^2}{n_z^2} = 1 \quad (4)$$

式中

$$\begin{aligned}\tan 2\alpha &= \frac{2\Delta\beta_{xy}}{\frac{1}{n_o^2} + \Delta\beta_{xx} - \frac{1}{n_e^2} - \Delta\beta_{yy}} \\ \frac{1}{n_o^2} &= \left(\frac{1}{n_o^2} + \Delta\beta_{xx}\right) \cos^2 \alpha + \left(\frac{1}{n_e^2} + \Delta\beta_{yy}\right) \sin^2 \alpha + \\ &\quad 2\Delta\beta_{xy} \cos \alpha \sin \alpha \\ \frac{1}{n_e^2} &= \left(\frac{1}{n_o^2} + \Delta\beta_{xx}\right) \sin^2 \alpha + \left(\frac{1}{n_e^2} + \Delta\beta_{yy}\right) \cos^2 \alpha - \\ &\quad 2\Delta\beta_{xy} \cos \alpha \sin \alpha\end{aligned}$$

对保偏光纤有如式(5)的近似

$$\frac{1}{n_o^2}, \frac{1}{n_e^2} \gg \Delta\beta_{xx}, \Delta\beta_{yy}, \Delta\beta_{xy} \quad (5)$$

且利用公式 $(1 \pm x)^n \approx 1 \pm nx$ (当 $x \ll 1$ 时),感应折射率椭球方程式(4)变为

$$\begin{aligned}\frac{1}{n_o^2} \frac{x'^2}{\left(1 - \frac{1}{2} n_o^2 \left(\frac{1}{n_e^2} - \frac{1}{n_o^2}\right) \sin^2 \alpha\right)} + \\ \frac{1}{n_e^2} \frac{y'^2}{\left(1 + \frac{1}{2} n_e^2 \left(\frac{1}{n_e^2} - \frac{1}{n_o^2}\right) \sin^2 \alpha\right)} + \frac{z^2}{n_z^2} = 1\end{aligned}\quad (6)$$

通过坐标变换,得到保偏光纤在 (x, y) 坐标下的介电常量改变量为

$$\Delta \vec{\epsilon} = \frac{1}{2} \epsilon_0 n_o^4 \left(\frac{1}{n_e^2} - \frac{1}{n_o^2}\right) \sin 2\alpha \begin{bmatrix} -\sin 2\alpha & \cos 2\alpha \\ \cos 2\alpha & \sin 2\alpha \frac{n_e^4}{n_o^4} \end{bmatrix} \quad (7)$$

在式(7)中,可以看到 $\Delta \vec{\epsilon}_{yy}$ 项比 $\Delta \vec{\epsilon}_{xx}$ 项多一个系数因子 $\frac{n_e^4}{n_o^4}$,这就是各向异性光纤和各向同性光纤在横向应力作用下其介电常量变化量的差别。

2 保偏光纤中的偏振耦合

根据光的电磁理论,光在各向异性介质中传播的简正模有确定的偏振态和相速度,在各向异性介

质受到小微扰(即 $\Delta \vec{\epsilon} \ll \vec{\epsilon}$)的情况下,介质中传输的光可视为未受微扰时在各项异性介质中传播的简正模的线性组合,此时可以将总光波场表示为

$$\mathbf{E}(z, t) = A_1(z) \mathbf{e}_1 e^{-i(\omega t - \beta_1 z)} + A_2(z) \mathbf{e}_2 e^{-i(\omega t - \beta_2 z)} \quad (8)$$

式中, z 为沿传播方向 \mathbf{k}_0 的距离(即 $z = \mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{r}$), \mathbf{e}_1 、 \mathbf{e}_2 为简正模本征电场的偏振方向矢量, β_1 、 β_2 为相应的传播常量。

于是得到耦合模方程

$$\begin{aligned}\frac{dA_1(z)}{dz} &= \frac{i\omega^2 \mu_0}{2\beta_1} \{ \Delta\epsilon_{11} A_1(z) + \Delta\epsilon_{12} A_2(z) \cdot \\ &\quad \exp [i(\beta_2 - \beta_1)z] \} \\ \frac{dA_2(z)}{dz} &= \frac{i\omega^2 \mu_0}{2\beta_2} \{ \Delta\epsilon_{22} A_2(z) + \Delta\epsilon_{21} A_1(z) \cdot \\ &\quad \exp [-i(\beta_2 - \beta_1)z] \}\end{aligned}\quad (9)$$

式(9)可以化简成两个一元二阶微分方程,都是常复数微分方程,由初始条件 $A_1|_{z=0} = A_1(0)$, $A_2|_{z=0} = A_2(0)$ 可得到这类方程的解为

$$\begin{aligned}A_1(z) &= a_1 \exp \left(i \frac{-b + \sqrt{4c + b^2}}{2} z \right) + \\ &\quad a_2 \exp \left(-i \frac{b + \sqrt{4c + b^2}}{2} z \right)\end{aligned}\quad (10)$$

式中

$$\begin{aligned}a_1 &= \{ i\omega^2 \mu_0 [\Delta\epsilon_{11} A_1(0) + \Delta\epsilon_{12} A_2(0)] + \\ &\quad i\beta_1 A_1(0) (b + \sqrt{4c + b^2}) \} / (2i\beta_1 \sqrt{4c + b^2}) \\ a_2 &= A_1(0) - \{ i\omega^2 \mu_0 [\Delta\epsilon_{11} A_1(0) + \Delta\epsilon_{12} A_2(0)] + \\ &\quad i\beta_1 A_1(0) (b + \sqrt{4c + b^2}) \} / (2i\beta_1 \sqrt{4c + b^2}) \\ b &= - \left(\frac{\omega^2 \mu_0 \Delta\epsilon_{11}}{2\beta_1} + \frac{\omega^2 \mu_0 \Delta\epsilon_{22}}{2\beta_2} + \Delta\beta \right) \\ c &= - \left[\frac{\omega^2 \mu_0^2}{4\beta_1 \beta_2} (\Delta\epsilon_{11} \Delta\epsilon_{22} - \Delta\epsilon_{12} \Delta\epsilon_{21}) + \right. \\ &\quad \left. \frac{\omega^2 \mu_0 \Delta\beta \Delta\epsilon_{11}}{2\beta_1} \right]\end{aligned}$$

根据式(9)可以得到 $A_2(z)$ 。

由式(10)可知,要通过耦合模理论分析保偏光纤的偏振耦合特性,必须知道其在受扰情况下的介电常量变化量。

3 横向应力对偏振耦合的影响

横向应力的大小、方向以及作用长度都会影响保偏光纤偏振耦合强度,需要分析单个因素即应力大小、方向以及作用长度变化对保偏光纤的影响。

设保偏光纤工作波长为 1 310 nm,拍长为 2.61 mm, $n_o = 1.51$, $n_e = 1.5105$,裸光纤直径为 125 μm ,输入部分偏振光消光比为 40 dB。

图2为力的作用方向 θ (未受外力作用时的光

纤快轴与外力的夹角)和输出消光比的关系曲线,在整个 360°范围内,消光比成周期性变化.图 2(a)为力的作用大小为 1 000 N/mm,作用长度分别为 2.5 mm 和 2.2 mm 时,输出消光比与横向应力作用方向的关系曲线,得在力的作用方向 θ 为 45°上,横向应力对保偏光纤扰动最敏感,对偏振耦合强度的影响最大,在主轴方向上(即力的作用方向 θ 为 0°和 90°)最不敏感;图 2(b)为力的作用长度为 2.5 mm,力的作用大小分别为 1 000 N/mm 和 1 500 N/mm 时,输出消光比与横向应力方向的关系曲线,也得在力的作用方向 θ 为 45°上,横向应力对保偏光纤扰动最敏感,在主轴方向上最不敏感.

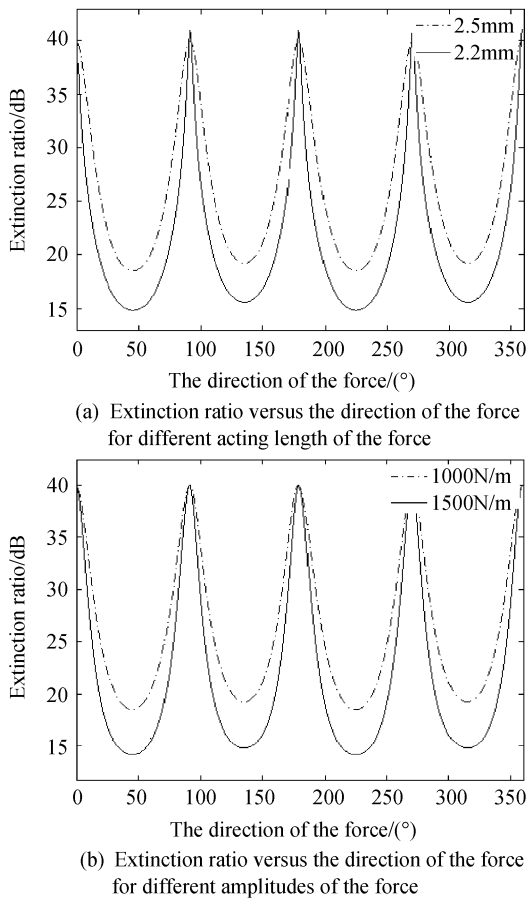


图 2 力作用方向对消光比的影响
Fig. 2 Relationships between the extinction ratio and the direction of the force

因此例如在绕制保偏光纤陀螺光纤环时,为了保证保偏光纤的保偏性,要求上下两层的光纤主轴保持平行,同一层内外圈的光纤主轴也保持平行.

图 3 为力作用方向 θ 为 45°,力的作用大小分别为 1 000 N/mm 和 2 000 N/mm 时,输出消光比随力的作用长度的变化规律.

由图 3 可知,输出消光比随力作用长度呈现周期性变化,主模和副模周期性的交换能量,交换能量

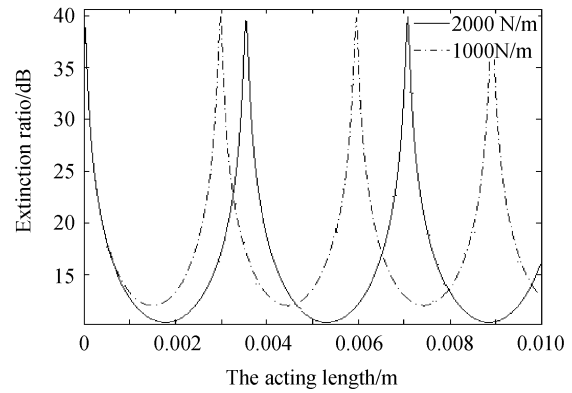


图 3 力的作用长度对消光比的影响
Fig. 3 Relationship between the extinction ratio and the acting length of the force

周期与拍长略有不同;力的作用大小不同,交换能量周期也不同.

图 4(a)为力的作用方向 θ 为 45°,在不同的作用长度下,力的作用大小和输出消光比的关系曲线;图 4(b)为力的作用长度为 2.5 mm,在不同的力作用方向 θ 下,力的作用大小和输出消光比的关系曲线.

如图 4(a),整体上,随着力的增加,输出消光比成周期性变化,力的作用长度不同,输出消光比波动

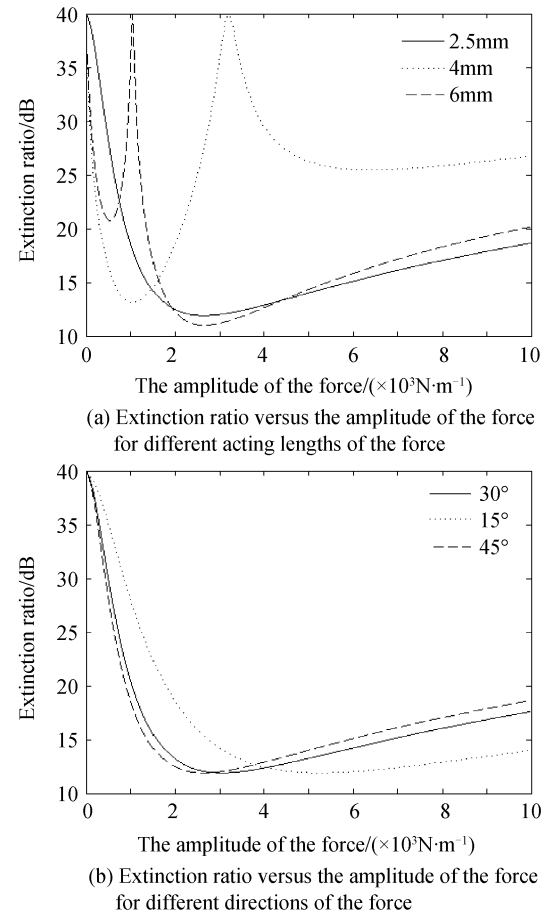


图 4 力的作用大小对消光比的影响
Fig. 4 Relationships between the extinction ratio and the amplitude of the force

情况不同. 在力的作用长度相同时, 在每个波动周期中, 在应力大小的某些区域内, 输出消光比与横向应力大小近似成线性关系^[3], 这是因为随着力大小的改变, 由图 3 可知偏振耦合周期大小会改变, 导致光在相同传播距离条件下输出端消光比发生变化, 在力的某段区间内, 横向应力大小与输出消光比近似呈线性关系, 此关系可应用于分布式线性应力传感. 但是当力大到一定程度时, 保偏光纤的结构会被破坏, 损耗会大大增加, 进行应力传感的误差也会增加, 此时也不适合应用于光纤陀螺等器件.

4 结论

本文在考虑到各向同性光纤和各向异性光纤在横向应力作用下介电常量变化量差别的条件下, 利用弹光效应和折射率椭球得到了外界横向应力与保偏光纤介电常量变化量的关系, 并利用耦合模理论建立了横向应力作用下保偏光纤的偏振耦合模型, 数值模拟了横向应力大小、方向以及作用长度对偏振耦合强度的影响, 给出了相关物理图像的物理解释.

数值模拟结果表明, 当应力作用在与主轴(未受外力)成 45° 方向上时, 光纤受扰最敏感, 对偏振耦合强度的影响最大; 输出消光比随力作用长度呈现周期性变化, 力的作用大小不同, 交换能量周期也不同; 在相同的横向应力作用长度的情况下, 在应力大小的某些区域内, 输出消光比与横向应力大小近似成线性关系, 该结论与已有文献的实验结果相符. 此外, 外界横向应力与保偏光纤介电常量变化量的关系为工程上研究由应力引起的保偏光纤偏振耦合及保偏光纤应力传感提供了便利.

参考文献

- [1] HOTATE K, LENG S O S. Transversal force sensor using polarization-maintaining fiber independent of direction of applied force; proposal and experiment[C]. 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, 2002, 1: 363-366.
- [2] LUO Fei, HUANG Shang-lian. Mode coupling characteristic of high-birefringent fiber under transverse compression disturbance [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 1993, **25**(6): 753-757.
骆飞, 黄尚廉. 高双折射光纤受横向应力作用下的模式耦合特性[J]. *南京航空航天大学学报*, 1993, **25**(6): 753-757.
- [3] ZHANG Hong-xia, LIU Hai-tao, JING Wen-cai, et al. Research of stress sensing based on measurement of polarization coupling in polarization-maintaining fiber [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2008, **19**(11): 1442-1445.
张红霞, 刘海涛, 井文才, 等. 保偏光纤偏振耦合应力传感器的研究[J]. *光电子·激光*, 2008, **19**(11): 1442-1445.
- [4] ZHANG Yue-xin. Theoretical study of pressure and temperature detected simultaneously for polarization-sensor [D]. Xi'an: Xidian University, 2008. 1.
张月星. 保偏光纤传感器压力温度同时探测的理论研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008. 1.
- [5] 彭高华, 王国丽. 弹性力学基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993: 61-62.
- [6] TSUBOKAWA M, HIGASHI T, NEGISHI Y. Mode couplings due to external forces distributed along a polarization-maintaining fiber; an evaluation [J]. *Applied Optics*, 1988, **27**(1): 166-173.
- [7] SASAKI J, KIMURA T. Birefringence and polarization characteristics of single-mode optical fibers under elastic deformations[J]. *Journal of Quantum Electronics*, 1981, **17**(6): 1041-1051.
- [8] CHUA T H, CHEN C L. Fiber polarimetric stress sensors [J]. *Applied Optics*, 1989, **28**(15): 3158-3165.
- [9] ZHANG Hong-xia, TANG Feng, JING Wen-Cai, et al. Theoretical analysis of distributed stress sensing based on measurement of polarization coupling[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, **10**(1): 208-212.
张红霞, 唐峰, 井文才, 等. 偏振耦合测试在分布式应力传感中的理论分析[J]. *传感技术学报*, 2007, **10**(1): 208-212.
- [10] 石顺祥, 刘继芳, 孙艳玲. 光的电磁理论[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006: 69-71.
- [11] CHU P, SAMMUT R. Analytical method for calculation of stresses and material birefringence in polarization-maintaining optical fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1984, **2**(5): 650-662.
- [12] CHEN Zhe, HU Yong-ming, LI Xiu-juan, et al. The relation between the structure of panda fibers and their birefringences[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(12): 1127-1130.
陈哲, 胡永明, 李秀娟, 等. 熊猫光纤的结构与双折射特性关系研究[J]. *光子学报*, 2000, **29**(12): 1127-1130.

Polarization Coupling Characteristic of Polarization Maintaining Fiber Under Transversal Force

JIANG Zhi-guo, LIU Ji-fang, MA Lin, SONG Jia-zheng, HAN Biao

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Based on the photo-elastic effect and index ellipsoid, the relationship between transverse force and dielectric constant variation of polarization maintaining fiber (PMF) was obtained under the consideration of the difference between isotropic and anisotropic optical fiber under transverse force. Polarization coupling characteristic of PMF under transversal force was analyzed based on coupled-mode theory. The relationships between the coupling intensity and the amplitude, direction and the acting length of the transversal force were clarified by numerical simulation. When the direction of force was 45° , the coupling intensity of PMF was the best sensitive to the transversal force. The output extinction ratio changed periodically with acting length of the force, and different amplitude of the force corresponded to different period. The linear relation between the output extinction ratio and the amplitude of transverse force in the part region was found. These characteristics are consistent with previous experimental results.

Key words: Polarization Maintaining Fiber (PMF); Polarization coupling; Transversal force; Coupled-mode theory