

YAP 晶体光纤弹光效应的研究*

阙文修 姚 熹

霍玉晶

(西安交通大学电子材料研究室, 西安 710049) (清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘 要 利用受扰光纤理论理论和光纤弹光效应理论对 YAP 晶体光纤弹光效应进行了理论分析和实验研究. 结果表明, 这种晶纤可在弹光调制、压力和加速度传感等方面得到应用, 并为该类传感器的设计提供理论根据.

关键词 YAP 晶纤, 干扰理论, 弹光效应.

引 言

自从美国斯坦福大学首次生长出 YAG 晶体光纤(晶纤)后, 其它一些具有显著光效应的晶纤, 如 LN 晶纤^[1]、YAP 晶纤^[2]等也陆续研制出来. 然而根据已有的报道, 人们的研究重点放在晶纤的激光器件方面. 比如 YAP 晶纤, 至今还未见有传感方面的研究. 但是本文作者认为考虑到 YAP 晶纤具有优良的机械性能, 通过对其弹光效应的研究, 可开辟其在传感方面的新领域应用. 对于普通的石英传输光纤, 其弹光效应及其应用的研究, 在过去的几年里已有不少的报道^[3~7], 可是 YAP 晶纤在光学上是各向异性, 因此过去在均质光纤里的研究分析方法在此必须有所改变. 受扰光纤理论^[8]其考虑的是各向异性的折射率张量, 需要多达 6 至 9 个分量才能表示, 这些分量既含有光纤本体(材料、结构)方面的因素, 也含有光纤受扰方面的因素. 本文正是据此及光纤弹光效应理论为出发点进行 YAP 晶纤弹光效应的研究.

2 理论分析

YAP 晶体属正交晶系, 是畸变的钙钛矿结构, 空间群为 $P_{21}2121$, 这种较弱的空间对称性, 形成了这种晶体物理性质典型的各向异性. 据实验验证, YAP 晶纤完全保持了晶体的性质, 其受到均匀侧压的力学模型如图 1 所示. 图中 f 为晶纤单位长度上的侧压力, l, d 分别为晶纤长度和直径, 由于沿晶纤 z 轴方向受力均匀, 则其应力张量形成

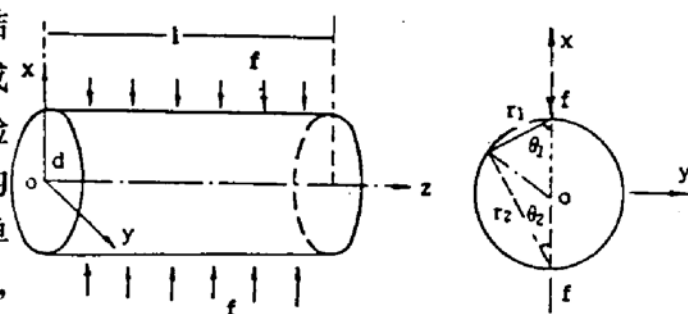


Fig. 1 Pressured pattern of crystal fiber

收稿日期: 1992年9月8日.

* 军事电子预研基金资助项目.

$$T_{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{xy} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

并由晶纤受力的径向位移方程和弹光方程得^[9]

$$\sigma_x = -\frac{2f}{\pi} \left(\frac{\cos^3 \theta_1}{r_1} + \frac{\cos^3 \theta_2}{r_2} \right) + \frac{2f}{\pi d} \quad (2)$$

$$\sigma_y = -\frac{2f}{\pi} \left(\cos \theta_1 \frac{\sin^2 \theta_1}{r_1} + \cos \theta_2 \frac{\sin^2 \theta_2}{r_2} \right) + \frac{2f}{\pi d} \quad (3)$$

$$\tau_{xy} = -\frac{2f}{\pi} \left(\sin \theta_1 \frac{\cos^2 \theta_1}{r_1} + \sin \theta_2 \frac{\cos^2 \theta_2}{r_2} \right) \quad (4)$$

现在考虑沿 x 轴施加侧压,则在纤芯处即 $r_1 = r_2 = d/2$, $\theta_1 = \theta_2 = 0$,有^[10]

$$\sigma_x = -6f/\pi d, \quad \sigma_y = 2f/\pi d, \quad \tau_{xy} = 0 \quad (5)$$

由此利用受扰光纤理论、弹光效应理论和弹光方程可求得 YAP 晶纤由于受到外加压力作用,其折射率变化近似为(忽略高阶小量)

$$\begin{aligned} n_x &= n_c - \frac{n_c^3 f}{\pi d} (3\pi_{11} - \pi_{12}), & n_y &= n_b - \frac{n_b^3 f}{\pi d} (3\pi_{21} - \pi_{22}), \\ n_z &= n_a - \frac{n_a^3 f}{\pi d} (3\pi_{31} - \pi_{32}), & n_{xy} &= n_{xz} = n_{yz} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

式中 n_a , n_b , n_c 为晶纤未受力时固有的折射率,坐标轴和晶轴的对应关系 $x = c, y = b, z = a$, π_{ij} 为应力弹光系数.可见当沿 z 轴方向透光时,由轴向侧压作用导致的双折射率为

$$\left. \begin{aligned} n_y - n_x &= n_b - n_c + n_b^3 r_c / \pi d, \\ r_c &= (\pi_{22} - 3\pi_{21}) + (n_c/n_b)^3 (3\pi_{11} - \pi_{12}) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中 r_c 为有效应力弹光系数.当光波通过晶纤长度 l 后,产生的位相差为

$$\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} (n_y - n_x) l = \frac{2\pi}{\lambda} (n_b - n_c) l + \frac{2n_b^3 r_c}{\lambda d} F \quad (6)$$

式中 $F = lf$ 为施加的侧压力,第一项为自然双折射引起的位相差,第二项为外加侧压力引起的位相差即晶纤弹光效应产生的位相差.

3 实验及结果分析

采用如图 2 所示装置进行实验,则由探测器中接收到的光强为

$$I = I_0 \sin^2 \frac{\Gamma}{2} = I_0 \sin^2 \left[\frac{\pi l}{\lambda} (n_b - n_c) + \frac{n_b^3 r_c}{\lambda d} F \right] \quad (7)$$

式中 I_0 为入射光强,可见通过观察输出光强的变化,即可达到弹光调制,也即可进行压力和加速度 ($F = ma$) 的传感.

3.1 晶纤端面处理

首先对 YAP 晶纤进行外形的粗略检验,即在 100 倍的显微镜下观察,选出无断裂、直径均匀,并在灯光的照射下无明显的散光和横向断裂的晶纤,切割成适当的长度,考虑到加工余量,要比实际所需要的长度超出至少 4 mm 以上,然后胶合在夹具中.从理论上讲夹具的硬度必须与晶纤的硬度相匹配,但考虑到 YAP 晶体材料的硬度为克氏 1310 级,与金刚石的硬度接近.

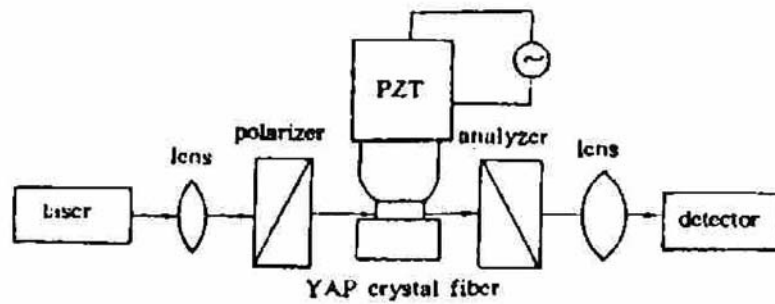


Fig. 2 Experimental setup

要使夹具与晶纤的硬度匹配几乎是不可能的,为此在实验探索的基础上,最终选取硬度较高的石英玻璃作夹具,夹好的晶纤先后用 W_{21} 和 W_{10} 的 BC_4 磨料进行端面粗磨和细磨,直至在显微镜下观察晶纤端面轮廓清晰、与玻璃表面出现均匀的麻点,没有划痕(即使有削边也应均匀且细小)为止,再用 $W_{3.5}$ 和 W_1 的人造金刚石研磨膏进行晶纤端面抛光.加工好的晶纤端面(晶纤直径 $100\ \mu\text{m}$ 、长度 $10\ \text{mm}$)照片如图 3 所示.

3.2 晶纤轴向的确定

具体如图 2 所示,首先在图 2 中未放进晶纤时选好起偏器的某一极化方向(如垂直方面),然后调整检偏器,使通过检偏器后的光强为零;接着放进晶纤,以晶纤的 a 轴(对应直角坐标的 z 轴)为通光方向,慢慢旋转晶纤,直到透过检偏器后的光强几乎为零(晶纤多少会有退偏,使其不能完全消光),这时晶纤的垂直方向即为晶纤的轴向,也就是施加压力的方向.

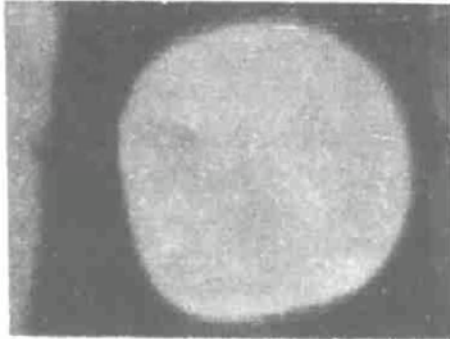


Fig. 3 Photograph of the polished crystal fiber end face

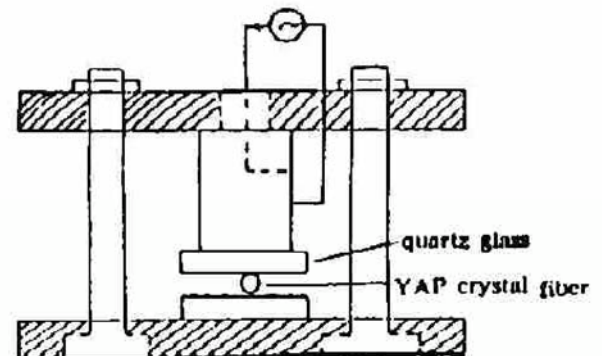


Fig. 4 Method of the applied force

3.3 加压力的方法

由于实验用晶纤直径为 $100\ \mu\text{m}$,长度 $10\ \text{mm}$,如何选取适当的施加压力方法而不至于影响到耦合光强的变化.作者做了大量的探索实验,最终选取由压电陶瓷的伸缩来对晶纤进行加力,其具体是制作一个钢板夹具,用于夹紧压电陶瓷,使它向外不能有伸缩,而使它的伸缩变为力而加给晶纤.如图 4 所示.由图中可见,当给压电陶瓷加上交变恒压时,则其产生伸缩,然而两端又被钢板固定,实际上没有伸缩,而是导致力施加给晶纤.

3.4 结果分析

通过前面三个步骤后,在实验装置中把起偏器和检偏器各转 45° ,用示波器观察输出光强的变化.结果表明,当选用内外腔直径分别为 $10\ \text{mm}$ 和 $12\ \text{mm}$,长 $25\ \text{mm}$ 的圆柱型压电陶瓷,对其加上 $220\ \text{V}$ 交变恒压时,可得光强调制度 10% ,由此可求得由于侧压力的作用,晶纤的双

折射率变化 Δn_f 由(7)式有

$$\frac{\Delta I}{I_0} = \frac{I_0 - I}{I_0} = \cos^2(\pi l/\lambda) [(n_o - n_e) + \Delta n_f] \quad (8)$$

把 $\Delta I/I_0 = 10\%$, $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$, $n_o = 1.946$, $n_e = 1.952$ 代入可得 $\Delta n_f = 0.625 \times 10^{-3}$.

实验中发现,光强调制度跟入射到晶纤端面的光发散角也即晶纤端面光线入射情况有很大的关系.从另一种意义上说晶纤端面的光入射情况直接影响到光波的偏振程度.对此作者认为,由于目前已生长的 YAP 晶纤其芯径 d 多为几十到几百 μm ,满足 $d \gg \lambda$ (光波波长)条件,且其折射率较大,不属于弱波导,所以尽管使用的晶纤很短,但纤内模式仍极为丰富.鉴于这种情况,使用光线分析和琼斯矩阵方法来研究晶纤的光学特性,得到晶纤总出射光强形式为^[11~12]

$$I = \frac{1}{2\pi(1 - \cos \theta_m)} \int_0^{\theta_m} \int_0^{2\pi} |A(\theta, \phi)|^2 \sin \theta d\theta d\phi \quad (9)$$

式中 $A(\theta, \phi)$ 为晶纤出射光强的振幅值, θ_m 由晶纤的数值孔径决定, θ 为晶纤端面入射光线的发散角, ϕ 为光线偏离轴线的倾斜角.显然每一个导模由相应的一个 θ 值决定,由于所用晶纤长度很短,因此,晶纤的入射角度对晶纤的输出有明显的影晌,这种影响可由(9)式直接计算出来.通过理论计算和实验发现,当发散角很小时,通过晶纤的出射光基本为线偏振光,但当发散角增大时,更高阶的导模被激励,致使光波偏振度下降,从而光强调制度也下降,因此在实验过程中一定要调好入射光线,使其尽量垂直入射.

从理论上讲,圆偏振光灵敏度最高,但由于晶纤不能完全保偏,致使不能保证完全圆偏振光,为此在实验中可以利用自然双折射,通过选取适当的晶纤长度来达到尽量的圆偏振光.

实验中还发现, He-Ne 激光光源稳定性较差,通常可观察到 50 Hz 及其倍频的噪声谱,实验证实这是电源噪声频谱,测试中也发现,光源存在一种跟热稳定性有关的跳模现象,这是跟模状态有关的噪声,这种噪声出现时,模呈椭圆偏振.总之,这些噪声的存在将使光强调制度大大减小,为此作者对激光电源进行了改造如使用电源滤波器和交流稳压器及选用稳定性好的激光电源等,这些措施虽然使噪声有所降低,但却依然存在.对此可以根据激光跳模导致的不稳定是一种动态的准周期过程,选择波形稳定期进行实验测试,可提高光强调制度,但这不是最终的解决办法,作者认为最好选用输出偏光的稳频管作光源.

加力装置部分,当夹紧压电陶瓷时,一定要适可而止,切勿夹得过紧而导致给晶纤预先施加某一恒力,为此实验时借助光功率计进行小心细致地调节夹具,以尽量避免单晶光纤受到来自钢板的压力.

通过以上所采取的各种措施后,作者对晶纤经加压前后的输出波形进行了拍照,结果如图 5 和图 6 所示,图 5 是未加压时的情形,可见系统存在有外界的干扰,因为曲线有波动.图 6 是晶纤经施加周期性脉冲力(加速力)的输出波形,由于实验条件所限,实验中采用的压电陶瓷伸缩小,所以导致的力也比较小,从而输出波形的幅度也小.

综上所述,通过实验和理论分析表明,经过进一步的研究, YAP 晶纤的弹光效应可望用于压力和加速度传感等方面.

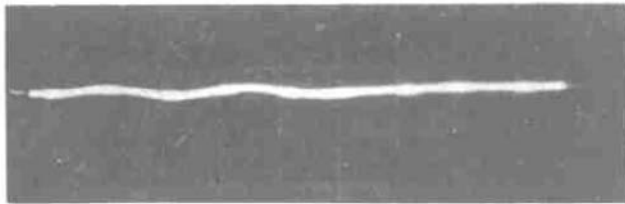


Fig. 5 Output waveform without modulation signal

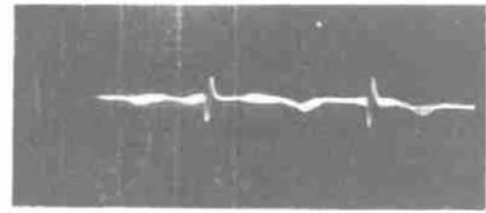


Fig. 6 Output waveform of the applied modulation signal

参 考 文 献

- [1] S. Sudo, A. Cordova-plaza, R. L. Byer *et al.*, MgO : LiNbO₃ single-crystal fiber with magnesium-ion in diffused cladding. *Opt. Lett.*, 1987, 12(11) : 938~940
- [2] 霍玉晶, 李敢生, YAP 系列晶体光纤研制. 高技术通信, 试刊-2, 1990, (1) : 7~10
- [3] Arthur, J. Barlow, David N. Payne, The stress-optic effect in optical fiber. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1983, QE-19(5) : 834~839
- [4] S. L. A. Carrara, B. Y. Kin, H. J. Shaw, Elastic-optic alignment of birefringent axes in polarization-holding optical fiber. *Opt. Lett.*, 1986, 11(7) : 470~472
- [5] W. B. Spillmen, Jr., D. H. McMabon, Multimode fiber hydrophone based on the photoelastic effect. *Appl. Opt.*, 1982, 21(19) : 3511~3514
- [6] A. M. Smith, Single mode fibre pressure sensitivity. *Electron. Lett.*, 1980, 16(20) : 773~774
- [7] K. S. Ching, D. Wang, P. L. Chu, Stress-induced birefringence in a highly birefringent optical fiber. *Electron. Lett.*, 1990, 26(17) : 344~346
- [8] 吴东平, 吴一星, 受扰光纤统一理论简介. 南京工学院学报, 1988, 18(6) : 121~124
- [9] 吴东平, 外机构力场对光纤传输特性影响的研究. 北京邮电学院硕士学位论文, 1987, 80~95
- [10] 郑绳植, 一种用于测量声发的全光纤传感器. 电子测量与仪器学报, 1992, 8(2) : 40~45
- [11] A. Yariv, *Optical Wave in Crystal*, First Edition. New York, John Wiley & Sons Inc., 1984 : 69~100
- [12] 董孝义, 张建忠, 盛秋琴等, BSO 晶体光纤的法拉第磁光效应. 中国激光, 1991, 18(8) : 595~598

Stress-Optic Effect in YAP Crystal Optical Fiber

Que Wenxiu Yao Xi

(*Electronic Materials Research Laboratory, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049*)

Huo Yujing

(*Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084*)

(Received 8 September, 1992)

Abstract The stress-optic effect in YAP crystal optical fiber is analysed theoretically by means of the theory of disturbed optical fibers and the elasto-optic effect theory of optical fiber, and is studied experimentally. It is indicated that this kind of crystal optical fiber can be used in elasto-optic modulation, pressure and acceleration sensing etc and theoretical foundation is provided for the design of this kind of sensors.

Key words YAP crystal optical fiber, perturbation theory, elasto-optic effect.