

基于 Michelson 干涉仪的光纤 AE 传感器的研究

姚建永, 张 森

(武汉职业技术学院 光电子技术系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 文章介绍了光纤传感器的应用和 S 状光纤声发射 (Acoustic Emission, AE) 传感器的结构, 给出了此类光纤 AE 传感器与超声波之间的相互作用, 以及基于光纤 Michelson 干涉仪的此类光纤 AE 传感器灵敏度的理论分析, 最后得到的灵敏度理论分析结论与 MATLAB 模拟结果相一致。

关键词: Michelson 干涉仪; 光纤; 声发射; 传感器; 灵敏度

中图分类号: TN25 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-8788(2008)02-0064-04

Study on Michelson interferometer-based fiber acoustic emission sensor

Yao Jianyong, Zhang Sen

(Department of Photoelectron Technology, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper first introduces the applications of fiber sensors and the structure of S-shaped fiber Acoustic Emission (AE) sensors. Then, it presents the interactions between the fiber AE sensor and ultrasonic waves and the theoretical analysis of the sensitivity of this type of sensors that are based on fiber Michelson interferometer. The result of the analysis is identical with that by Matlab simulation.

Key words: Michelson interferometer; optical fiber; acoustic emission; sensor; sensitivity

在外部条件下, 固体(材料或零部件)的缺陷或潜在缺陷改变状态而自动发出瞬态弹性波及释放所积蓄的应变能而发出声音的传播现象称为声发射(AE), 又称应力波发射。一般情况下 AE 波的幅度小至埃级(10^{-10} m), 频率高达兆赫级(10^6 Hz)。近年来 AE 范围已经扩大, 如泄漏声音、轴承的滑动声音、木材干燥时产生的声音和瓜果中流体的声音等也都被称为 AE, 现在的超声波如用激光轰击物体表面产生的超声也属于 AE。用来检测 AE 信号的传感器称为 AE 传感器, 这种传感器可以分为压电式 AE 传感器和光纤 AE 传感器。

与传统的压电陶瓷传感器(PZT)相比, 光纤传感器具有频带宽、不受电磁干扰、灵敏度高、体积很小、损坏阈值高、不必与被测物体接触和电子设备与传感器可以间隔很远等很多优点。光纤检测技术的核心部分是光纤传感器。光纤 AE 传感器已经运用到许多领域^[1~4], 如机械探伤、地震预测、混凝土检测、应力测量、光纤水听器、医学上的超声碎石和浅水区域声传播特性的研究、鱼迁移的超声监测、声纳技术、海湾风暴的监测等, 其中, 在机械探伤(即无损检测)、混凝土检测、光纤水听器和医学上的超声碎石等领域的使用尤为火热。利用光纤传感器所检测到的声音信号的频率范围非常广泛(几 Hz~几 GHz), 并且如果结合光干涉技术, 光纤传感器的检测灵敏度会很高, 因此应用范围非常广泛。

1 基于 Michelson 干涉仪的光纤 AE 传感器的结构

如果在光纤检测技术中采用干涉技术, 则其检测灵敏度会大大提高。常用的有 Michelson 干涉式光纤传感器、Mach-Zehnder 干涉式光纤传感器、Fabry-Perot 干涉式光纤传感器、Sagnac 干涉式光纤传感器和 Fizeau 干涉式光纤传感器。本文重点介绍 Michelson 干涉式光纤 AE 传感器的结构和特点, 其结构如图 1 所示。

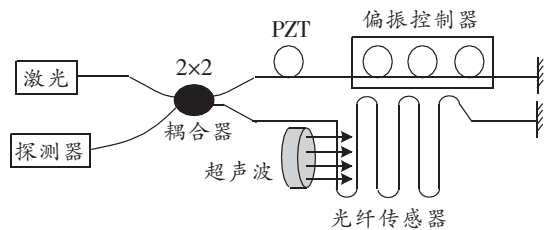


图 1 Michelson 干涉式光纤 AE 传感器的结构图

图中, 若干光纤环绕在柱状 PZT 上以抵消因温度变化而产生的相位波动, 偏振控制器用来保持参考臂的偏振态与传感臂的偏振态的匹配。

光纤超声传感器做成 S 状结构, 具体如图 2 所示^[5]。图中, S 状结构的光纤 AE 传感器用胶带紧贴在薄平板上, S 状结构可以做多个; δ 为两根平行光纤之间的距离, 平行光纤间的弯曲部分为半圆状; l_{eff} 为超声波作用区域内的光纤的有效长度。

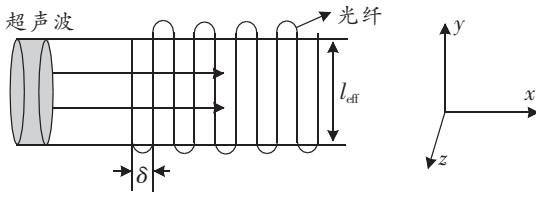


图 2 光纤 AE 传感器

2 超声波与光纤 AE 传感器之间的相互作用

2.1 超声波在薄平板表面上的传播

在图 2 中,超声波在平板表面上传播时,可视为外延的齐次平面波。假设超声波沿着 x 方向传播,其波函数为

$$E(x, t) = A \cos(\omega t - kx) \quad (1)$$

式中, A 为振幅; ω 为频率; k 为波数。由弹光效应可知,当超声波碰到光纤时,光纤在 x 、 y 方向的折射率 n_x 、 n_y 将会变化,导致光纤中传播的光波的相位发生改变,最终导致光纤 Michelson 干涉仪探测器的输出电压发生变化。

2.2 光纤传感器的弹光效应

我们假设:从薄平板表面到光纤传感器应力的传输是全部的;在光纤传感器的横截面应力的传输是均匀的;光纤传感器的重量可忽略。由于弹光效应,当外界应力作用在光纤上时,光纤的折射率与外界应力呈线性关系,具体如下^[6]:

$$\begin{aligned} n_x &= n_0 + [C_1 \sigma_x + C_2 (\sigma_y + \sigma_z)] \\ n_y &= n_0 + [C_1 \sigma_y + C_2 (\sigma_x + \sigma_z)] \\ n_z &= n_0 + [C_1 \sigma_z + C_2 (\sigma_x + \sigma_y)], \end{aligned} \quad (2)$$

式中, n_μ ($\mu = x, y, z$) 为 μ 轴方向的折射率; σ_μ ($\mu = x, y, z$) 为沿着 μ 轴方向作用在纤芯附近的应力; n_0 为光纤不受应力时的折射率; C_1 和 C_2 分别表示纵向和横向的应力弹光系数或称压光系数。相对应力弹光系数定义为

$$C = C_1 - C_2. \quad (3)$$

在外界均匀压力作用下,光纤可视为均匀电介质棒,因为在纤芯和包层的杨氏模量、泊松系数几乎相同。此外,光纤的长度比光的波长大得多,光纤的横截面的平面变形可视为圆盘状,则作用在纤芯上的应力 σ_x 和 σ_y 之间的关系可以近似为^[7]

$$\sigma_x \approx -3\sigma_y. \quad (4)$$

于是,由式(2)、(3)、(4)可得在 x 轴和 y 轴方向两正交线偏振光的模式双折射 B 为^[8]

$$B \approx n_x - n_y \approx C(\sigma_x - \sigma_y). \quad (5)$$

由于超声波与光纤之间的相互作用产生的双折射效

应会引起在 x 轴和 y 轴方向两正交线偏振光之间的相位差 $\varphi_s = (\beta_x - \beta_y)L$, 式中, L 为光程, β_x 为光在光纤中沿 x 轴方向的传播常数, β_y 为光在光纤中沿 y 轴方向的传播常数。 φ_s 可以近似表示为

$$\varphi_s = 3m\Delta\beta l_{\text{eff}} = 3mk_0 B l_{\text{eff}} = 4mk_0 l_{\text{eff}} C \sigma_x, \quad (6)$$

式中, m 表示 S 状光纤传感器的个数;在超声波作用的区域中,光在一个 S 状光纤传感器中走的长度是 $3l_{\text{eff}}$, 在忽略超声波的衍射作用时,认为有效长度 l_{eff} 和超声换能器的孔径长度相等; $k_0(2\pi/\lambda_0)$ 为光在真空中传播的波数;当 $\lambda_0 = 0.6328 \mu\text{m}$ 时,应力弹光系数 $C = 3.34 \times 10^{-5} \text{ mm}^2/\text{kg}$; 当 $\lambda_0 = 1.3 \mu\text{m}$ 时, $C = 3.17 \times 10^{-5} \text{ mm}^2/\text{kg}$ 。这类传感器采用中心波长为 $0.6328 \mu\text{m}$ 的氦氖激光器作光源,另外还采用两个单模光纤 3 dB 的定向耦合器。传感器的传感臂和参考臂均采用芯径为 $4 \mu\text{m}$ 的非保偏单模光纤,当然采用保偏光纤更好,但价格比较昂贵。

以上的讨论中没有考虑光纤传感器弯曲部分与超声波作用产生双折射效应的情况。其原因是:图 2 中的超声源是用超声换能器产生的,其孔径长度是一定的,把光纤传感器紧贴在各向同性的介质表面,超声波在各向同性的介质表面传播时没有波束偏斜现象;另外,超声波在各向同性的介质表面传播时波束衍射较小^[9],如果保持超声波换能器与光纤传感器间的距离很小,则可以使超声波的衍射效应更小;再者,使图 2 中光纤直线部分的长度比超声换能器的孔径长度大得多。通过以上措施,使得光纤传感器弯曲部分与超声波基本没有相互作用,这样就不用考虑超声波的作用在弯曲部分产生的双折射效应了。

3 光纤 AE 传感器的灵敏度分析

在图 2 中,光纤弯曲时会引起弯曲部分的光纤截面变形。按一级近似,弯曲将导致光纤截面变为椭圆,其椭圆度为^[10]

$$e = \nu a / R, \quad (7)$$

同时,因为芯径不均匀会产生相位差^[10]

$$\delta_s = e^2 (2\Delta)^{3/2} / 8a. \quad (8)$$

光在一个 S 状光纤传感器弯曲部分走的长度是 $2\pi R$ (或 $\pi\delta$), 由式(7)、(8)可得到在 m 个 S 状光纤传感器中因光纤弯曲而产生的相位差 δ_s 为

$$\delta_s = m2\pi a (2\Delta)^{3/2} \nu^2 / 4\delta, \quad (9)$$

式(7)~(9)中, ν 为泊松系数; Δ 为相对折射率差; a 为纤芯半径; R 为光纤弯曲半径; δ 为两平行光纤间的距离, $\delta = 2R$ 。对于熔融石英单模光纤,典型值

有： $\Delta=0.003, a=2.5\text{ }\mu\text{m}, \nu=0.17$ 。在式(6)中，取 $l_{\text{eff}}=2.5\text{ cm}, \lambda_0=0.6328\text{ }\mu\text{m}$ 时，应力弹光系数 $C=3.34\times 10^{-5}\text{ mm}^2/\text{kg}$ ，取应力 $\sigma_x=10^5\text{ Pa}$ ，算出由于超声波与光纤之间的相互作用产生的双折射效应引起的相位差 $\varphi_s=m\times 3.38\times 10^{-1}\text{ rad}$ 。在式(9)中，取熔融石英单模光纤 Δ, a, ν 的典型值，弯曲直径 δ 取 2 cm ，算出因为光纤弯曲导致光纤截面变为椭圆而产生的相位差 $\delta_s=m\times 2.64\times 10^{-9}\text{ rad}$ 。比较 φ_s 和 δ_s 的大小可知， δ_s 可以忽略不计。

当光纤 Michelson 干涉仪传感臂和参考臂的两束光发生干涉后，从干涉仪输出的干涉光的光强为

$$I=0.5I_0\alpha[1+\cos(\Delta\varphi)]。 \tag{10}$$

假设可见度 $V=1, \alpha$ 为干涉仪传感臂和参考臂的光衰减系数； $\Delta\varphi$ 为光纤干涉仪传感臂与参考臂之间的相位差，此相位差主要由缓变相位漂移项 φ_d (因温度波动引起) 组成，小部分由快速变化的信号项 φ_s 组成，则式(10)变为

$$I=0.5I_0\alpha[1+\cos(\varphi_d+\varphi_s)]， \tag{11}$$

又因为 $|\varphi_s|\ll 1$ ，则 $\cos\varphi_s\cong 1, \sin\varphi_s\cong \varphi_s$ ，再由数学三角恒等式变形，式(11)变为

$$I=0.5I_0\alpha(1+\cos\varphi_d-\varphi_s\sin\varphi_d)。 \tag{12}$$

我们把若干光纤环绕在光纤 Michelson 干涉仪参考臂的 PZT 上，根据 PZT 陶瓷环的逆压电效应，使绕在 PZT 上的光纤环产生相位延迟进一步获得正交相位偏置条件，以抵消因温度的变化而产生的相位波动。在式(12)中，当 $\varphi_d=n\pi(n=0,1,2,\cdots)$ 时，信号项就消失了，输出光强与超声信号无关。如果我们控制光纤环的个数，则可以使 $\varphi_d=3\pi/2+2n\pi(n=0,1,2,\cdots)$ ，这样可以获得正交相位偏置条件^[11]，式(12)变形为

$$I=0.5I_0\alpha(1+\varphi_s)。 \tag{13}$$

当输出光强被光电探测器(PD)捕捉到时，PD 的输出电流发生变化，并且输出电流 I_{out} 与干涉光强 I 、干涉光强入射到 PD 的发光面积 A_0 、PD 的响应度 ϵ 呈线性关系，此电流通过 PD 的负载电阻 R 时，PD 的输出电压 V 为^[11]

$$V=0.5I_0\alpha A_0\epsilon R(1+\varphi_s)。 \tag{14}$$

我们令 $V_{\text{DC, max}}=I_0\alpha A_0\epsilon R$ ，它是 $\varphi_d=2n\pi(n=0,1,2,\cdots)$ 时 PD 输出的直流电压，其大小由实验来确定，则式(14)变为

$$V=0.5V_{\text{DC, max}}(1+\varphi_s)。 \tag{15}$$

在式(15)中，我们忽略 PD 输出的直流电压项，结合式(6)得到 PD 输出的交流电压项表达式：

$$V=0.5V_{\text{DC, max}}\cdot 4mk_0l_{\text{eff}}C\sigma_x。 \tag{16}$$

式(16)左右两边同除以应力分量 σ_x ，然后把电压 V 与应力分量 σ_x 的比值作为基于 Michelson 干涉仪的 S 状光纤 AE 传感器灵敏度 χ ，则有

$$\chi=0.5V_{\text{DC, max}}\cdot 4mk_0l_{\text{eff}}C。 \tag{17}$$

从式(17)可知，因为 $V_{\text{DC, max}}$ 的大小可以由实验来确定，可视为一定值，并且波长 λ_0 采用 $0.6328\text{ }\mu\text{m}$ 时，波矢 k_0 和应力弹光系数 C 都有确定的大小，因此灵敏度 χ 与 S 状光纤传感器的个数 m 以及光纤传感器的有效长度 l_{eff} 的乘积呈线性关系，灵敏度 χ 的单位为 mV/Pa 。

4 灵敏度分析的模拟结果

在预期设计的实验中，光源波长 λ_0 采用 $0.6328\text{ }\mu\text{m}$ ，则 k_0 和 C 都是确定的。

4.1 光纤传感器的有效长度 l_{eff} 一定时的模拟结果

在式(17)中，当光纤传感器的有效长度 l_{eff} 、光源波长 λ_0 、波矢 k_0 和应力弹光系数 C 都确定后，它们的乘积为一个定值，令常数 $\xi=V_{\text{DC, max}}k_0l_{\text{eff}}C$ ，则式(17)变为 $\chi=\xi\cdot 2m$ 。由此可以看出，在满足以上条件时，灵敏度 χ 与 S 状光纤 AE 传感器的个数 m 呈线性关系，如图 3 所示。从图 3 可以看出，灵敏度 χ 和光纤 AE 传感器数量 m 有很好的线性关系，并且 χ 随着 m 的增大而增大。

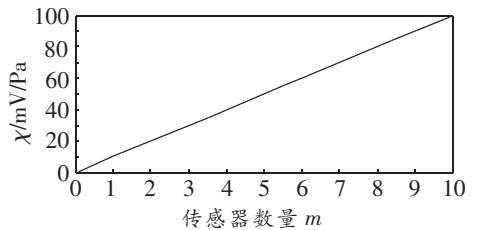


图 3 χ 和光纤 AE 传感器数量 m 的关系图

4.2 光纤传感器的数量 m 一定时的模拟结果

在式(17)中，当光纤传感器的数量 $m=1$ 、光源波长 λ_0 、波矢 k_0 和应力弹光系数 C 都确定后，它们的乘积为一个定值，令常数 $\xi'=V_{\text{DC, max}}k_0mC$ ，则式(17)变为 $\chi=\xi'\cdot 2l_{\text{eff}}$ 。由此可以看出，在满足以上条件时，灵敏度 χ 与 S 状光纤 AE 传感器的有效长度 l_{eff} 呈线性关系，如图 4 所示。从图 4 可以看出，灵

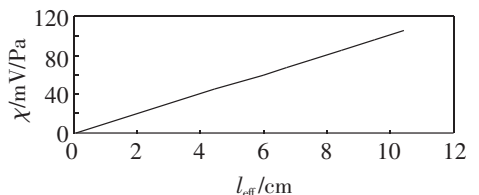


图 4 χ 和光纤 AE 传感器有效长度 l_{eff} 的关系图

敏度 χ 和光纤 AE 传感器的有效长度 l_{eff} 有很好的线性关系,并且 χ 随着 l_{eff} 的增大而增大。

5 结 论

理论分析表明:在输入信号不随时间变化(瞬态时信号)的条件下,当超声源频率一定时,S 状的光纤 AE 传感器的静态灵敏度 χ 与传感器的数量 m 、有效长度 l_{eff} 之间有很好的线性关系。有两点必须注意:第一,外界温度对传感器灵敏度的影响比较大,因为温度的变化会引起传感臂和参考臂中传播光的相位发生变化,在传感器设计中采用 PZT 就是为了消除温度引起的相位波动;第二,研究表明,二次涂覆的材料对单模光纤压力灵敏度的影响最大,所以二次涂覆层材料采用聚四氟乙烯(TFE)。

但是,现实中我们经常遇到的情形是输入信号随时间变化,即输入信号是动态的,这种情况下需要分析和研究光纤 AE 传感器的动态灵敏度,而动态灵敏度的分析更复杂,也是现在光纤 AE 传感器研究的热门。

参考文献:

- [1] Geoffrey A C, Philip J N. Large-scale remotely interrogated arrays of fiber-optic interferometric sensors for underwater acoustic applications [J]. IEEE Sensors Journal,2003,3(1):19-30.
- [2] Nadarajah N, Zhou Chonghua. Fiber-optic acoustic

sensor for nondestructive evaluation [J]. Optics and Lasers in Engineering, 1995, 22:137-148.

- [3] Bucaro J A, Lagakos N, Houston B H. High frequency response of fiber-optic planar acoustic sensors [J]. Journal of Lightwave Technology,1991, 9(9):1 195-1 199.
- [4] 藤山邦久(著),冯夏庭(译). 声发射(AE)技术的应用 [M]. 北京:冶金工业出版社,1996. 1-9.
- [5] Fomitchov P A, Kromine A K. Sagnac-type fiber-optic array sensor for detection of bulk ultrasonic waves [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control,2000,47(3):584-589.
- [6] Namihira Y. Opto-elastic constant in single mode optical fibers [J]. Lightwave Technology,1985,LT(3):1 078-1 083.
- [7] Timoshenko S, Goodier J N. Theory of elasticity [M]. New York,USA:McGraw-Hill,1970.
- [8] Yuan libo, Zhou Limin, Jin Wei. Long-gauge length embedded fiber optic ultrasonic sensor for large-scale concrete structures [J]. Optics & Laser Technology, 2004,36(1):11-17.
- [9] 应崇福. 超声学 [M]. 北京:科学出版社,1990. 357-359.
- [10] 廖延彪. 光纤光学 [M]. 北京:清华大学出版社,2000. 74-76.
- [11] Beadle B M. Fiber Optic Sensor for Ultrasound [D]. Georgia,USA: Georgia Institute of Technology,2002. 126-130.

(上接第 46 页)

通过光谱仪的测量,我们得到不同温度时的边模抑制比(SMSR)都在 47 dB 以上,同时功率计测得的光功率变化也很小,均在 13 dBm 左右,很好地满足了性能要求。

5 结束语

本文依据 OIF-ITLA-MSA 协议^[6],实现了可调谐 LD 的波长调节和稳定控制,在外界温度发生变化时也能很好地锁定波长,同时还通过试验验证了其可行性。

参考文献:

- [1] Nobuhiro Matsuzoe. Tunable laser reference design for designers with the ADuC832/ADN8830/ADN2830

[DB/OL]. <http://www.analog.com>,2004-03-05.

- [2] Bookham company. LMC10NEG integrated InP MZ transmitter wavelength locker [DB/OL]. <http://www.bookham.com>,2006-04-04.
- [3] Gentile YU. 可调激光器的应用现状及未来 [DB/OL]. <http://www.ofnmag.com>,2006-07-06.
- [4] 武成宾,古 渊,王加莹,等. 可调谐激光器技术及在 DWDM 系统应用 [J]. 光通信技术,2003,(6):1-2.
- [5] 黄章勇. 光纤通信用光电子器件和组件 [M]. 北京:北京邮电大学出版社,2001.
- [6] OIF-ITLA-MSA-01. 1-2005,Integrable Tunable Laser Assembly MSA [S].
- [7] 韦静,张浩. LTC1923 在 DWDM 激光器温控电路中的应用 [J]. 现代电子技术,2003,4(1):1-2.