

三分量光弹波导混合集成加速度传感器

唐东林 陈才和 崔宇明 王金海

(天津大学精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘 要 三分量光弹波导 M-Z 干涉型集成加速度传感器的研究, 为高频高精度地震勘探提供集成化的高精度传感器。利用光弹原理, 分析了光弹效应检测任意方向加速度的原理。在 X 切 Y 传 LiNbO₃ 晶体上, 设计制作了光波导双 M-Z 干涉仪及各集成器件: 波导相位调制器、波导偏振器。三分量光弹波导 M-Z 干涉型集成加速度传感器测试表明: 该传感器动态范围宽、线性性好。主要参数为: 相位灵敏度达 $1.81 \times 10^{-4} \text{ Rad/m} \cdot \text{s}^{-2}$; 工作频带 3~1506(Hz)。

关键词 混合集成; 三分量加速度传感器; 光弹波导; 马赫—曾德干涉

中图分类号 TP21.14 **文献标识码** A

0 引言

光传感技术能实现力、位移、加速度等多个物理量的检测^[1,2], 利用各种光学效应实现加速度检测的光加速度传感器具有灵敏度高、频带宽、动态范围宽等优点^[3,4], 以光弹效应为基础的光纤加速度传感器, 多采用多模或单模光纤与受力的 LiNbO₃ 晶体、偏振器件、PIN 管构成偏光干涉光路实现一维加速度的检测^[5~7], 这类加速度传感器的光耦合效率低、抗横向谐振性差而降低了其频响范围、信号失真度大, 无法满足高频高精度的地震勘探。同时由于采用晶体器件, 使传感器总体结构大, 稳定性差。为获得满足高频高精度地震勘探的集成加速度传感器, 本文提出了一种新型的三分量光弹波导混合集成加速度传感器, 其集成芯片采用集成光学技术, 将双 Y 分支波导、波导相位调制器、波导偏振器集成在同一 LiNbO₃ 基底上, 并与半导体激光器、光电探测器混合集成, 制作出高性能的 M-Z 光弹波导干涉仪, 具有性能稳定、抗横向谐振性好、集成化程度高、体积小的优点, 可满足高频高精度地震勘探的要求。

1 工作原理

三分量光弹波导混合集成加速度传感器结构如图 1, 它由 LD 激光器、固定在基底上的三维简谐振子和外处理器组成。三维简谐振子是敏感元件, 由沿 X、Y、Z 三方向布置的三个马赫—曾德(M-Z)干涉芯片构成。LD 激光器发出的光分三路分别输入三个 M-Z 干涉芯片, 当基底受任意方向加速度作用时, 由于光弹效应, 三个 M-Z 干涉芯片分别感应加速度 a 的 X、Y、Z 三方向的分量(a_x 、 a_y 、 a_z), 并将各加速度分量的变化转换为光相位的变化, 再通过光

纤传输到外处理器中进行差动处理, 经处理后得到电压与待测加速度的关系, 完成加速度的检测。

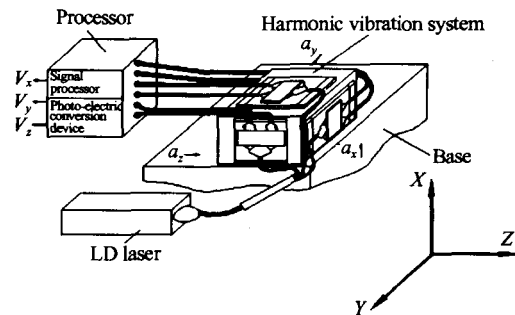


图 1 三分量光弹波导混合集成加速度传感器结构图
Fig. 1 Three-component hybrid-integrated optical acceleration seismic geophone based on photoelastic waveguide

现以三分量光弹波导混合集成加速度传感器的某一分量来说明其设计原理。在 X 切 Y 传 LiNbO₃ 晶体(光轴为 Z 轴)基片上, 设计出的光弹波导混合集成加速度传感器集成光路结构如图 2。

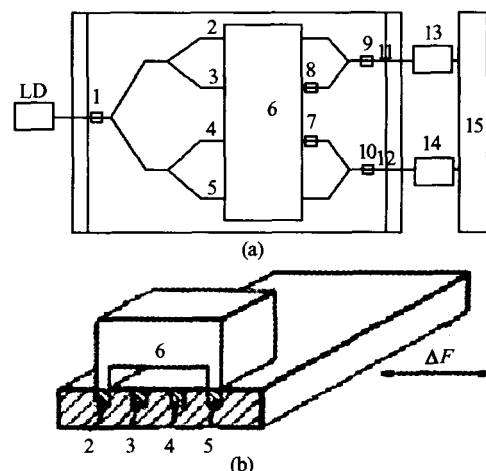


图 2 单分量光弹波导混合集成加速度传感器集成光路图
Fig. 2 Integrated optics configuration of the one-component hybrid-integrated optical acceleration seismic geophone based on photoelastic waveguide
从 LD 发出的光($\lambda = 1.3 \mu\text{m}$)耦合进波导, 经起偏器

1 形成水平偏振光,经 Y 分支波导分为 2、3、4、5 路光传输,当质量块 6 受到由加速度产生的惯性力 ($\Delta F=ma$) 作用时(如图 2(b)),对波导 2、5 产生压和拉应力,使通过 2、5 的水平偏振光光程差改变. 未受力的波导 3、4 中的光在相移器 7、8 的作用下产生 90° 相移,波导 2、3(另一路 4、5)的光经检偏器 9、10 后产生干涉,干涉光 11、12 由光检测器 13、14 转换成电信号输入数据处理单元(15)经处理后获得待测加速度的特性. 波导 11、12 中输出光相位变化为

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_e l = -\frac{\pi}{\lambda} n_e^3 n_3 l = \left\{ -\frac{\pi}{\lambda} n_e^3 l [p_{ij}]^{-1} \frac{m}{EA} \right\} \Delta a \quad (1)$$

式中 n_e 为光轴折射率, λ 为光波长, l 为质量块宽度, Δa 为施加在质量块上的加速度.

对三分量传感器而言,各分量发生耦合干扰时,传感器的交叉轴灵敏度增加,严重影响各分量主轴信号的保真度. 对所设计的三分量光弹波导混合集成加速度传感器来说,若测试的加速度方向沿 ΔF 方向(如图 2(b)),则垂直于 ΔF 方向的质量块也会产生相应的惯性力,该力对所压的波导产生同方向的压应力,引起波导中光相位的变化,输入检测器 13、14(图 2(a))后产生大小相等的电压,经电路 15 进行差动处理相减为零. 所以,在测试 ΔF 方向加速度时,垂直于 ΔF 方向的输出响应被有效地抑制,消除了分量间耦合干扰的主要因数,降低了传感器的交叉轴灵敏度.

2 波导器件设计

2.1 S 型对称 Y 分支波导

Y 分支波导在 M-Z 干涉仪中起着分/合束器的作用,S 型弯曲 Y 分支波导^[8]比直 Y 分支波导损耗小,其总弯曲损耗为

$$\alpha(\text{dB}) = \frac{10p}{\ln 10} 2\sqrt{2}\pi \frac{h}{l} \frac{C_1}{C_2} e^{-\nu} [1 - e^{-\nu^2}] \quad (2)$$

式中: $\nu = C_2 l^2 / (2\pi h)$, α 的单位为 dB, C_1 、 C_2 ^[9] 为波导的结构参数、衬底折射率和工作波长的函数.

综合考虑器件尺寸和工艺问题,同时波导弯曲一次引起的损耗要求一般小于 0.8 dB,所设计的 S 型对称 Y 分支波导参数为:分支角: 0.8° ,波导间隔: $170 \mu\text{m}$, $h = 85 \mu\text{m}$. 波导宽: $6.5 \mu\text{m}$. 波导有效折射率: $n_b = 2.13$, $n_e = 2.133$, $N = 2.130375$ 时,则由式 (2) 可得出 S 型对称 Y 分支波导弯曲损耗 (α) 和 S 型弯曲长度之间的关系如图 3.

当设计弯曲长度为 $6087 \mu\text{m}$ 时,则总损耗为 $\alpha_{\max} = 10 \times 0.2529 = 2.529 \text{ dB}$

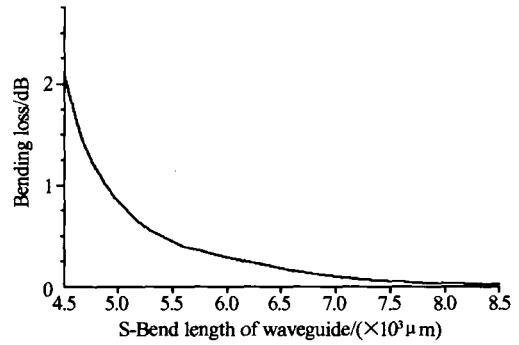


图 3 S 形弯曲波导弯曲损耗 α 随弯曲长度 l 的变化曲线
Fig. 3 The relationship between bending loss and S-bend length of waveguide

2.2 波导偏振器

用金属包覆/介质缓冲层的光波导产生 TE 偏振光,其结构如图 4. 利用波导导模特征方程和 TE、TM 模的衰减率定义^[10],当设计缓冲层厚度 $t_3 = 50 \text{ nm}$; 偏振器长度 $l = 5 \text{ mm}$, TE₀ 模和 TM₀ 模的损耗系数分别为: $\alpha_{\text{TE}} = 4.67 \times 10^{-3} \text{ (dB/mm)}$, $\alpha_{\text{TM}} = 4.57 \times 10^2 \text{ (dB/mm)}$. 则 TM 模在偏振器内衰减损耗,输出为 TE 模.

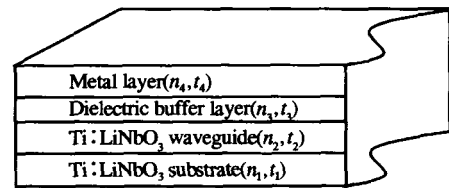


图 4 金属包覆 TE 模偏振器结构
Fig. 4 Structure of metal-shielded polarizer of TE mode

2.3 波导相位调制器

波导相位调制器使波导 3、4 中的光产生 90° 的相移,则输出的干涉光 11、12 光强为: $I = (I_0/2)(1 + \sin \Delta\phi)$,当 Δa 变化引起的微小的 $\Delta\phi$ 的变化,由于光强 I 处在函数曲线的最大斜率处,可产生可检测的 ΔI 的变化. 因此提高了 Δa 的分辨率.

所设计的相位调制器采用集总型波导相位调制器^[11],其结构如图 5. 沿 LiNbO₃ 晶体的 r_{33} 加调制电场,以获得最大的电光调制系数. 由集成光学芯片的尺寸要求及制作工艺上的具体要求,所制作的波导相位调制器的参数如表 1.

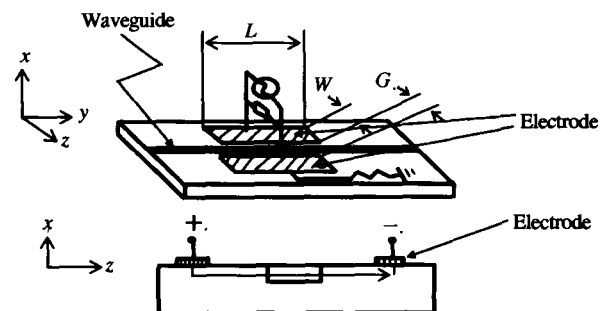


图 5 电光相位调制器结构
Fig. 5 Lumped waveguide phase modulator

表 1 集总型波导相位调制器参数

极间电压 V/V	电极长度 l/mm	电极宽度 w/ μm	电极间隙 G/ μm	电极厚度 t/ μm	单位长度电极电容 C ₀ /(PF·cm ⁻¹)	电极电容 C/PF	带宽 Δf /GHz
2.5	7.9910	5.8312	18.5	0.4	2.0769	1.6596	3.8359

3 传感器的特性参数及实验

3.1 自然频率

由固体弹性力学方程可推导出其谐振频率为

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi^2 E V}{2d^2(1+\nu) \cdot m^{-1}}} \quad (3)$$

式中： E 为 LiNbO₃ 晶体的弹性模量， 0.173×10^{12} (N/m²)。 d 为波导深度， $2.5 \mu\text{m}$ 。 m 为质量块的质量， 100 g ， ν 为泊松比， 1.1436 。 所以，设计的光弹波导加速度传感器的自然频率为 $4.3 \times 10^3 \text{ Hz}$

3.2 灵敏度

光弹波导加速度传感器的灵敏度 S 为

$$s = \frac{\Delta\phi}{\Delta a} = \frac{2\pi B m \Delta a}{\Delta a} = \frac{2\pi B m}{\lambda} \quad (4)$$

式中： B 为 LiNbO₃ 晶体的光弹常数， $B = 5.78 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$ 。 m 为质量块的质量， 100 g 。 λ 为工作波长， $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ 。 l 为质量块长度， $l = 15 \text{ mm}$ 。 所设计的光弹波导加速度传感器的灵敏度为： $S = 1.86 \times 10^{-4} \text{ Rad}/\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

3.3 实验与讨论

将光弹波导加速度传感器与一标准的压电加速度传感器固定在丹麦的 PM Vibration exciter 4808 振动台上进行动态测试，测试方法为：当输入激振分别为加速度 $a = 0.1 \text{ g}$ ， $f = 50 \text{ Hz}$ 、 150 Hz 、 450 Hz 和 $a = 0.1 \text{ g}$ ， $f = 50 \text{ Hz}$ 、 150 Hz 、 450 Hz 时，光弹波导加速度传感器与标准加速度传感器输出正弦响应对比。 以下以 $a = 0.1 \text{ g}$ ， $f = 50 \text{ Hz}$ 、 $a = 0.2 \text{ g}$ ， $f = 50 \text{ Hz}$ 为例说明：加速度传感器输出曲线如图 6。 图 6 表明：在地震勘探的加速度范围 ($a < 0.5 \text{ g}$) 内，光弹波导加速度传感器对激振的响应与标准加速度传感器对激振的响应相吻合。 光弹波导加速度传感器经后续电路处理后其输出可达 300 mV 。

测得的该加速度传感器的幅频特性曲线如图 7。

可以看出：该加速度传感器的灵敏度在 4000 Hz 以下基本保持水平，其交叉轴速度灵敏度比主轴速度灵敏度低 $205 \text{ mV}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。 共振峰为 4300 Hz ，能满足高频的地震勘探。

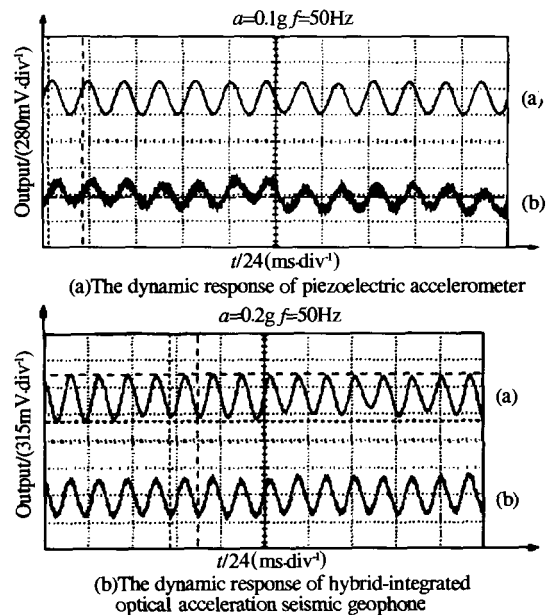


图 6 光弹波导加速度传感器的振动输出响应
Fig. 6 The dynamic response at 50Hz of two different accelerometer

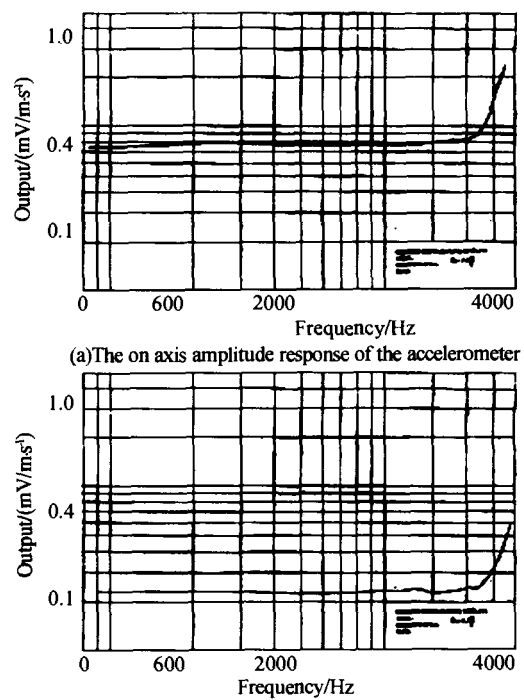


图 7 光弹波导加速度传感器的幅频特性曲线
Fig. 7 The amplitude response of the hybrid-integrated optical acceleration seismic geophone

4 结论

本文分析讨论了三分量光弹波导混合集成加速度传感器的设计、制作及实验。该加速度传感器灵敏度高,频响范围宽,采用集成光学技术制作了 M-Z 干涉芯片,减小了传感器的体积,很适合于有较强电磁干扰环境下的高精度高频地震勘探。

参考文献

- 1 刘嘉敏,潘英俊,陈旭,等. 一种三向力传感新技术中的有限元分析. 光子学报,2003,32(1):76~80
Liu J M, Pan Y J, Chen X, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003,32(1):76~80
- 2 刘月明,田维坚,刘君华,等. 适用于硅微谐振器件测量的光纤位移传感器研究. 光子学报,2003,32(10):1216~1219
Liu Y M, Tian W J, Liu J H, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003,32(10):1216~1219
- 3 Wu Bo, Chen Caihe, Ding Guilan, et al. Hybrid-integrated michelson fiber optic accelerometer. *Optical Engineering*, 2004, 43(2):313~318
- 4 Zeng N, Shi C Z, Zhang M, et al. A 3-component fiber-optic accelerometer for well logging. *Optics Communications*, 2004,234:153~162
- 5 Wei Su, Gilbert J A. General-purpose photoelastic fiber optic accelerometer. *Opt Eng*, 1997,36(1): 22~28
- 6 Brown D A, Garrett S. A interferometric fiber optic accelerometer. *Proc of SPIE*, 1990,1367: 282~288
- 7 Michnel N. Trainer, Telford, Pa. Photpelastic measuring transducer and accelerometer based thereon. US patent: 4648274, Mar 1987
- 8 Hutcheson L D, White I A, Burke J J, et al. Comparison of bending losses in integrated optical circuits. *Optics Letters*, 1980,5(6):276~278
- 9 Macartili E A J, Miller S E. Improve relations describing directional control in electromagnetic wave guidance. *Bell Sult Tech J*, 1969,48(9): 2161~2188
- 10 Charles Y H T. Propagation characteristics of guided wave in the stratified metallic optical waveguides. *Applied Optics*, 1988,27(7): 1316~1323
- 11 Dietrich Marcuse. Optimal electrode design for integrated optics modulators. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1982, QE-18(3):393~398

Three-component Hybrid-integrated Optical Acceleration Seismic Geophone Based on Photoelastic Waveguide

Tang Donglin, Chen Caihe, Cui Yuming, Wang Jinhai

College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Key Laboratory of Opto-electronics Information Technical Science, Tianjin University, Tianjin 300072

Received date:2005-01-10

Abstract In order to provide a high resolution wide band geophone for three-dimensional seismic geophone, the three-component hybrid-integrated optical acceleration seismic geophone is designed. Analysing the photoelastic effect of LiNbO₃ waveguide applied arbitrary-direction acceleration. The Mach-Zehnder interferometer is realized by symmetrical Y-branching waveguide, waveguide phase modulator and two waveguide polarizers, which are monolithically integrated on an X-cut, Y-propagating LiNbO₃ substrate. The results reveal that the accelerometer has wide band and good linearity. The main design parameters of the geophone system is as following: natural frequency:4300 Hz; phase detection sensitivity $\Delta\phi/a$: 1.81×10^{-4} rad/m · s⁻²; work frequency range: 3~1506 Hz.

Keywords Hybrid-integrated; Three-component accelerometer; Photoelastic waveguide; Mach-Zehnder interference



Tang Donglin was born in 1970, he is working toward Ph. D. degree and is presently with the Department of Optoelectronics and Information Engineering of Tianjin University. His research interests include integrated optics and fiber-optic sensor.