

文章编号 1004-924X(2009)05-0985-05

光弹效应的三分量光弹波导加速度传感器

唐东林¹, 郭峰¹, 刘泽年², 代志勇³, 王莹¹, 阳玲¹

(1. 西南石油大学机电工程学院, 四川成都 610500; 2. 中国石油管道秦京输油气分公司, 河北秦皇岛 066001;
3. 电子科技大学光电信息学院, 四川成都 610054)

摘要: 为了实现强电磁场环境下的三维地震高精度勘探, 提高油气产量和油气开采率, 设计了三分量光弹波导加速度传感器。利用光弹原理设计出可检测加速度的3个轴向分量的集成光路及组合式三分量谐振子, 达到了降低加速度各分量串扰的目的。依据LiNbO₃光波导相位变化规律对影响该串扰的交叉轴灵敏度和横向灵敏度比进行了分析, 结果表明: 该传感器的自然频率为3 500 Hz, 响应频带为0~3 000 Hz, 横向灵敏度比为0.11%。所设计的传感器具有较宽的频带和良好的线性频率响应特性, 能够满足高精度地震勘探的要求。

关键词: 集成光学; 加速度计; 光弹效应; LiNbO₃ 光波导

中图分类号: TN256; TP212.12 **文献标识码:** A

Three-component photoelastic waveguide accelerometer based on photoelastic effect

TANG Dong-lin¹, GUO Feng¹, LIU Ze-nian², DAI Zhi-yong³, WANG Ying¹, YANG Ling¹

(1. *School of Mechanical and Electrical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;*
2. *Qin-Jing Oil-gas Transmission Part of China Petroleum Pipeline Company, Qinhuangdao 066001, China;*
3. *School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China*)

Abstract: In order to realize the high accuracy seismic exploration in high electro-magnetic fields and to improve oil producibility and oil recovery efficiency, a three-component photoelastic waveguide accelerometer was developed. Based on the photoelastic effect, a Mach-Zehnder integrated optical interferometer was presented to measure the three-orthogonal components of acceleration and a combined three-component simple harmonic vibrator was designed to reduce the cross-talk among the acceleration components. According to the phase variation of a LiNbO₃ waveguide under the action of the applied acceleration, the cross-axis sensitivity and transverse sensitivity ratio (TSR) were analysed. Experimental results indicate that the natural frequency of the sensor is 3 500 Hz; response bond is from 0 Hz to 3 000 Hz, and the transverse sensitivity ratio is 0.11%, which can satisfy the sensor requirements of high accuracy seismic exploration.

Key words: integrated optics; accelerometer; photoelastic effect; LiNbO₃ optical waveguide

收稿日期: 2008-07-05; **修订日期:** 2008-08-29.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 40774067); 国家自然科学基金国际合作与交流项目 (No. 40811240167); 四川省重点科技项目 (No. 07JY029-135)

1 引言

三维地震勘探技术通过分析获取的三维地层信息,实现对裂缝、薄层等复杂油藏详细描述和精确圈定,是各国进行精细勘探、提高油气产量而大力发展的关键技术^[1-2]。三分量地震加速度检波作为三维地震勘探中地震信息的拾取技术,其先进行度决定了地震数据采集的精度和质量,直接影响后续解释处理过程,是三维地震勘探技术的核心。现用于地震勘探的三分量加速度传感器多为电类传感器^[3-4],由于易受电磁干扰、长期稳定性差而无法满强电磁场恶劣地质条件下的三分量地震勘探。随着现代高新技术和新型材料研究的发展,光波导传感器因其采用光信号探测,可以避免外界电磁场的干扰,有更好的稳定性和可靠性,有利于在恶劣环境下使用而受到越来越多的重视。基于光弹效应的加速度传感器最初由 W. B. Spillman 提出^[5],在此基础上,人们研究了基于 LiNbO₃ 晶体光弹效应的加速度传感器^[6],在现代通信系统中, LiNbO₃ 外调制器在 10 Gbit/s 光纤传输系统平台上也得到了应用^[7]。本文在已研制的硅基 M-Z 干涉型 MOEMS 加速度地震检波器^[8]的基础上,提出了一种新型的三分量光波导加速度传感器。它具有性能稳定、抗横向谐振性好、集成化程度高、体积小、可满足高频高精度地震勘探的要求,且在易燃易爆的恶劣环境下能可靠工作等独特优点,有望解决传统光纤传感器微型化和批量生产时遇到的装配困难及长期稳定性问题。

本文提出了基于光弹效应的三分量光弹波导地震加速度检测理论和方法;采用独特的三分量谐振子设计,抑制了各加速度分量间信号串扰,降低了交叉轴灵敏度。该传感器具有交叉轴灵敏度低(理论值为 0)、响应频带宽(0~3 000 Hz)等优点,特别适于对加速度传感器性能要求高的恶劣环境条件下的三维地震勘探,对于增加油气产量和提高油气开采率有十分重要的意义。

2 三分量光弹波导加速度传感器结构设计

2.1 三分量光弹波导加速度敏感系统设计

双 M-Z 干涉仪是三分量谐振子中检测三向

加速度的敏感系统。由于各分量结构和工作原理的一致性,现以 Z 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,设计出的双 M-Z 干涉仪集成光路结构如图 1 所示:

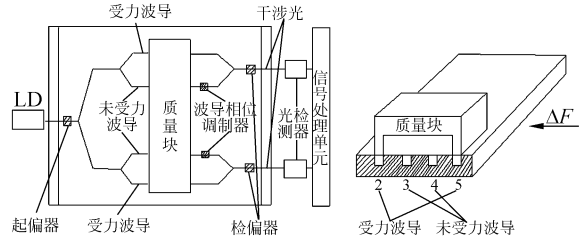


图 1 双 M-Z 干涉仪集成光路

Fig. 1 Double Mach-Zehnder integrated optical interferometer

考虑到在进行地震检波作业时,加速度分量信息之间的串扰会造成交叉轴灵敏度大,导致各分量信号信噪比低,影响对地震资料的解释和油层的描述。因此,研究中所测试的加速度方向是沿 ΔF 方向(如图 1),以便有效地抑制垂直于 ΔF 方向的输出响应,消除分量间耦合干扰的主要因素,降低传感器的交叉轴灵敏度。

其工作原理是:从激光器 LD 发出的光通过起偏器后形成水平偏振光,再经过 Y 分支波导形成四等分光强的光。当与受力波导连接的质量块受到沿水平方向的惯性力 ΔF 作用时,受力波导分别产生压应力和拉应力。通过受力波导的光受到加速度的作用后光相位发生变化;通过未受力波导的光受到波导相位调制器的作用而产生 90° 的相移。经加速度调制和相位调制后的光经分支波导耦合后进入检偏器产生干涉光。干涉光进入光检测器后,产生的电信号经信号处理单元处理得到所测加速度。

2.2 三分量谐振子设计

利用偏振光良好的方向性,3 个振动方向互相垂直的偏振光分别沿 X、Y、Z 3 个方向入射来感应地震加速度的变化,同时采用加速度引起的惯性力与简谐振子相垂直的特殊设计法,可以有效地消除三分量加速度检波中各分量间的信号串扰。所设计的组合式三分量谐振子如图 2 所示。在 3 个 X 切 Y 传的 LiNbO₃ 晶体上分别独立制作双 M-Z 干涉仪。再将这 3 个相互独立的分离式双 M-Z 干涉仪固定在一个固定芯体上,构成三

分量光弹波导加速度传感器简谐振子。

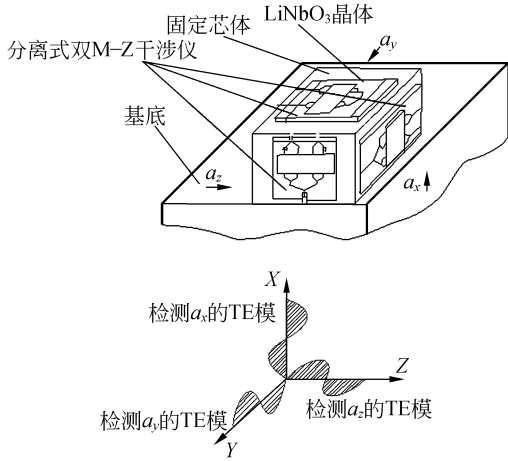


图 2 三分量谐振子

Fig. 2 Three-component simple harmonic vibrator

下面利用三维加速度作用下 LiNbO₃ 波导光相位变化规律来分析该结构的交叉轴灵敏度和横向灵敏度比,以此来说明所设计结构的可行性。

对于每一个双 M-Z 干涉仪而言,TE 偏振光都是沿 LiNbO₃ 晶体的光轴进行传播的,感应的均是折射率 n_e 的变化。则光相位变化:

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_e l = -\frac{\pi}{\lambda} n_e^3 p_{33} \times 7.73 \times 10^{-3} \Delta a l, \quad (1)$$

式中, l 为质量块作用长度。

则相位灵敏度为:

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta a} = \frac{\pi n_e^3 p_{33} l}{\lambda} \times 7.73 \times 10^{-3}, \quad (2)$$

设被测方向的加速度为 $\Delta a_{\text{main axis}}$, 与之垂直方向的加速度为 $\Delta a_{\text{cross axis}}$, 所对应的光相位变化为:

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_{\text{main axis}} &= \Delta\Phi_{\text{cross axis}} \\ \Delta\Phi_{\text{main axis}} &= \frac{2\pi}{\lambda} n_e^3 l = \frac{2\pi}{\lambda} n_e^3 p_{33} \times 7.73 \times 10^{-3} \Delta a_{\text{main axis}}, \end{aligned} \quad (3)$$

主轴相位灵敏度为:

$$K_{\text{main axis}} = \frac{\Delta\Phi_{\text{main axis}}}{\Delta a_{\text{main axis}}} = \frac{2\pi}{\lambda} n_e^3 p_{33} \times 7.73 \times 10^{-3}, \quad (4)$$

沿光轴传播的 TE 光不能感受与其振动方向垂直的折射率的变化,即 Δn_o 的变化不会引起 $\Delta\Phi$ 的变化,所以 $\Delta\Phi_{\text{cross axis}} = 0$ 。由此,组合式三分量光弹加速度计的横向灵敏度比(TSR)为:

$$\text{TSR} = \frac{K_{\text{cross axis}}}{K_{\text{main axis}}} = \frac{0}{\frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_e^3 p_{33} \times 7.73 \times 10^{-3}} = 0, \quad (5)$$

通过分析所设计的组合式三分量光弹波导加速度计,其横向灵敏度比(TSR)理论值为 0。因此,采用组合式结构能获得好的传感器性能。

2.3 传感器总体结构设计

通过以上分析,设计的传感器总体结构如图 3 所示,它由 LD 激光器、置于基底上的三分量谐振子和外处理单元组成。

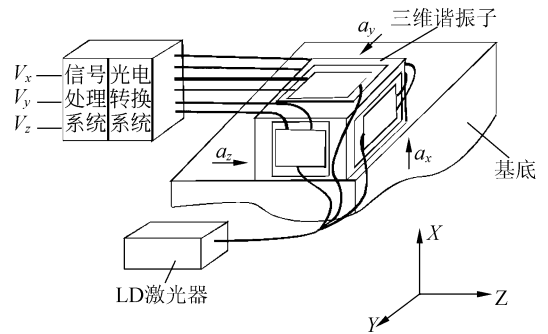


图 3 三分量光弹波导加速度传感器结构图

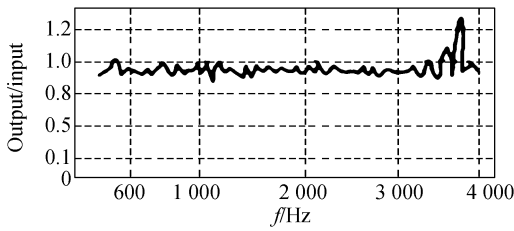
Fig. 3 Designed three-component photoelastic waveguide accelerometer

LD 激光器发出的光分三路分别输入 3 个 M-Z 干涉芯片,当基底受任意方向加速度作用时,3 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 。根据 LiNbO₃ 晶体的光弹效应,三向加速度变化被转化为光相位变化。由双 M-Z 干涉仪将光相位变化转化为光强变化,用光电探测器将光强信号转换为电信号,用 DSP 技术采用差动法处理所测出的加速度电信号,消除测试误差,提高三向加速度的测试精度。

3 实验及讨论

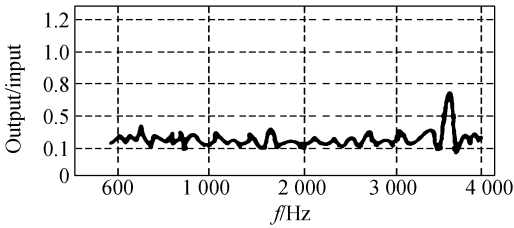
以三分量光弹波导加速度传感器的 Z 轴为主轴,测试主轴和相应的交叉轴的频响特性。其测试曲线如图 4 所示。

由图可知:(1)该传感器的交叉轴灵敏度远小于主轴灵敏度,很好地抑制了分量间的串扰,其自



(a) 主轴频响特性曲线

(a) Frequency response of main axis



(b) 交叉轴频响特性曲线

(b) Frequency response of cross axis

图 4 光弹波导加速度传感器频响特性曲线

Fig. 4 Frequency responses of optical accelerometers

然频率可达 3 500 Hz 并可将频率响应的低频端扩展到 0 Hz, 高频端至 3 000 Hz, 其频响特性曲线在 $< 3\ 000$ Hz 的范围基本保持水平, 提高了加速度传感器的频响特性。在石油地震勘探感兴趣的频带范围内, 完全满足高精度三维地震勘探的要求。

(2) 该传感器的横向灵敏度比为 0.11%, 和理论分析结果接近, 进一步说明了所设计结构的合理性, 能够满足三维加速度检测的要求。

4 结 论

本文根据三维地震勘探高精度的要求, 以光弹原理为依据设计了光波导集成光路。从消除加速度分量间串扰的因素出发, 设计了组合式三分量谐振子。最后, 设计出三分量光波导加速度传感器。实验结果表明: 该传感器的自然频率为 3 500 Hz; 响应频带为 0~3 000 Hz; 横向灵敏度比为 0.11%, 能够满足三维地震勘探要求。

参考文献:

- [1] BERTRAND D, PATRICK L. Efficient 3D wave-equation migration using virtual planar sources[J]. *Geophysics*, 2006, 71(5):185-197.
- [2] OMAR J, VARELA, CARLOS T V, et al.. On the value of 3D seismic amplitude data to reduce uncertainty in the forecast of reservoir production[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2006, 50(3):269-284.
- [3] MOUGENOT, DENIS, THORBURN, et al.. MEMS-based 3C accelerometers for land seismic acquisition: Is it time [J]. *Leading Edge*, 2004, 23(3):246-250.
- [4] 唐东林, 梁政, 陈浩. 用于地震勘探的新型高精度地震检波器研究[J]. *振动与冲击*, 2008, 27(2):162-165.
TANG D L, LIANG ZH, CHEN H. A novel geophone with high accuracy[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(2):162-165. (in Chinese)
- [5] SPILLMAN JR W B. Multimode fiber-optic accelerometer base on the photoelastic effect[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(15):2653-2655.
- [6] 吴波, 陈才和, 丁桂兰, 等. 迈克尔逊干涉型加速度地震检波器集成芯片[J]. *光子·激光*, 2003, 14(8):791-794.
WU B, CHEN C H, DING G L, et al.. Integrated optical chips in a Michelson interference acceleration seismic geophone[J]. *Journal of Optoelectronics. Laser*, 2003, 14(8):791-794. (in Chinese)
- [7] 郭玉彬, 霍佳雨, 靳江涛, 等. LiNbO₃ 外调制器的 10 Gbit/s 光纤传输系统[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(1):22-26.
GUO Y B, HUO J Y, JIN J T, et al.. 10 Gbit/s fiber-optic transmission system using a LiNbO₃ external modulator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1):22-26. (in Chinese)
- [8] 张燕君, 陈才和, 吴波, 等. 硅微光机械加速度地震检波器中 M-Z 光波导干涉仪结构设计[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(1):77-82.
ZHANG Y J, CHEN C H, WU B, et al.. Structure design of Mach-Zehnder interferometer in electrooptic integrated acceleration seismic geophone [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1):77-82. (in Chinese)

作者简介:



唐东林(1970—),男,四川人,博士,副教授,2005年于天津大学获博士学位,现为西南石油大学机电工程学院硕士研究生导师,主要从事光传感及地震检波技术等方面的研究。E-mail:olivert-dL@swpu.edu.cn



王莹(1985—),女,北京人,2007年于北京理工大学获学士学位,现于西南石油大学攻读化工过程机械专业硕士学位,主要从事光传感及地震检波技术等方面的研究。E-mail:snakey777@126.com



郭峰(1982—),男,湖北人,2006年于江汉大学获理学学士学位,现于西南石油大学攻读机械电子工程专业硕士学位,主要从事光传感及地震检波技术等方面的研究。E-mail:guo_feng_568@sina.com.



阳玲(1984—),女,四川人,2007年于西南石油大学获学士学位,现于西南石油大学攻读机械设计及理论专业硕士学位,主要从事石油机械等方面的研究。E-mail:lingling333@163.com.



刘泽年(1971—),男,河北人,高级工程师,1995年毕业于大庆石油学院,现在中国石油管道秦京输油气分公司工作,主要从事地震检波技术等方面的研究。E-mail:liu987654@sina.com.

●下期预告

硅和非硅 MEMS 技术的微型直接甲醇燃料电池

汤小川¹, 张宇峰¹, 苑振宇¹, 王喜莲¹, 刘晓为^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学 MEMS 中心, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学 微系统与微结构制造教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

分别以硅和不锈钢材料为极板研制了两种微型直接甲醇燃料电池,具有结构简单、质量轻、体积小、比能量密度高等特点。介绍了直接甲醇燃料电池的工作原理和结构,并利用光刻、溅射和腐蚀等 MEMS 技术完成硅基微型直接甲醇燃料电池的制作。实验测试表明,在室温条件下,使用 1.5 mol/L 甲醇溶液供液时其开路输出电压为 520 mV,最大输出功率密度达到 5.9 mW/cm²;利用非硅微加工技术完成的不锈钢微型直接甲醇燃料电池,室温下用 2 mol/L 甲醇溶液供液时开路输出电压为 650 mV,最大输出功率密度达到 15.8 mW/cm²。