

文章编号 1004-924X(2006)01-0077-06

# 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

张燕君<sup>1,2</sup> 陈才和<sup>1</sup>, 吴波<sup>1</sup>, 崔宇明<sup>1</sup>, 马广鹏<sup>1</sup>

(1. 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;  
2. 燕山大学 信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:**提出了一种新型的硅基 M-Z 干涉型光电集成加速度地震检波器。对硅基微光机械加速度地震检波器的 M-Z 光波导干涉仪系统进行了系统研究和优化设计,采用 K9 玻璃作为基底层和包层材料, Bak7 玻璃作为波导层材料,波导的宽度为  $4\ \mu\text{m}$ , 厚度为  $0.4\ \mu\text{m}$ 。M-Z 光波导干涉仪的 Y 分支设计中采用上升反正弦 S 型弯曲,为适用于该干涉仪的信号臂和参考臂大跨距的特殊结构,应用波导转向镜实现了大角度光路转折,反射转向镜的内介质采用镀制金属铝膜得以实现,并利用 BPM 进行了仿真。为了防止 TE 模偏振光的偏振态经铝膜全反射后发生变化,加了 4 个长度为 1 mm 的 TE 模偏振器以保持其偏振态。实验结果与理论相符。

**关键词:**加速度计; M-Z 干涉仪; 光波导; 结构设计

**中图分类号:** TH744.3 **文献标识码:** A

## Structure design of Mach-Zehnder interferometer in electrooptic integrated acceleration seismic geophone

ZHANG Yan-jun, CHEN Cai-he, WU Bo, CUI Yu-ming, MA Guang-peng

(1. Key Laboratory of Opto-electronics Information Technical Science of the EMC, College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;  
2. Department of Optoelectronics Engineering, Yanshan University, Qin Huangdao, 066004, China)

**Abstract:** A novel electrooptic integrated acceleration seismic geophone was presented. Mach-Zehnder waveguide interferometer of Si-based MOEMS (micro-opto-electro-mechanical system) acceleration seismic geophone was researched and its optimization structure design was accomplished. The material of buffer layer and coating layer is K9 glass. Two Bak7 glass Y-branching waveguides with width of  $4\ \mu\text{m}$  and thickness of  $0.4\ \mu\text{m}$ , and six guide mirrors are employed in interferometer. A S-shaped curve is used for the transition connecting two offset parallel waveguides in Y-branching. Because it is difficulty to make the branching angle large enough by using conventional Y-branching, a  $90^\circ$  directional change by a vertical mirror facet to realize the special structure between measuring arm and reference arm is designed. The inner dielectric film of the mirror facet is aluminum plating. To prevent the po-

收稿日期: 2005-09-10; 修订日期: 2005-10-21.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40274047)。

larization state of TE mode polarized light from changing after passing through the aluminum film, 4 polarizers with length of 1 mm have been used. The simulation results performed in BPM and the experiment agrees with the theoretical analysis well.

**Key words:** accelerometer; Mach-Zehnder interferometer; waveguide; structure design

## 1 引言

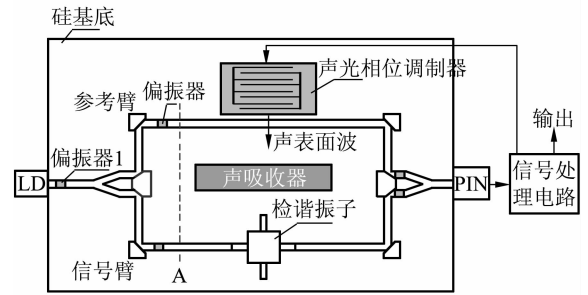
硅是制造传感器的理想材料<sup>[1]</sup>, 硅微机械 MEMS (Micro-electromechanical Systems) 加速度传感器具有体积小、成本低、可靠性高、易于集成和批量生产等优点。在已研制的全光纤<sup>[2-3]</sup>和混合型加速度计<sup>[4-5]</sup>基础上, 本文提出了一种全新、集成化的硅基 M-Z 干涉型 MOEMS (Micro-optotical-electro-mechanical Systems) 加速度地震检波器, 它具有灵敏度高, 频带宽, 体积小, 重量轻, 易于集成和批量生产, 可进行高精度地震波检测, 且在易燃易爆的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向微型化和批量生产时遇到的装配困难及长期稳定性问题。

本文对光电集成加速度地震检波器的工作原理、M-Z 光波导干涉仪结构设计及参数计算进行了阐述, 并利用 BPM 进行了仿真。实验结果与理论相符。

## 2 工作原理

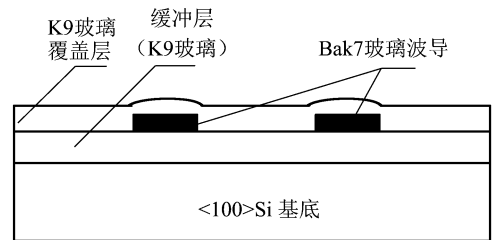
硅微光机械加速度地震检波器结构如图 1(a)所示, 它以硅为基底, 主要由简谐振子系统、M-Z 波导干涉仪、信号处理系统三部分组成。图 1(b)是单模条波导截面图。在硅基底上直接腐蚀出硅十字梁质量块简谐振子。在硅基底上溅射 K9 玻璃缓冲层, 在缓冲层上制作 Bak7 玻璃条形光波导、波导转向棱镜, 构成光波导 M-Z 干涉仪, 并在入射波导处集成了光波导偏振器 1。为消除偏振光经过金属反射镜后偏振态的改变, 在光路中加入了 4 个波导偏振器。当波长为  $1.3 \mu\text{m}$  的激光耦合进 M-Z 干涉仪的输入端后, 经偏振器 1 起偏后成为 TE 偏振光, 在输入 Y 分支波导处等强度的分为两路, 在波导中传播: 上路为参考臂, 下路为信号臂。信号臂经过简谐振子中的两根硅梁和质量块。当外界存在垂直方向的加速度时, 质量块产生振动, 引起梁发生弯曲, 导致信号臂中

的光相位改变, 当信号光和参考光在输出 Y 分支波导汇合后产生干涉。干涉光强由 PIN 探测, 由集成在硅基上的信号处理电路进行处理, 并从干涉仪的输出光强中提取待测的加速度信号。为了实现对待测的加速度信号进行解调和温度补偿, 在参考臂上集成了波导声光相位调制器, 利用声表面波(SAW)实现相位调制和温度补偿。



(a) 俯视图

(a) Planform drawing



(b) A 处截面图

(b) Cross drawing

图 1 马赫-曾德干涉型 MOMES 加速度地震检波器结构图

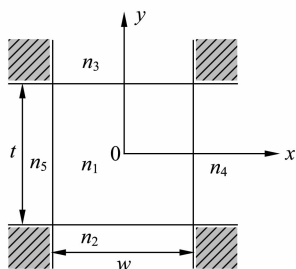
Fig. 1 Schematic diagram of the electrooptic integrated acceleration seismic geophone with phase modulation

## 3 M-Z 光波导干涉仪结构设计

### 3.1 单模波导设计

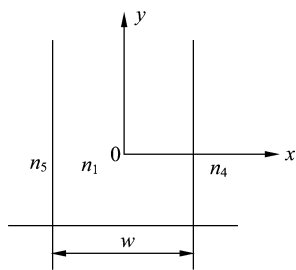
采用有效折射率法对 M-Z 光波导干涉仪中的单模条波导进行设计。设单模条波导为一矩形横

截面,波导的横截面及坐标如图 2(a)所示,坐标原点放在条形波导的中心。



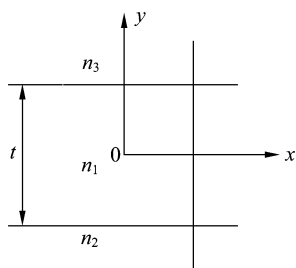
(a) 矩形波导截面和坐标设定

(a) Section of rectangle waveguide and coordinate



(b) x 方向受约束的平面波导 I

(b) Plane waveguide I restricted in aspect x



(c) y 方向受约束的平面波导 II

(c) Plane waveguide II restricted in aspect y

图 2 有效折射率法分析

Fig. 2 Analysis of effective-index method

有效折射率法分为两步:首先把图 2(a)所示的矩形介质波导等效为一个 x 方向受约束的平面波导,如图 2(b)所示,用求平面波导理论求其有效折射率  $N_1$ ;其次把图 2(a)所示的矩形波导在 y 方向上等效为一平面波导,如图 2(c)所示,其波导层的折射率是等效为图 2(b)所求得的有效折射率  $N_1$ ,通过平板波导本征方程的求解,从而求出第二个平面波导的有效折射率  $N$ ,即为所

求矩形波导的有效折射率。

由于本芯片主要是利用声光调制器对 x 方向偏振态调制,故在这仅仅讨论  $E_{mm}^x$  模。因为其主要电磁场分量为  $E_x$  和  $H_y$ ,从图可看出这种场相当于 2(b)所示平面波导中的 TM 模;对 2(c)而言为 TE 模。采用对称埋入式矩形波导,即  $n_5 = n_4 = n_3 = n_2$ 。

对 x 方向受约束的平面波导 I(如图 2(b)所示),导模的截止条件为  $N_1 = n_2$ ,其模式方程为

$$(n_1^2 - N_1^2)^{\frac{1}{2}} kw - 2\arctan \left[ \left( \frac{N_1^2 - n_2^2}{n_1^2 - N_1^2} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{n_1}{n_2} \right) \right] = (m-1)\pi \quad m=1,2,\dots, \quad (1)$$

式中: $k$  为波数,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 。  $N_1$  为有效折射率,  $m$  表示模数,  $w$  表示波导宽度。

对 y 方向受约束的平面波导 II(如图 2(c)所示),导模的截止条件为  $N = n_2$ ,其模式方程为

$$(N_1^2 - N^2)^{\frac{1}{2}} kt - 2\arctan \left( \frac{N^2 - n_2^2}{N_1^2 - N^2} \right)^{\frac{1}{2}} = (m-1)\pi \quad m=1,2,\dots, \quad (2)$$

式中: $t$  表示波导厚度。

要想使矩形波导成为只传输  $E_{11}^x$  模的单模波导,不仅要求平面波导 I 只传播  $m=1$  的模,而  $m=2$  的模截止,同时要求平面波导 II 传播  $m=1$  的模,而  $m=2$  的模截止。

平板波导所能维持的模数  $m$  以及  $m$  阶导模的截止厚度  $d_c$  可分别表示为:

$$m = \text{Integer} \left[ 2(n_f^2 - n_s^2)^{\frac{1}{2}} \frac{d}{\lambda} - \frac{1}{\pi} \arctan \sqrt{a'} \right], \quad (3)$$

式中: $n_f$  表示波导折射率,  $n_s$  表示基底和包层的折射率,  $d$  为波导层厚度,  $a'$  表示非对称参量,对于 TE 模,  $a_{TE}' = (n_s^2 - n_a^2) / (n_f^2 - n_s^2)$ 。

$$d_c = \frac{m\pi + \arctan \sqrt{a'}}{2\pi(n_f^2 - n_s^2)^{\frac{1}{2}}} \lambda, \quad (4)$$

式(3)表明,薄膜厚度  $d$  越大、光波长越短,波导层和基底的折射率差越大,平板波导所能维持的模式数量就越多;截止厚度  $d_c$  随光波长和模数  $m$  的增加而增加。为了得到大的波导横向尺寸,选择 K9 玻璃作为基底层和包层材料, Bak7 玻璃作为波导层材料,在光波长为  $1.3 \mu\text{m}$  时其折射率分别为  $n_1 = 1.5549$ ,  $n_2 = 1.5064$ 。

经编程求解得单模条波导中  $w$  和  $t$  的关系曲

线,如图 3 所示。根据实际工艺条件,选用  $w = 4 \mu\text{m}$ ,  $t = 0.4 \mu\text{m}$ 。即 Bak7 玻璃波导的宽度为  $4 \mu\text{m}$ ,厚度为  $0.4 \mu\text{m}$ 。

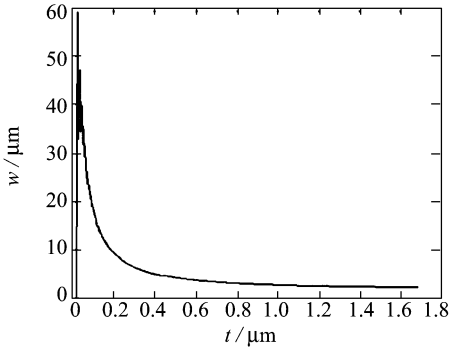


图 3  $w-t$  单模关系图

Fig. 3 Single mode relation curve of  $w$  and  $t$

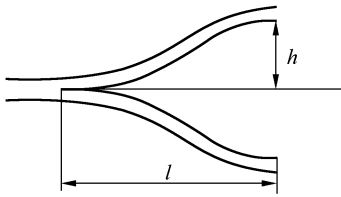


图 4 S 弧形弯曲 Y 分支波导

Fig. 4 S arc bend and Y branched-waveguide

### 3.2 Y 分支波导设计

对于 M-Z 干涉仪, Y 分支波导起分束器和合束器的作用。由于所设计的质量块宽为  $5\,000 \mu\text{m}$ , 则分支高度至少应该为  $2\,500 \mu\text{m}$ , 此时如果器件尺寸较小, 其损耗将很大。为此采用了 S 形弯曲 Y-分支波导, 其结构如图 4 所示。根据文献[6], 在 M-Z 光波导干涉仪的 Y 分支设计中采用上升反正弦 S 型弯曲, 因为该弯曲是连续曲率变化的弯曲波导, 理论上其模转换损耗为 0。利用波导反射转向镜来实现大分支高度转向, 其结构如图 5 所示。对半导体空气类型的波导转向镜, 其理论上的损耗低于  $0.1 \text{ dB}$ , 实际上损耗要比这大, 主要是因为加工工艺不理想。反射镜镜边的位置, 反射镜表面的粗糙度, 镜面的倾斜都将影响光的传输。在设计反射镜尺寸时, 波导中传输光的模尺寸是一个重要的参数, 模尺寸越小, 反射的损耗也就越小<sup>[7]</sup>。Bak7 玻璃波导制作完成后, 利用套刻技术和溅射工艺, 制作出波导转向镜, 每个反射镜的损耗为  $0.5 \text{ dB}$ 。反射转向镜的

材料为金属铝膜, 比玻璃波导略厚。用 BPM 法模拟得到的模场分布图得知, 模尺寸为: 宽度  $5.13 \mu\text{m}$ , 高度  $3.06 \mu\text{m}$ , 所以所设计的镜面宽度应该大于  $6 \mu\text{m}$ 。为了防止 TE 模偏振光的偏振态经铝膜全反射后发生变化, 加了 4 个 TE 模偏振器(见图 5), 以保持其偏振态。通过分析和编程计算得偏振器长度为  $1 \text{ mm}$ 。

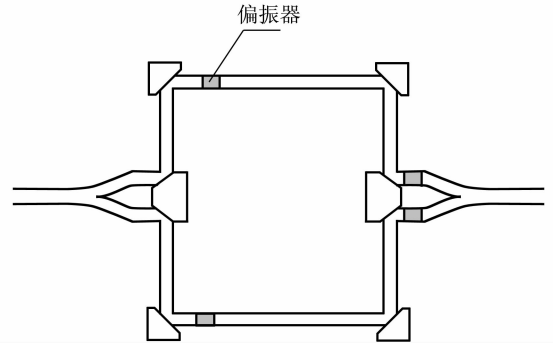


图 5 M-Z 干涉仪结构

Fig. 5 Structure of Mach-Zehnder waveguide interferometer

上升反正弦 S 形弯曲波导的损耗近似为:

$$\alpha(\text{dB}) = \frac{10}{\ln 10} \cdot 2\sqrt{2}\pi \frac{h C_1}{l C_2} e^{-v} [1 - e^{-\frac{v}{2}}], \quad (5)$$

式中:  $h$  为弯曲的高度,  $l$  为弯曲的长度,  $v = \frac{C_2 l^2}{2\pi h}$ 。 $C_1, C_2$  是和波导结构参数有关的参数<sup>[8]</sup>。由上式可得上升反正弦 S 形弯曲波导弯曲损耗和波导弯曲长度的关系, 如图 6 所示。这里折射率分布为  $n_2 = 1.506\,42$ ,  $n_1 = 1.554\,9$ ,  $N = 1.511\,05$ , 工作波长为  $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ , 波导宽度为  $w = 4 \mu\text{m}$ , 弯曲的高度  $h = 25 \mu\text{m}$ 。可见当弯曲长度  $l > 0.7 \text{ mm}$  时, 其损耗几乎为 0。这里选择弯曲长度  $l = 1 \text{ mm}$ 。

### 3.3 BPM 法数值模拟

采用加拿大 OptiWave 公司的 BPM5.0 对所设计的 Y 分支波导结构进行了模拟。由于波导折射率不沿着传播方向方向变化, 所以采用傍轴近似标量 BPM 法即可, 这里采用 FD-BPM 法来模拟波导中的 TE 模传输, 选取边界条件为透明边界条件, 步长为  $1.55 \mu\text{m}$ 。

图 7 给出了波导横截面的光场分布, 结果表明只有一个模式存在, 即波导是单模波导, 且模尺寸为: 宽度  $5.13 \mu\text{m}$ , 高度  $3.06 \mu\text{m}$ 。图 8 给出了

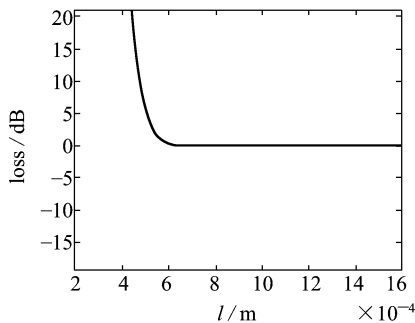


图 6 S 形弯曲波导弯曲损耗  $\alpha$  和波导弯曲长度  $l$  的关系  
Fig. 6 Relation curve of S bend loss  $\alpha$  and length  $l$

光波在 Y 分支波导中传输场分布情况,可以看出 Y 分支波导的两臂均匀输出,输出功率均大约为 50%左右,可见分光比大致为 1:1,且传输损耗几乎为 0,与理论分析相符。

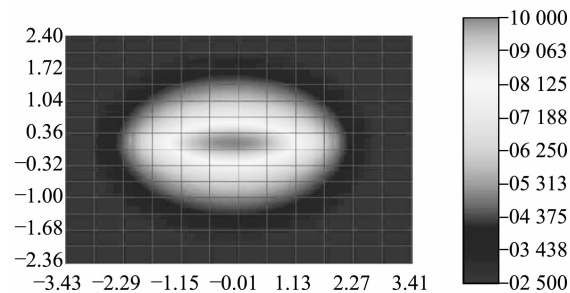


图 7 单模波导横截面的光场分布  
Fig. 7 Optical field distribution in the cross section of a single mode waveguide

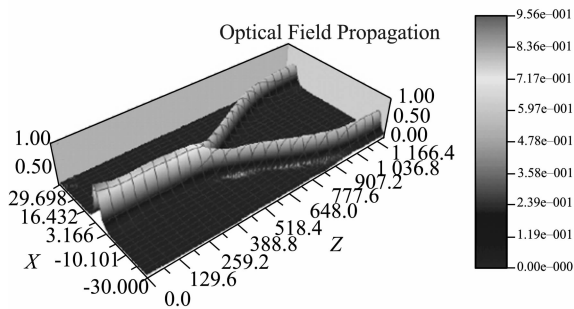
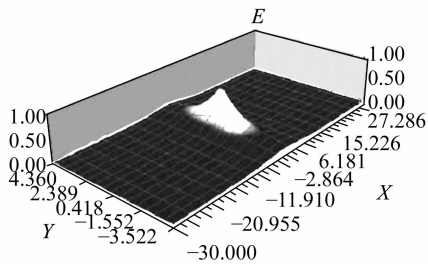
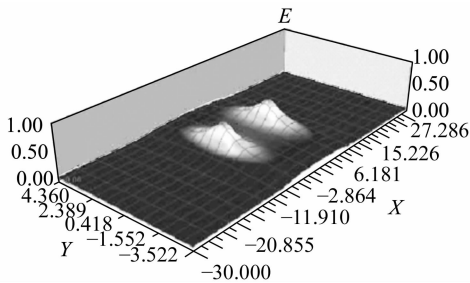


图 8 Y 分支波导传输场分布  
Fig. 8 Optical field distribution of junction Y

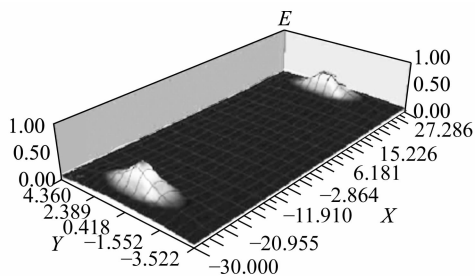
图 9 给出了光传输到达不同位置时的光场的横向分布情况,可以清晰看出场在传输过程中的分布情况。



(a)  $Z=125 \mu\text{m}$



(b)  $Z=560 \mu\text{m}$



(c)  $Z=1200 \mu\text{m}$

图 9 不同位置时的光场横向光场分布  
Fig. 9 optical field distribution of different positions

### 4 实验

经过大量实验,制作了 M-Z 波导干涉仪芯片。图 10 给出了溅射 Bak7 玻璃后,用 OLYM-

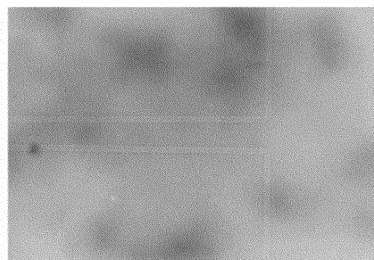


图 10 溅射 Bak7 后的波导  
Fig. 10 Waveguide sputtered Bak7

PUS (BH2-UMA) 显微镜(放大倍数  $20\times 10$ ) 得到的照片,可以看出波导边缘基本平滑。图 11 给出了溅射后,用 Dektak3030 (Surface Profile Measuring System)测得的 Bak7 玻璃膜的厚度:

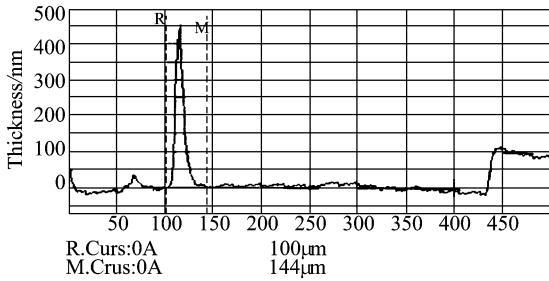


图 11 Bak7 波导条厚度

Fig. 11 Thickness of waveguide sputtered Bak7

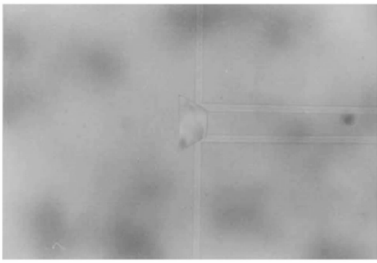


图 12 铝膜反射镜

Fig. 12 Reflecting mirror with aluminium film

大约为 450 nm,和理论设计值  $0.4\ \mu\text{m}$  相差不大,由图 3 可知,此时还满足单模条件。

图 12 给出了磁控溅射铝后得到的反射镜照片。图 13 是波长为  $1.3\ \mu\text{m}$  的 LD 为光源,用红外摄像机获得的输出光斑图像。

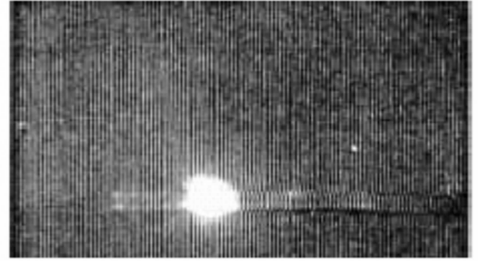


图 13 红外摄像机接收到的光斑

Fig. 13 Light spot received by infrared vidicon

## 5 结 论

对硅基微光电机机械加速度地震检波器的 M-Z 光波导干涉仪系统进行了系统研究和优化设计。在此基础上,经过大量实验,在本实验室现有条件下制作出了 M-Z 波导干涉仪芯片,取得了较有价值的工艺参数和实验结果,为地震检波器的整体实现打下了良好的基础。

## 参考文献:

- [1] GREENWOOD J C. Silicon in mechanical sensor[J]. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1988, 21(12): 1114-1128.
- [2] CHEN C H, DING G L, ZHANG D L, et al. Michelson fiber-optic accelerometer[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1998, 69(9): 3123-3126.
- [3] CHEN C H, DING G L, ZHANG D L, et al. Broadband Michelson fiber-optic accelerometer[J]. *Appl Opt.*, 1999, 38(4): 628-630.
- [4] 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]. *光电子·激光*, 2003, 14(8): 791-794. WU B, CHEN C H, DING G L, et al. Structure design of M-Z interference MOEMS accelerometer[J]. *Journal of optoelectronics · Laser*, 2003, 14(8): 791-794. (in Chinese)
- [5] WU B, CHEN C H, DING G L, et al. Hybrid-integrated Michelson fiber optic accelerometer[J]. *Optical Engineering*, 2004, 43(2): 313-318.
- [6] MINFORD W J. Low-loss  $\text{Ti}:\text{LiNbO}_3$  waveguide bends at  $\lambda=1.3\ \mu\text{m}$ [J]. *IEEE J. of Quantum Electron*, 1982, 18(10): 1802-1806.
- [7] JOHNSON J E, TANG C L. Precise determination of turning mirror loss using GaAs/AlGaAs lasers with up to ten 900 intracavity turning mirrors[J]. *IEEE Photonics Technology Letter*, 1992, 4, (1): 24-26.
- [8] MACARTILI E A, MILLER S E. Improve relations describing directional control in electromagnetic wave guidance [J]. *Bell Sult. Tech. J.*, 1969, 48(9): 2161-2188.

作者简介:张燕君(1973—),女,北京人,燕山大学信息科学与工程学院教师。天津大学精密仪器与光电子工程学院在读博士研究生,主要从事集成光学与导波器件,光纤传感等研究工作。E-mail: abegail2002@sohu.com