

文章编号: 0258-7025(2005)03-0399-05

集成光学迈克尔逊干涉型加速度 地震检波器

恩 德^{1,2}, 陈才和¹, 崔宇明¹, 丁桂兰¹

(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 内蒙古民族大学数学与计算机学院, 内蒙古 通辽 028043)

摘要 为了提高地震检波器的检测灵敏度, 增强其性能可靠性, 使其体积微型化, 利用集成光学原理设计研制了迈克尔逊干涉芯片, 并与光纤—质量块简谐振子、光源、光电探测器制成迈克尔逊干涉型加速度地震检波器, 检波器具有灵敏度高、频带宽、重量轻、抗电磁干扰等优点, 设计参数相位检测灵敏度 $\Delta\phi/a$ 为 $1.1 \times 10^{-2} \text{ rad}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$, 测试结果表明, 在工作频带 $0 \sim 1065 \text{ Hz}$ 内, 振动与检波器输出信号吻合良好, 达到设计要求。

关键词 集成光学; 检波器; 迈克尔逊干涉; $\text{Ti}:\text{LiNbO}_3$; 双 Y 分支波导; 电光相位调制

中图分类号 TP 212.14 **文献标识码** A

Integrated Optics Michelson Interference Acceleration Seismic Geophone

EN De^{1,2}, CHEN Cai-he¹, CUI Yu-ming¹, DING Gui-lan¹

¹ Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technical Science EMC, College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China
² College of Mathematics and Computer, Inner Mongolia University of Nationalities, Tongliao, Neimenggu 028043, China

Abstract For high resolution application in seismic detection, the geophone should be small in size, reliable and sensitive. An integrated optic Michelson interference acceleration seismic geophone has been studied and fabricated. The device is realized by an light source, a photodetector, and Michelson interference integrated optical chips, which are hybrid integrated. The main design parameters of the geophone system are as following: phase detection sensitivity $\Delta\phi/a$ is $1.1 \times 10^{-2} \text{ rad}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$; work frequency band is $0 \sim 1065 \text{ Hz}$.

Key words integrated optics; geophone; Michelson interferometer; $\text{Ti}:\text{LiNbO}_3$, double-Y branching waveguide; phase modulator

1 引 言

集成光学迈克尔逊干涉型加速度地震检波器^[1,2]是在我们研制的迈克尔逊干涉芯片^[3]基础上混合集成激光二极管(LD)光源、光电探测器、光纤—质量块简谐振子、镀膜光纤制成的导波型传感器, 主要应用于地震监测、石油地质勘探等领域, 迈克尔逊干涉芯片是将电光调制器、分支波导、偏振器单片集成在铌酸锂晶体上, 增强了检波器的检测灵敏度和

可靠性, 具有频带宽、重量轻、抗电磁干扰^[4]等独特优点。设计参数: 工作频带 $0 \sim 1065 \text{ Hz}$, 相位检测灵敏度 $\Delta\phi/a$ 为 $1.1 \times 10^{-2} \text{ rad}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$, 自然频率 3549 Hz 。

2 工作原理及其设计

2.1 工作原理

集成光学迈克尔逊干涉型加速度地震检波器主

收稿日期: 2004-04-01; 收到修改稿日期: 2004-09-13

基金项目: 国家自然科学基金(49874031)资助项目。

作者简介: 恩 德(1962—), 男, 蒙族, 内蒙古通辽人, 天津大学精密仪器与光电子工程学院博士研究生, 主要从事集成光学与传感技术的研究。E-mail: tlende@sina.com

要由以下四部分组成:光纤-质量块简谐振子、端面镀膜光纤、迈克尔逊干涉芯片、信号处理系统,如图1所示。激光二极管光源发出的波长为 $1.3 \mu\text{m}$ 激光,经光波导偏振器4后成为偏振光,耦合进双Y型分支波导6后分为两束,分别进入信号臂和参考臂。参考光经光波导偏振器8和参考臂补偿单模光纤11,经单模光纤全反射镜14后按原路返回;信号光经光波导相位^[5]调制器7,光波导偏振器9,光纤-质量块简谐振子13,单模光纤,单模光纤全反射镜15后按原路返回。信号光与参考光在双Y型分支波导耦合区6干涉,将光波的相位变化转化为光强变化。光电探测器接收来自单模光纤2的光强,并将光强信号转化为电信号。光电探测器输出电信号,由采用交流相位跟踪零差补偿(PTAC)技术的信号处理电路输出待测加速度信号。

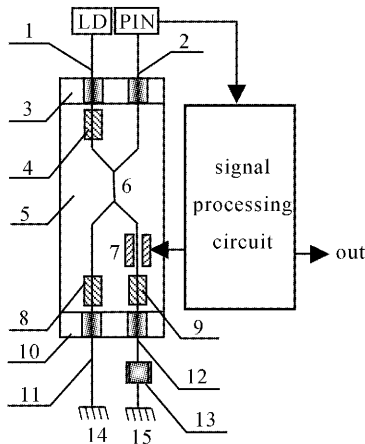


图1 集成光学迈克尔逊干涉型加速度计的结构

1,2:单模光纤;3,10:硅V型槽;4,8,9:光波导偏振器;5:LiNbO₃基底;6:双Y型分支波导;7:波导光电相位调制器;11:参考臂;12:信号臂;13:光纤-质量块简谐振子;14,15:全反射镜

Fig. 1 Structure of Michelson integrated optical accelerometer

1,2: single-mode fiber; 3,10: V-groove of Si; 4,8,9: polarizer of TE mode; 5: LiNbO₃ substrate; 6: double-Y branching waveguide; 7: phase modulator; 11: reference arm; 12: signal arm; 13: sensing element; 14,15: total reflection film

2.2 元件分析设计

2.2.1 简谐振子

检波器中迈克尔逊干涉芯片通过检测简谐振子的运动引起信号臂的变化进行工作,当系统受振动冲击时,质量块纵向振动,从而使质量块上连接的有效光纤产生伸缩。由于应力应变效应、光弹效应和泊松效应,使光纤中传播的光波相位发生变化。利用迈克尔逊干涉仪芯片将相位变化量变为光强信

号,PIN光电探测器转换为电信号。用铌酸锂材料的集总型电光相位调制器对信号光进行调制,(PTAC)电路提取加速度信号。简谐振子结构,如图2所示。

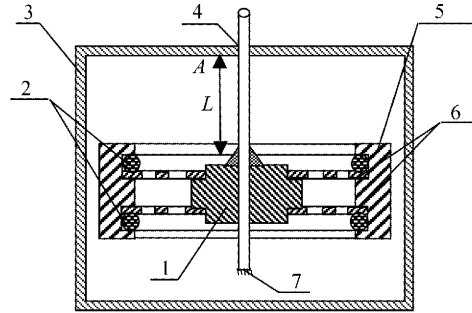


图2 简谐振子结构示意图

1:质量块;2:卡簧;3:底座;4:单模光纤;5:质量块框架;6:横向限振片;7:全反射镜

Fig. 2 Sketch of structure of sensing element

1: mass; 2: circlip; 3: base; 4: single-mode fiber; 5: frame; 6: cross antivibration flake; 7: total reflection film

质量块架与基底固为一体。光纤L是加速度计干涉系统中信号臂的一部分,在A点处将光纤与芯片Si-V型槽用胶固定。检测信号时,只有A至质量块这段长度L有效。工作时,加速度计置于被测场中,简谐振子随大地作加速度a运动,因而质量块m产生位移会使光纤伸缩。

当光纤受到纵向(轴向)的机械应力作用时,光纤的长度L产生变化 $\pm\Delta L$ (应变效应)、光纤芯的直径d产生变化 Δd (泊松效应)、纤芯折射率n产生变化 $\pm\Delta n$ (光弹效应),这些变化将导致光纤中光波的相位变化。泊松效应相对应应变效应和光弹效应造成的相位变化非常小,可以忽略^[7]不计。对质量块m而言,由

$$ma = \frac{\Delta L}{L}(EA + KL),$$

得到

$$\Delta L = \frac{Lma}{EA + KL}, \quad (1)$$

E为光纤的杨氏模量;A为光纤的横截面积;K为弹簧片刚度系数。

1) 光纤纵向应变

在纵向应变时,根据单模光纤模的传输特性,在工作波长为 λ_0 时,得到相位延迟与纵向应变之间关系为

$$\Delta\phi_L = \beta\Delta L = \frac{2\pi}{\lambda_0}n\Delta L = \frac{2\pi nLma}{\lambda_0(EA + KL)} =$$

$$7.05 \times 10^6 \frac{Lma}{EA + KL} \quad (2)$$

2) 光弹效应

在光纤中,光的传播是沿横向偏振的,其折射率变化为所引起的相位延迟

$$\begin{aligned} \Delta\phi_n &= L\Delta\beta = L \frac{\partial\beta}{\partial n}\Delta n = \\ &= -\frac{1}{2}n^3 k_0 L [(P_{11} + P_{12})\epsilon_1 + P_{12}\epsilon_3] = \\ &= -1.52 \times 10^6 \frac{Lma}{EA + KL} \quad (3) \end{aligned}$$

光纤中光波相位变化为

$$\Delta\phi = \Delta\phi_L + \Delta\phi_n = 5.53 \times 10^6 \frac{Lma}{EA + KL} \quad (4)$$

式中 $K = 0.466 \text{ N/m}$; $E = 71.54 \times 10^9 \text{ N/m}^2$; $A = 63.585 \times 10^{-6} \text{ mm}^2$ 。

检波器的相位变化与光纤长度 L 及质量块 m 相关。随 L 和 m 的增加而增大(见表 1),对 L 和 m 的取值,必须考虑自然频率和有效频带。

为了获得有用频带范围 $0 \sim 1066 \text{ Hz}$,系统选择 $L = 6 \text{ mm}$ 和 $m = 0.3 \text{ g}$ 。

表 1 L, m 对自然频率、有效频带和灵敏度的影响

Table 1 Total sensitivity for different L and m

m /g	L /mm	Natural frequency /Hz	Available frequency band /Hz	Total sensitivity /[$\text{V}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$]
0.2	4	5332	0~1600, 6931~9011	0.36
0.3	6	3554	0~1066, 4621~5332	0.48
0.4	12	2176	0~625, 2828~3264	2.18
0.5	18	1589	0~476, 2067~2384	4.09
0.6	20	1377	0~413, 1790~2065	5.46

2.2.2 光纤选择

单模光纤与多模光纤相比,色散低,损耗小。单模光纤的基本模式的相位对于外界的各种微扰极其敏感,并且现在单模光纤的带宽达太赫兹量级,由于与传输波长为 $1.3 \mu\text{m}$ 的通信光纤相匹配的光源探测器,以及各种光纤器件发展比较成熟,选用波长为 $1.3 \mu\text{m}$ 通信用的单模光纤。

2.2.3 光纤端面镀膜

在单模光纤端镀高反膜可以增强反射光的强度,减少外界杂散光的干扰,提高信噪比,增强检波器的稳定性。与一般的镀膜不同,在单模光纤端面镀高反膜有其特殊性:不能对光纤加热,单模光纤端面的清洗不能使光纤包层伸缩,固定光纤端面的卡具能保证光纤处于无应力状态,镀膜材料为金属铝。

单模光纤在镀制^[8]金属铝(ZZS700-2/G 箱式真空镀膜机,测控系统 TELEMAR860,美国)全反射膜后的光谱特性(用 WGD-3 组合多功能光栅光谱仪测试)较理想,如图 3 所示。

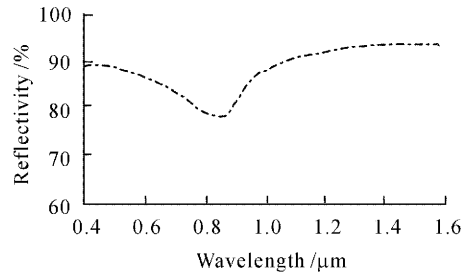


图 3 镀膜光纤在 $1.3 \mu\text{m}$ 附近的光谱曲线

Fig. 3 Spectrum curve of coating film fiber ($1.3 \mu\text{m}$)

2.2.4 光纤长度

图 1 中用单模光纤做信号臂和参考臂 (l_1, l_2),其两臂长度对干涉有决定性的影响。由于在干涉仪中两束光除了要满足两列波的频率相同、振动方向相同、两列波的相位差恒定^[9]三个相干条件外,它们的光程差必须小于光波的相干长度。为满足实现干涉仪的一个必要条件,使参考光与信号光的光程相等,即 $l_1 = l_2$ 。

相干长度的限制:

对于中心波长为 λ ,光谱半宽为 $\Delta\lambda$ 的光源,其相干长度为 $\Delta_{\text{max}} = \lambda^2 / \Delta\lambda$,对于 $\lambda = 1300 \text{ nm}$,光谱半宽为 $\Delta\lambda = 1 \text{ nm}$ 的光源,其相干长度为: $\Delta_{\text{max}} = 1.69 \text{ mm}$,借助精密对准设备截取的 l_1, l_2 不能超过 Δ_{max} 。

2.2.5 波导偏振器

为了对加速度信号进行调制,保证参考光和信号光经反射膜反射后两束光干涉的稳定性,波导中设计了相应的偏振器^[10],如图 4 所示。

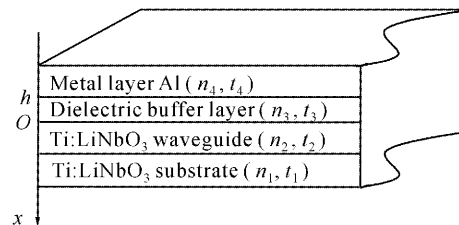


图 4 金属包覆 TE 模偏振器的结构示意图

Fig. 4 Sketch of structure of TE modal polarizer

偏振器采用金属包覆的波导结构实现 TE 模偏振器。令

$$s = \beta/k, \quad (5)$$

式中 β 为 Ti:LiNbO₃ 波导的传播常数; k 为真空中波数。则在金属包覆的结构波导中传播描述为

$$\begin{aligned} & \arctan \sqrt{\frac{s^2 - n_1^2}{n_2^2 - s^2}} - \frac{2\pi t_2}{\lambda} \sqrt{n_2^2 - s^2} + \\ & \arctan \left[\sqrt{\frac{n_3^2 - s^2}{n_2^2 - s^2}} \tan \left(-\frac{2\pi}{\lambda} t_3 \sqrt{n_3^2 - s^2} + \right. \right. \\ & \left. \left. \arctan \sqrt{\frac{s^2 - n_4^2}{n_3^2 - s^2}} \right) \right] \pm m\pi = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

式中, 铌酸锂衬底折射率为 $n_1 = 2.13$, 钛扩散层折射率^[11] 为 $n_2 = 2.133$, 缓冲层折射率 $n_3 = 1.458$, 金属铝镀层折射率 $n_4 = 1.415 - i15.65$, 各层厚度 $t_1 = 2 \text{ mm}$, $t_2 = 4.39 \text{ }\mu\text{m}$, $t_3 = 50 \text{ nm}$, $t_4 = 200 \text{ nm}$ 。TE 模衰减率定义为 $\alpha_{\text{TE}} = 8.686\beta_{\text{xi}}$, 单位 dB/mm。式中含有两个变量 t_3 和 s , 让缓冲层厚度 t_3 在 $0 \sim 10 \text{ }\mu\text{m}$ 之间变化, 解出对应的 s , 从而求出 TE 模的损耗。计算表明, TM₀ 模的损耗系数 α_{TM_0} 随缓冲层厚度的变化呈现一个共振峰。相应的共振吸收厚度为 $t_3 = 53 \text{ nm}$ 。对此缓冲层厚度, TE₀ 模和 TM₀ 模的损耗系数分别为

$$\alpha_{\text{TE}} = 4.67 \times 10^{-3}, \quad \alpha_{\text{TM}} = 4.57 \times 10^2.$$

制造时取缓冲层(SiO₂)厚度 50 nm, 偏振器长度 5 mm, 钛扩散层厚度 4.39 μm 。

3 实验结果与讨论

3.1 功率变化

测试表明, 光纤在镀膜后的功率提升(ML-94A 光功率计), 输出从纳瓦量级提升到毫瓦量级, 经单模光纤全反射, 完全能满足 PIN 光电探测器对光强的要求, 保证检波器信噪比, 结果如表 2 所示。

表 2 单模光纤在镀膜后的功率提升对比

Table 2 Power for different coating film

Geophone serial	A	B	C
Bare /nW	3.1	4.2	3.0
Coating film /mW	0.21	0.19	0.18

3.2 钛溅射

钛溅射是钛扩散制作铌酸锂波导成功的重要环节^[12], 预溅射 10 min, 使靶材表面清洁, 溅射率稳定, 为了控制钛膜的厚度, 使溅射的钛膜致密、均匀, 有利于扩散后形成性能优良的光波导, 实际经验表明, 溅射速度取 65~75 nm/min 最佳。用显微镜 [OLYMPUS(BH2-UMA)20 * 20] 检测, 无断条后, 再用 Dektak3030 (Surface Profile Measuring System) 测

钛条的厚度, 测量参数和结果如图 5 所示。

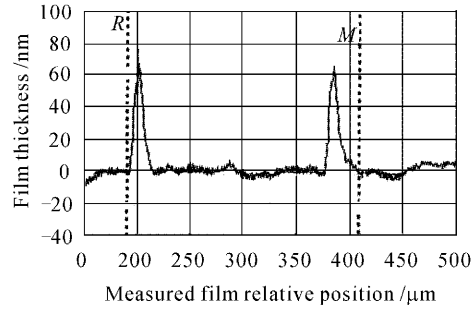


图 5 溅射钛厚度

Fig. 5 A comparison of surfaces of waveguides

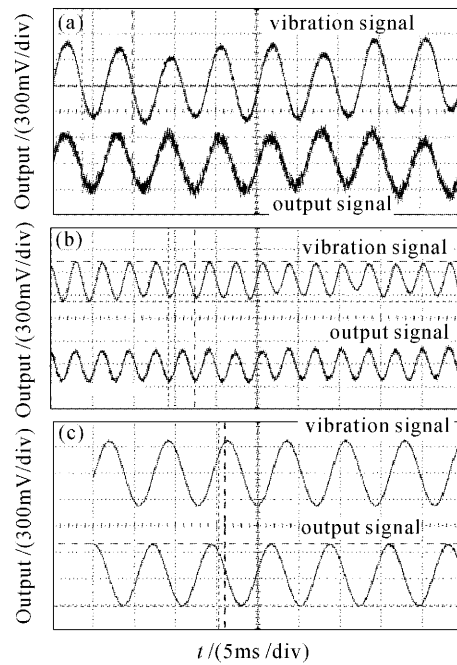


图 6 振动信号与检波器输出波形

Fig. 6 Waveforms of output and vibration signal

(a) 35.7 Hz, $a = 0.04 \text{ g}$; (b) 309 Hz, $a = 0.07 \text{ g}$;

(c) 850 Hz, $a = 0.2 \text{ g}$

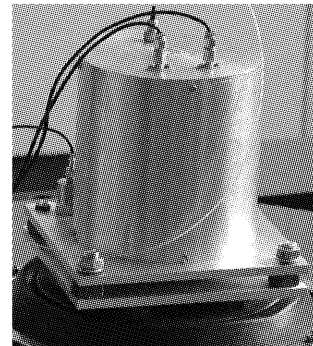


图 7 检波器外形图

Fig. 7 Shows the shape of the geophone

3.3 检波器测试

在 PM Vibration exciter 4808(丹麦)上对检波器进行了测试^[13]。振动波形和检波器输出波形表明^[14],两者吻合得很好,检波器能真实地探测外界振动,在不同的条件下的输入、输出波形如图 6 所示。检波器外形如图 7 所示。

4 结论与展望

由于采用了迈克尔逊干涉芯片、光纤-质量块简谐振子、集成光学技术^[15],提高了加速度地震检波器的检测灵敏度、展宽了测量频带、减小了体积、提高了使用可靠性。测试结果表明,检波器性能达到设计要求。因其工作性能稳定、体积微型化、适合批量生产等特点能够满足相关行业对高精度、高分辨率的检波器的需求。特别是地震检测与地质勘探中有着广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Caihe Chen, Guilan Ding, Delong Zhang *et al.*. Michelson fiberoptic accelerometer [J]. *Rev. Sci. Instr.*, 1998, **69**(9): 3123~3126
- 2 Caihe Chen, Delong Zhang, Guilan Ding *et al.*. Broadband Michelson fiber-optic accelerometer [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(4):628~630
- 3 Feng Ping, Chen Caihe, Ding Guilan *et al.*. The integrated optic chip of the hybrid-integrated optical accelerometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(Z1):430~433
冯 萍,陈才和,丁桂兰等. 混合型集成光学加速度计集成光学芯片[J]. *光子学报*, 2000, **29**(Z1):431~433
- 4 Huang Hui, Hu Hongzhang, Li Yunna *et al.*. Integrated optical TE/TM polarization splitter on LiNbO₃ using titanium diffusion [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(3):249~252
黄 晖,胡鸿璋,李云娜等. 集成光学 TM/TE 模分离器的研制[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(3):249~252
- 5 Lou Lifang, Sheng Zhongyan, Yao Kuihong *et al.*. PECVD deposition and characterization of thick silica film for optical waveguide [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1):24~28
娄丽芳,盛钟延,姚奎鸿等. 厚二氧化硅光波导薄膜制备及其特性分析[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1):24~28
- 6 Li Chun, An Yuying, Zeng Xiaodong. LiNbO₃ electrooptic tuning optical parametric oscillator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2):172~174
李 春,安毓英,曾晓东. LiNbO₃ 电光调谐光学参变振荡器[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2):172~174
- 7 Tang Duoqiang, Zhang Haibin, Hu Hongzhang *et al.*. Temperature property of integrated AOTF and its high accuracy digital control [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(7):629~632
唐多强,张海斌,胡鸿璋等. 集成光学声光可调谐滤波器的温度特性及其精密数字控制[J]. *中国激光*, 2003, **30**(7):629~632
- 8 Hu Hongzhang, Zhang Mei, Xiao Lifeng. The characteristics analysis of an integrated optical acoustooptic tunable filter based on spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2):195~198
胡鸿璋,张 梅,肖立峰. 集成光学声光可调谐光谱仪的特性分析[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2):195~198
- 9 Yang Xudong, Xu Xinguang, Shao Yaopeng *et al.*. Photovoltaic effect in doped photorefractive LiNbO₃ crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4):398~401
杨旭东,许心光,邵耀鹏等. 掺杂光折变 LiNbO₃ 晶体光伏效应特性[J]. *光学学报*, 2003, **23**(4):398~401
- 10 Xie Haiyan, Hu Hongzhang, Zhang Shengjia *et al.*. Study and fabrication of integrated optical polarization-independent reflector [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8):691~694
谢海宴,胡鸿璋,张胜甲等. 偏振无关集成光学模反射镜的研制[J]. *中国激光*, 2003, **30**(8):691~694
- 11 Qi Hongji, Cheng Chuanfu, Yuan Jingmei *et al.*. Morphology analysis of titanite thin film prepared by ion beam sputtering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4):480~484
齐红基,程传福,袁景梅等. 用离子束溅射方法制备的钛薄膜表面形貌分析[J]. *光学学报*, 2003, **23**(4):480~484
- 12 Liao Weijun, Chen Xianfeng, Zeng Xianglong *et al.*. Analytical study of electrooptic modulator using annealed proton exchanged planar waveguide [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(7):865~869
廖尉钧,陈险峰,曾祥龙等. 退火质子交换平面波导型电光调制器的研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(7):865~869
- 13 Fang Xiaoyong, Cao Maosheng. Theoretical study of laser acceleration sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(9): 1133~1137
房晓勇,曹茂盛. 激光加速度传感器的理论研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(9):1133~1137
- 14 Wan Zhiyu, Chen Gang, Wen Zhongquan *et al.*. A hybrid integrated micro fiber spectrometer design, simulation and primary experiments [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(6): 740~744
温志渝,陈 刚,温中泉等. 混合集成微型光纤光谱仪的设计模拟及实验[J]. *光学学报*, 2003, **23**(6):740~744
- 15 En De, Chen Caihe, Cui Yumin *et al.*. Study and fabrication on integrated planar optic disk pickup [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5):529~532
恩 德,陈才和,崔宇明等. 集成光学平板光盘读头的研制[J]. *光子学报*, 2004, **33**(5):529~532