

金属纳米线栅在光纤传感器中的应用

张明¹ 赵云¹ 周峰¹ 徐飞^{1,2} 陆延青¹

(¹ 南京大学现代工程与应用科学学院固体微结构国家实验室, 江苏 南京 210093)
² 南京大学(苏州)高新技术研究院, 江苏 苏州 215123)

摘要 利用聚焦离子束技术将金属线栅结构加工到一个工作在 1550 nm 波段的标准单模光纤的端面。金属线栅选用的金属是金,周期为 200 nm,尺寸远小于入射光的波长。根据有效介质理论,通过金属线栅结构的透射光为偏振光。TE 模式和 TM 模式的反射率对比度为 13.7 dB,其对比度和灵敏度可满足弹光效应和法拉第磁光效应引起的偏振性变化的检测要求。基于金属线栅结构,得到了灵敏度为 0.237 rad/N 的压力传感器和灵敏度为 0.06022°/A 的电流传感器。

关键词 传感器; 光纤传感; 金属线栅; 有效介质理论; 弹光效应; 法拉第效应

中图分类号 TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.s105004

Application of the Wire Metal Grating in the Fiber Sensors

Zhang Ming¹ Zhao Yun¹ Zhou Feng¹ Xu Fei^{1,2} Lu Yanqing¹

¹ College of Engineering and Applied Sciences and National Laboratory of Solid State
Microstructures, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China

² Nanjing University High-Tech Institute at Suzhou, Nanjing University, Suzhou, Jiangsu 215123, China

Abstract The wire metal grating (WMG) is fabricated on the tip of a standard single mode fiber (SMF) at 1550 nm wavelength by focused ion beam (FIB) technology. The metal used is Au and period of the grating is 200 nm, much smaller than the wavelength of incident light. The transmission light entering the structure is polarization according to the effective medium theory (EMT). The reflection contrast between TE and TM modes in our experiment reaches 13.7 dB, which is sensitive enough to monitor the polarization change induced by photoelastic effect and Faraday effect. Based on this WMG grating, a pressure sensor with the sensitivity of 0.237 rad/N and a current sensor with the sensitivity of 0.06022°/A are presented.

Key words sensors; fiber sensor; wire metal grating; effective medium theory; photoelastic effect; Faraday effect

OCIS codes 280.4788; 130.6010; 230.2240; 120.4640

1 引言

在近 30 年来,光纤光学传感器在工业界的应用和研究越来越广泛,比如折射系数、拉力、压力和温度的传感等^[1~3]。光纤传感器相比于其他传统的传感器有很多优势:具有较强的抗电磁干扰性、重量轻、尺寸小、较高的检测精度、较高的带宽等。目前应用于光纤光学传感器的理论主要有:用于温度传感和拉力传感的布拉格光栅理论^[2]、用于电流和磁

场传感的法拉第磁光效应^[4]和应用于压力传感的弹光效应^[3]等。

另外,随着微加工工艺的不断发展和越来越多的具有微结构和纳米结构光学器件应用到无线电通信和检测系统中。正因为这些光学器件在微米、纳米量级尺度下具备了一些新奇的功能,它们可以用于耦合器、偏振光检测器、干涉仪、光源和探测器等,不仅可以应用于集成光学系统中,还可以应用于光纤

收稿日期: 2011-06-09; 收到修改稿日期: 2011-09-05

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK2010247)、中央高校基本科研业务费专项资金和江苏高校优势学科建设工程资助课题。

作者简介: 张明(1986—),男,硕士研究生,主要从事光纤方面的研究。E-mail: benjamin_wen@126.com

导师简介: 陆延青(1971—),男,教授,主要从事光通信和传感等方面的研究。E-mail: yqlu@nju.edu.cn

光学传感系统中。

利用微加工技术制备金属纳米线栅(WMG)偏振器件是近些年微纳光学的研究热点^[5~9]。目前制备金属线栅的方法分为直接法和间接法两大类。直接法包括聚焦离子束刻蚀(FIB)、微纳遮挡板定向沉积技术及软模板打印金属;间接法包括纳米压印、光刻技术、全息干涉及电子束直写(EBL)。本文利用聚焦离子束刻蚀(FIB)在光纤纤芯端面加工出周期为纳米级尺度的金属线栅,该金属线栅可以同时作为入射光和反射光的偏振光检测器。将这种纳米级金属线栅应用到基于弹光效应的压力传感器系统和基于法拉第磁光效应的电流传感器系统中,都取得了很好的效果。

采用基于光纤端面纳米金属线栅的全光纤光路,相对于其他光纤传感器,在灵敏度、器件本身简化方面都有很大提高。采用基于光纤端面纳米金属线栅的光路偏振检测技术,可以实现全光纤外差数据采集的功能,由此可大幅度提高器件稳定性。

2 基于金属纳米线栅的偏振光检测器原理

金属纳米线栅结构如图 1 所示,一维无限长的条状金属(如金、银等)与条状空气周期性间隔排列在衬底(如二氧化硅)上,入射光垂直于线栅表面入射。根据有效介质理论(EMT),当光栅的周期(纳米量级)远小于入射光的波长时,该光栅可当作一个等效介质来处理,折射率也可通过简单的公式得到。比如,如果金属线栅周期和入射光波长相比尺寸可近似为 0 的情况下,金属线栅结构就可等效为一层具有固定介电常数的薄膜。通过有效介质理论,可以得到向介质特定方向传播的光的波矢,TE 模式(电场矢量方向平行于金属线栅)和 TM 模式(电场矢量方向垂直于金属线栅)如图 1 所示。

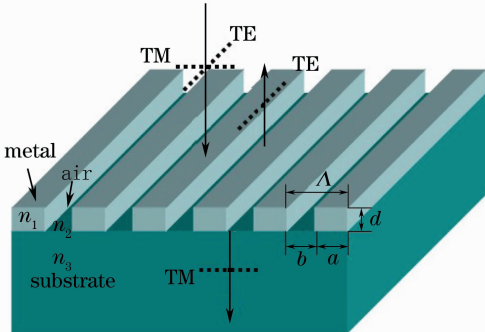


图 1 金属线栅偏振检测器结构及原理图

Fig. 1 Scheme and working principle of a WMG polarizer

根据有效介质理论得到等效介质介电常数为^[10]

对于 TE 模

$$\epsilon_{TE} = \bar{\epsilon} \left[1 + \frac{a^2 b^2}{12 \Lambda^2} \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 (n_1^2 - n_2^2) \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\bar{\epsilon}} \right], \quad (1)$$

对于 TM 模

$$\epsilon_{TM} = \bar{\epsilon} \left[1 + \frac{a^2 b^2}{12 \Lambda^2} \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \frac{\bar{\epsilon}^2 \tilde{\epsilon}_2^2}{\epsilon_1^2 \epsilon_2^2} (n_1^2 - n_2^2) \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\bar{\epsilon}} \right], \quad (2)$$

(1),(2)式中

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{\Lambda} (a \epsilon_1 + b \epsilon_2), \quad \frac{1}{\bar{\epsilon}} = \frac{1}{\Lambda} \left(\frac{a}{\epsilon_1} + \frac{b}{\epsilon_2} \right),$$

$$n_1 = \sqrt{\epsilon_1 \mu_0}, \quad n_2 = \sqrt{\epsilon_2 \mu_0},$$

式中 a 和 b 是金属线栅中两种介质的厚度, ϵ_1 和 ϵ_2 分别为其介电常数。 ω 是两个介质在真空中的磁导率。 c 是光在真空中的传播速度。可见,金属线栅可看作具有固定等效介电常数的薄膜。

根据多光束干涉理论^[11],可以计算得到通过金属线栅的入射光的透过率和反射率。图 2 为相对于不同入射光波长得到的通过金属线栅的光的透射光功率和反射光功率的模拟计算结果。模拟计算中假设金属线栅的金属为金,周期设为 200 nm。金属线栅的厚度为 100 nm, 占空比为 0.5。金属线栅加工在光纤的纤芯端面, 折射率为 1.47。如图 2 所示,对于 TE 模式,大部分光被金属线栅反射掉了,而对于 TM 模式,大部分的光都透过金属线栅。可见,偏振方向平行于线栅方向的入射光近乎全部被反射,而偏振方向垂直于线栅方向的入射光近乎全部能透射。由此形成对于入射、反射偏振光的检偏功能。

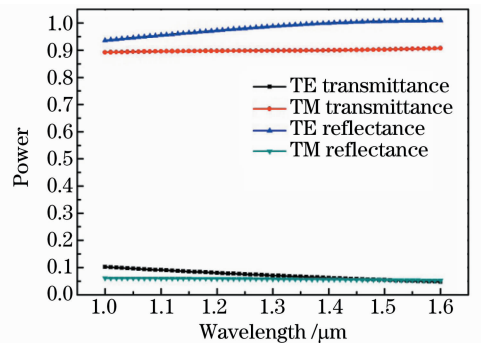


图 2 TE 模式和 TM 模式的透射和反射

Fig. 2 Transmission and reflection power of TE mode and TM mode

3 实验和结果

3.1 金属线栅的加工工艺

起关键核心作用的光纤端面金属线栅制作方法如下,用光纤切割刀切割单模光纤以获得平整的光纤端面,并用溅射法在光纤端面镀 $0.07 \mu\text{m}$ 厚的金(Au)膜。利用聚焦离子束刻蚀系统(Strata FIB 201, FEI 公司, 30 keV 镱离子源), 7 pA 束流的条件下,用聚焦镱离子束溅射掉光纤端面目标区域的金

属膜层,从而在光纤的纤芯处获得面积为 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$, 周期为 $0.2 \mu\text{m}$, 占空比为 0.5 的金线栅。图 3 所示为金属线栅的扫描电子显微镜(SEM)照片,图 3(b)中的大圆即为平整光纤端面,中央浅色正方形即为制作有金属纳米线栅的区域,图 3(a)为该区域的放大图,从中可以清楚地看到周期为 200 nm 的线栅结构。

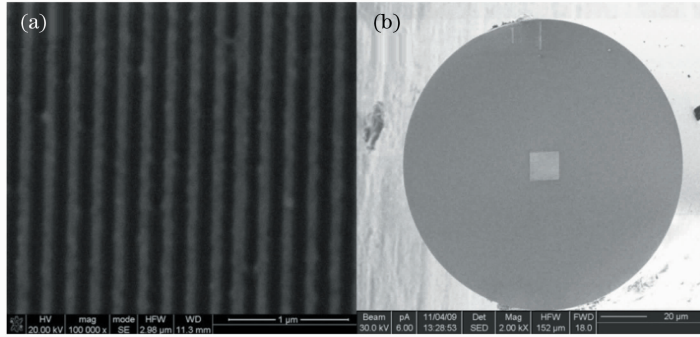


图 3 光纤端面金属纳米线栅 SEM 结构图。(a) 金属线栅周期为 200 nm ; (b) 金属线栅结构位于光纤端面纤芯处
Fig. 3 Scanning electron photomicrographs of the Au grating on tip of a fiber. (a) Grating with a period of 200 nm ; (b) tip with the grating structure covering the core area

3.2 将金属线栅结构运用于光纤压力传感器的实验

图 4 所示为将金属线栅结构运用于光纤压力传感器的实验光路原理图,这是一个全光纤的光路。可调谐激光器发出的 1550 nm 的光通过一个光偏振器和压力传感单元进入到环路器中的第一端口。环路器第三端口通过光纤直接连接第二光功率计,

入射光通过环形器第一端口至光纤环形器的第二端口,连接第二端口的光纤尾部纤芯加工了金属线栅结构(图 3 中红色标注部位,彩图见电子版),通过一个光纤耦合 V 形槽耦合入一段光纤到第一光功率计。可见,透射光通过光功率计 1 测量光强 I_t , 反射光通过光功率计 2 测量光强 I_r 。

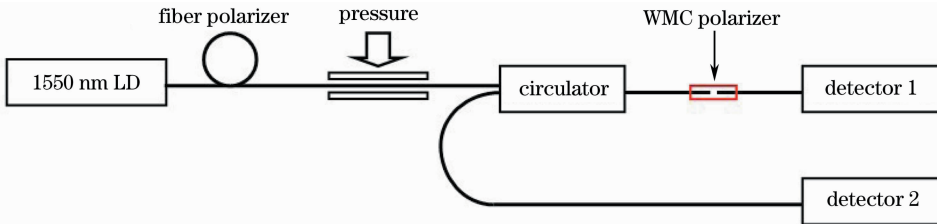


图 4 演示金属线栅偏振检测器和压力传感的实验装置

Fig. 4 Experimental setup to demonstrate the WMG polarizer and pressure sensor

在进行压力传感实验之前,进行金属线栅检偏功能的实验。调节光纤偏振器从而改变透射光的偏振性。实验测得反射光和透射光的消光比分别为 13.7 dB 和 4.87 dB 。可见反射光的消光比比透射光的消光比要大。通过改善金属线栅的规整性和选择更合适的工艺参数,比如厚度、周期、占空比等,可以改善金属线栅结构的检偏功能。尽管金属线栅加工工艺有待进一步完善,但其性能已符合本实验的要求。

将光纤偏振器和环路器之间的光纤卷曲成环

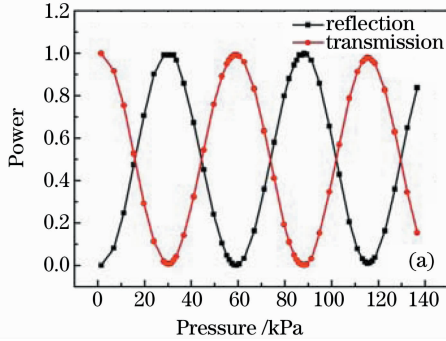
状,夹在两块 $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ 的玻璃之间。光纤环与上下两块玻璃直接接触。逐渐在上层玻璃上加重量。因为与玻璃接触的光纤的面积为 $2lr$ (l 是光纤环的长度, r 是光纤半径),所以作用在光纤纤芯的压强为

$$P = Mg/2lr, \quad (3)$$

式中 P 是作用于光纤纤芯的压强, M 是上层玻璃所加质量。

图 5 为压力传感的实验结果。根据弹光效应,作用于光纤纤芯的压力导致光纤中产生双折射效

应,于是 TE 模式和 TM 模式之间产生了一个相移。这样,便导致测得的反射光和透射光光强的变化,如图 5(a)所示。当没有压力时,被金属线栅偏振检测



器反射的光功率为 0。当所加压力变强时,测得的透射光和反射光的光强分别变大和变小,变化趋势均构成正弦曲线的形式。

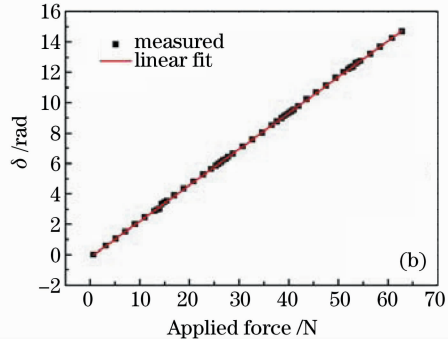


图 5 (a) 反射光和透射光光强随压力的变化; (b) 相延迟随所加压力的变化(实线为最佳线性拟合曲线)

Fig. 5 (a) Variation of reflection and transmission power with pressure; (b) measured phase retardation as a function of the applied force (the solid line is the best-fit curve)

根据弹光效应的相关公式,可推导出加在光纤上的压力导致的 TE 模式和 TM 模式之间相移的大小:

$$\delta = \arccos \frac{I_r - I_t}{I_r + I_t}, \quad (4)$$

式中 δ 是相移, I_r 和 I_t 分别是反射光和透射光的光强。图 5(b) 显示了经计算得到的相移和所加压力之间的关系。可见,两者具有很好的线性关系。经最佳线性拟合曲线计算得到压力传感的灵敏度为 0.237 rad/N。

3.3 将金属线栅结构运用于光纤电流传感器的实验

本光纤电流传感器所使用基本传感原理是法拉第磁光效应。图 6 所示为该全光纤电流传感系统工作原理图,具体如下:首先半导体激光光源产生波长为 1550 nm 的红外信号光输入到普通单模光纤中,该信号光经过光纤偏振器调整输入光的偏振特性,然后输入到导线环/光纤环绕制的电流传感头,反射端加入法拉第旋转镜面使反射光相对于入射光轴向旋转 90°,以消除光纤环中的固有双折射、应力双折射等不利因素。环路器 1 用于收集由传感头端反射而来的信号光,再输入环路器 2。信号光经过环路器 2

器 2 入射到光纤端面的金属纳米线栅上,线栅透射光由光功率计 1 测量,线栅反射光由环路器 2 收集再输入到光功率计 2 上测量。两个光功率计的测量值进行外差计算。当感应单元上导线中的电流发生变化时,引起光纤周围磁场的变化,从而再引起光纤中传输光偏振态的变化,偏振态的变化在光纤端面金属纳米线栅上得到全光纤外差检偏。

传感单元光纤环有 420 圈,导线环有 60 圈。光纤中电流变化范围为 0~10 A,所以等效电流变化范围为 0~600 A。透射光通过一个光纤耦合 V 形槽耦合入一段光纤测量光强 I_t ,反射光通过一个光纤环路器引入另一段光纤测量光强 I_r ,透射光光强 $I_t = I_0 \sin^2(\delta/2)$,反射光光强 $I_r = I_0 \cos^2(\delta/2)$, I_0 为射偏振光的光强。经过信号处理得到外差结果 $S = \frac{I_t - I_r}{I_t + I_r} = \cos\delta$,即最终结果只与电流变化引起的光相位差 δ 有关,与实验无关的诸如光源波动、环境温度变化、微弱机械振动等不利因素皆可排除。

图 7 所示为电流传感曲线。可见,经计算得到

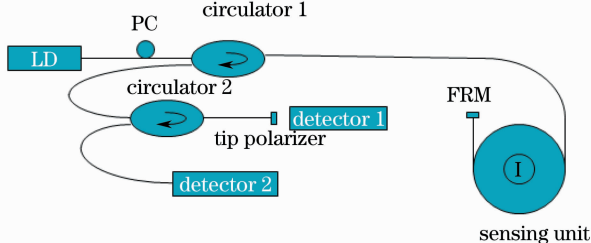


图 6 全光纤电流传感系统原理图

Fig. 6 Schematic diagram of all fiber current sensor system

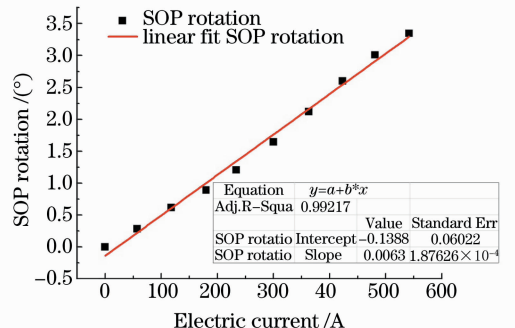


图 7 偏振面旋转角度与电流的关系

Fig. 7 Relation of SOP rotation and applied current

的偏振角度(SOP)与电流大小成很好的线性变化关系,灵敏度达到 $0.06022^{\circ}/\text{A}$ 。本电流传感器理论上最小检测限为 1 mA 。

4 结 论

设计了加工在光纤端面纤芯处的金属线栅偏振控制器,并将该金属线栅偏振控制器用于压力传感器和电流传感器的光路中。由此制作的这两种传感器均实现了无任何分立元件的全光纤传感。

参 考 文 献

- 1 R. C. Jorgenson, S. S. Yee. A fiber-optic chemical sensor based on surface plasmon resonance[J]. *Sensor Actuat. B: Chem.*, 2003, **12**(3): 213~220
- 2 A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1442~1463
- 3 J. Feng, Y. Zhao, S. S. Li *et al.*. Fiber-optical pressure sensor based on tunable liquid crystal technology[J]. *IEEE Photon. J.*, 2010, **2**(3): 292~298

- 4 A. Enokihara, M. Izutsu, T. Sueta. Optical fiber sensors using the method of polarization-rotated reflection[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1987, **5**(11): 1584~1590
- 5 J. B. Young, H. A. Graham, E. W. Peterson. Wire grid infrared polarizer[J]. *Appl. Opt.*, 1965, **4**(8): 1023~1026
- 6 J. J. Wang, W. Zhang, X. Deng *et al.*. High-performance nanowire-grid polarizers[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(2): 195~197
- 7 Liang Zhang, Changfang Li, Jing Li *et al.*. Design and fabrication of metal-wire nanograting used as polarizing beam splitter in optical telecommunication [J]. *J. Optoelectronics Advanced Materials*, 2006, **8**(2): 847~850
- 8 M. Hass, M. O' Hara. Sheet infrared transmission polarizers [J]. *Appl. Opt.*, 1965, **4**(8): 1027~1031
- 9 Kang Guoguo, Tan Qiaofeng, Chen Weili *et al.*. Design and fabrication of sub-wavelength metal wire-grid and its application to experimental study of polarimetric imaging[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(1): 014218
康果果, 谭峤峰, 陈伟力等. 亚波长金属线栅的设计、制备及偏振成像实验研究[J]. *物理学报*, 2011, **60**(1): 014218
- 10 E. Hecht. Optics[M]. San Francisco: Addison Wesley, 2002. 320~325
- 11 W. B. Spillman. Multimode fiber-optic pressure sensor based on the photoelastic effect[J]. *Opt. Lett.*, 1982, **7**(8): 388~390

栏目编辑: 殷建芳