

## 综合评述

## 光纤应变传感器的研究现状与发展

毕卫红

(燕山大学光电子工程系, 秦皇岛 066004)

**提 要** 对光纤应变传感器的研究现状与发展进行综述; 并对它的未来发展提出了作者的看法和分析。对各种传感器的特点、最新研究成果给出较详细的报导。

**关键词** 光纤, 应变, 传感器

## 1 引言

光纤应变传感器是自 70 年代起随光纤通讯及光纤传感等相关技术发展而飞速发展的新型传感器。光纤传感器与传统的传感器相比主要差别在于: 传统的传感器是以应变-电量为基础, 以电信号为转换及传输的载体, 用导线传输电信号, 因而使用时受到环境的限制, 如环境湿度太大可能引起短路, 特别是高温和易燃、易爆环境中易引起火灾等等。光纤应变传感器是以光信号为变换和传输的载体, 利用光纤传输信号。它的优点是: 1) 光纤是由石英玻璃制成的, 是一种介质、绝缘体, 且耐高压、耐腐蚀, 能在易燃易爆的环境下可靠运行; 2) 光纤为无源器件, 对被测对象不产生影响; 3) 光纤体积小, 重量轻, 可做成任意形状的传感器阵列; 4) 光纤传感器的载体是光, 其频率数量级为  $10^{14}$  Hz, 从而使传感器频带范围很宽, 动态范围很大, 且不受电磁场干扰; 5) 具有极高的灵敏度和分辨率, 这是普通传感器所无法比拟的。

因此, 越来越多的学者投入到它的研究中来, 每年都有大量文章发表, 光纤传感器结构众多, 形式各异。本文作者主要从光纤应变传感器信号调制的角度对各种光纤应变传感器进行综述。

## 2 光纤应变传感器分类

光纤应变传感器可从光纤的作用、信号调制方式及被测对象等不同角度分类。从光纤作用角度可分为非功能型传感器和功能型传感器<sup>[1~3]</sup>。非功能型传感器中光纤仅起到传光的作用; 而功能型传感器中光纤既起到传光的作用又起到传感的作用。目前开发的高精度、高分辨率及结构小型化的传感器多以功能型传感器为主。若从光信号调制方式角度分类, 则有光强调制型、相位调制型及偏振调制型。其中光强调制型在一般工程测量中因结构简单、测量范围大而应用较广。而在对测量精度要求较高的场所则采用相位和偏振调制。随着科学技术的高速发展, 对传感器的精度、稳定性及小型化的要求越来越高。因此相位调制型及偏振调制型传感器是目前研究和开发的主要对象。

相位调制型传感器主要是利用光干涉原

理来完成信号的检测。由于测试装置的结构和原理不同,相位调制型传感器又有迈克尔逊干涉型、马赫-陈德尔干涉型及法布里-珀罗干涉型传感器,此外还有利用相位关系检测的布拉格光栅型、模间干涉型等。这些传感器各具特色,发展到今天已开始进入实用研究阶段。

### 3 各种光纤应变传感器工作原理及研究状况

#### 3.1 光强调制型光纤应变传感器

光强调制型光纤应变传感器具有结构简单,易于实现等优点。常用的类型有微弯型<sup>[4,5]</sup>和蚀刻光纤型<sup>[6,7]</sup>。微弯型光纤应变传感器(图 1)在无应变的情况下,光纤输出端光强为一常量;当外力作用时,被测对象产生应变,光纤的弯曲状况发生变化,光在光纤中传输所经过的路程和入射角发生变化,则光传输时的损耗也发生变化。例如图 1,当被测面发生正向应变(被测表面伸长)时,光纤的弯曲弧度变小,光的入射角变小,光功率的损耗变小;反之,当被测面发生负向应变(被测表面缩短)时,光纤的弯曲弧度变大,光的入射角变大,光功率的损耗变大。由此可测量应变的大小和方向。而对于蚀刻型光纤应变传感器(如图 2 所示),当外力作用在蚀刻后的多模光纤上时,光纤长度的变化将引起折射率和模量系数的变化,进而将引起功耗的变

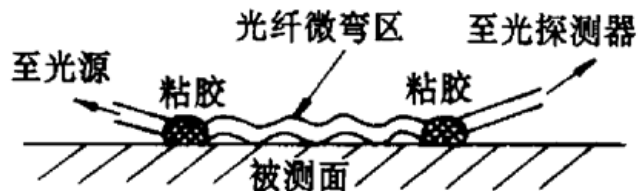


图 1 微弯型光纤应变传感器

化,此变化大于未蚀刻光纤功耗的变化,且蚀刻得越深,功耗越大。文献[6]的实验结果表明:应变与功耗成正比,应变的灵敏度与蚀刻深度成正比。目前,光强调制型传感器的最大

测量范围为  $3000 \mu\epsilon$ <sup>[4]</sup>,最高分辨率为  $25 \mu\epsilon$ <sup>[6]</sup>。

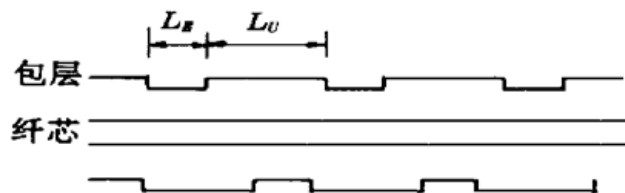


图 2 蚀刻型光纤应变传感器

#### 3.2 相位调制型光纤应变传感器

##### 3.2.1 迈克尔逊干涉型光纤应变传感器

迈克尔逊光纤应变传感器的原理结构如图 3 所示<sup>[8]</sup>,光源  $S$  发出的光经分光镜后分成两路,一路经透镜  $L_2$  耦合进入光纤构成参考光,另一路经透镜  $L_1$  耦合进入光纤构成信

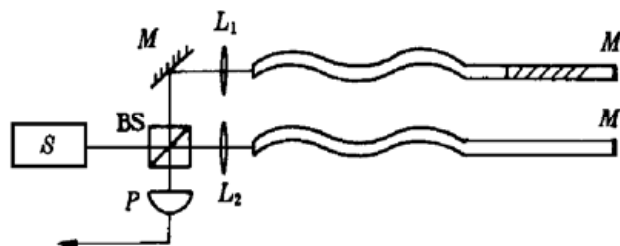


图 3 迈克尔逊光纤应变传感器结构

号光,被测表面变形使传感光纤长度发生变化,则光在光纤内部传输时的相位发生变化。光纤的端部均镀有反射膜,两束光被反射后反向传输,当它们相遇时发生干涉,干涉光的相位差由被测面的应变决定,即干涉光强分布受被测面应变的调制。干涉光信号经光电管接收转换成电信号。根据光强变化可知应变的大小。这种传感器的特点其一是信号光纤与参考光纤在同一环境中,因此基本上不受环境的干扰;其二是光的发射与接收在同一侧,属单端操作。使用时可放在被测体的内部形成智能材料<sup>[9]</sup>,也可放在被测体的外部<sup>[10]</sup>,如图 4 所示。此传感器目前最大的测量范围达  $1500 \mu\epsilon$ <sup>[9]</sup>,最高分辨率达  $2 \mu\epsilon$ 。这种传感器在制作时的难题是如何保证两束光的强度相等。



图 4 光纤在被测环境中 (a) 在被测体内部; (b) 在被测体外部

### 3.2.2 马赫-陈德尔光纤应变传感器

马赫-陈德尔光纤应变传感器与迈克尔逊干涉型结构相似<sup>[11,12]</sup>, 都是由两根光纤(双臂)——信号光纤和参考光纤组成, 如图 5 所示。光源发出光后经光纤耦合器 1 分两路至参考光纤和信号光纤。信号光纤中的光信号在传输过程中受被测信号调制成为信号光; 参考光纤的光不经过调制直接作为参考光。两束光再次相遇时发生干涉形成干涉光, 此干涉光经光电转换变为与被测信号成比例的电信号。马赫-陈德尔型与迈克尔逊干涉型不同点在于: 1) 信号光纤在被测环境中, 而参考光纤在其它环境中<sup>[12]</sup>, 如图 5 所示; 2) 光的发射与接收在传感器的两端, 属双端操作。这种传感器于 80 年代被广泛研究。其最大测量范围为  $1200 \mu\epsilon$ , 最高分辨率为  $2 \mu\epsilon$ <sup>[12]</sup>。研究结果表明这种应变传感器的优点是灵敏度高, 且由于它提供了两个输出信号, 从而能避免向激光腔的光反馈。但它也具有两个缺点, 其一是它所用结构的光纤较多, 使

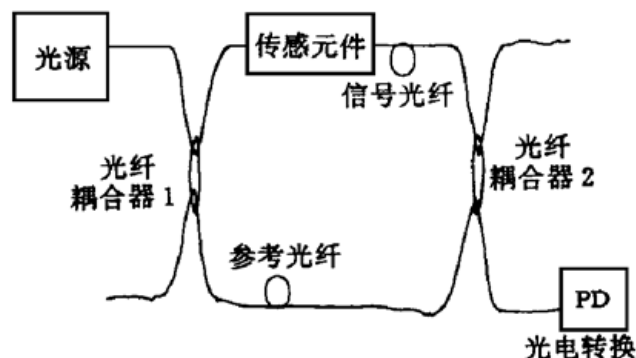


图 5 马赫-陈德尔光纤应变传感器的原理结构

用及安装都较麻烦; 其二是它需要一参考臂,

而一般情况下它不和测量光纤安装在同一位置, 这就使得输入输出臂不对称, 从而导致测量的不稳定。环境对这种应变传感器影响较大, 限制了它的应用。90 年代随着研究的不断深入, 涌现出多种衍生物, 如利用光在双折射单模光纤的快慢轴上传输速度不同的原理构成传感器。典型结构如图 6 所示<sup>[13]</sup>。它使用了一对双折射单模光纤, 当一束正交线性偏振的频率子波分两路射入信号光纤和参考光纤时, 信号臂中  $\omega_1$  和  $\omega_2$  子波相位被应变量的

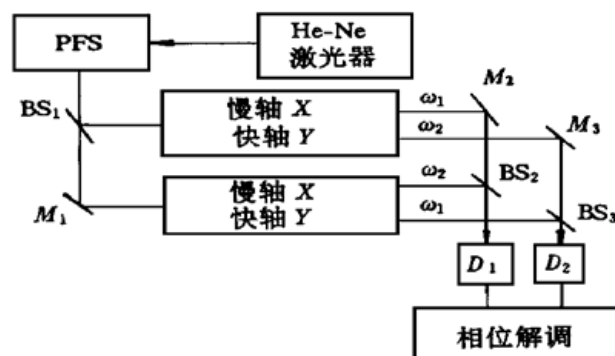


图 6 改进型应变传感器的原理结构

调制。调制后沿信号光纤快轴传输的  $\omega_2$  子波在光电检测器( $D_1$ )处与参考臂中沿快轴传输的  $\omega_1$  子波进行光学差拍, 同时信号臂中沿慢轴传输的  $\omega_1$  子波与参考臂中沿慢轴传输的  $\omega_2$  子波在另一光电检测器( $D_2$ )处差拍, 两差拍电流又被送入相位解调器, 进而得到被测量的变化规律。这种传感器中两光纤除测试点外的任何地方都粘在一起, 从而使环境中的温度、湿度及其它非测量干扰对两光纤的影响一致, 并在  $D_1$  和  $D_2$  处抵消掉了, 其灵敏度较单个马赫-陈德尔干涉型光纤应变传

传感器的灵敏度高 6 倍。其缺点是光路中增加了一个偏振频率移动器(产生二频率的偏振光)、几个分光镜和反射镜,这不但增加了系统的复杂度和造价,也增加了光路调整的难度。

### 3.2.3 法布里-珀罗光纤应变传感器

法布里-珀罗光纤应变传感器的特点是采用单根光纤利用多束光干涉来检测应变。它避免了前两种传感器需双根光纤配对的问题,且比迈克尔逊型更适合于低频率应变信号的测量。因此,这种传感器从 80 年代诞生至今一直是主要的开发和研究对象<sup>[14,15]</sup>。法布里-珀罗型应变仪可分为内、外两种。图 7,

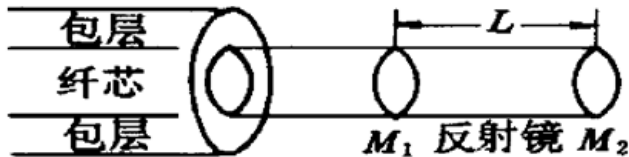


图 7 内法布里-珀罗腔应变传感器

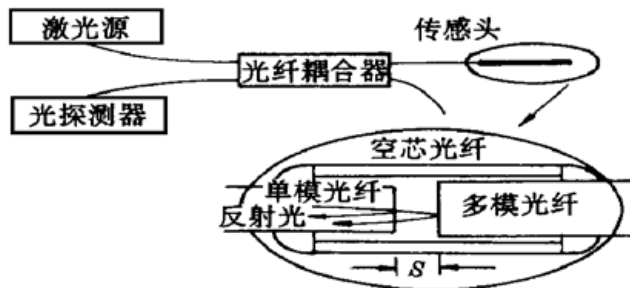


图 8 外法布里-珀罗腔应变传感器

8 所示为其原理图。当光纤中的光遇到两反射镜后分别产生两束反射光(幅度分别为  $A_1, A_2$ ), 这两束反射光相遇后产生干涉。干涉腔腔长由于应变而发生变化, 两反射光的相位差( $\Delta\phi$ )也随之变化, 光电探测器接收到的光强为

$$I_{\text{det}} = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\Delta\phi)$$

由于  $\phi = knL$ , 则

$$\frac{\Delta\phi}{\phi} = \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta k}{k} \approx \frac{\Delta L}{L}$$

因此, 光电探测器输出的电信号随应变的变化而变化。

这种传感器充分体现了光纤质轻、易变形的特点, 因此适合于疲劳度测量<sup>[16]</sup>、悬梁弯曲应变测量<sup>[17]</sup>和构成智能材料<sup>[18]</sup>等应用。随着研究的不断深入, 近年来又出现了双法布里-珀罗腔应变测量<sup>[19]</sup>, 如图 9 所示。它可以方便地测量加载方向, 具有实用价值。为了简化结构, 减少造价, 在光源选择上由气体激光器→半导体激光器→白光<sup>[20,21]</sup>, 从而使法布里-珀罗干涉应变传感器既减少体积又减

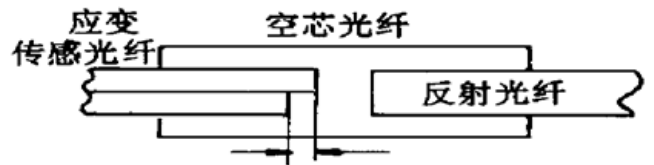


图 9 双法布里-珀罗腔应变传感器结构

少成本, 在实用上更具有实际意义。这类应变传感器的缺点是制作工艺难度较大, 如光纤端面镀反射镜的加工, 传感头中带有反射镜的光纤与光纤的连接等问题目前还无文献详述。尽管如此, 它们仍是最有希望被广泛应用的光纤应变传感器。

### 3.2.4 布拉格光栅型光纤应变传感器

光纤布拉格光栅的制作与应用是近年研究的热点。光纤布拉格光栅是在长度上应用特殊技术制作成纤芯折射率周期变化的一段光纤。当光通过光栅时, 由于纤芯折射率的周期性变化而产生反射。一般来说, 除了满足布拉格波长条件的入射光外, 其它光波均被滤掉。光栅的布拉格波长为<sup>[22]</sup>

$$\lambda_B = 2n_e\Lambda$$

式中  $\Lambda$  为折射率变化的周期,  $n_e$  为纤芯的有效折射率。当  $\Lambda$  和  $n_e$  中任一发生变化时都将引起光栅波长的移动, 即

$$\begin{aligned}\Delta\lambda_B &= 2\Lambda(\Delta n_e + n_e \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda}) \\ &= 2\Lambda n_e \left[ \frac{\Delta n_e}{n_e} + \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} \right] \\ &= \lambda_B \left[ \frac{\Delta n_e}{n_e} + \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} \right]\end{aligned}$$

由上式可知, 当光纤长度产生应变时, 将产生

$\Delta$  和  $n_e$  的变化,通过测  $\Delta\lambda_B$  的变化可得待测应变变量。利用布拉格光栅测应变的结构如图 10 所示<sup>[23]</sup>。在低频应变扰动下应变的分辨率

为  $0.006 \mu\epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$ , 文献[24]应变的测量范围与分辨率的比为 1250:1。

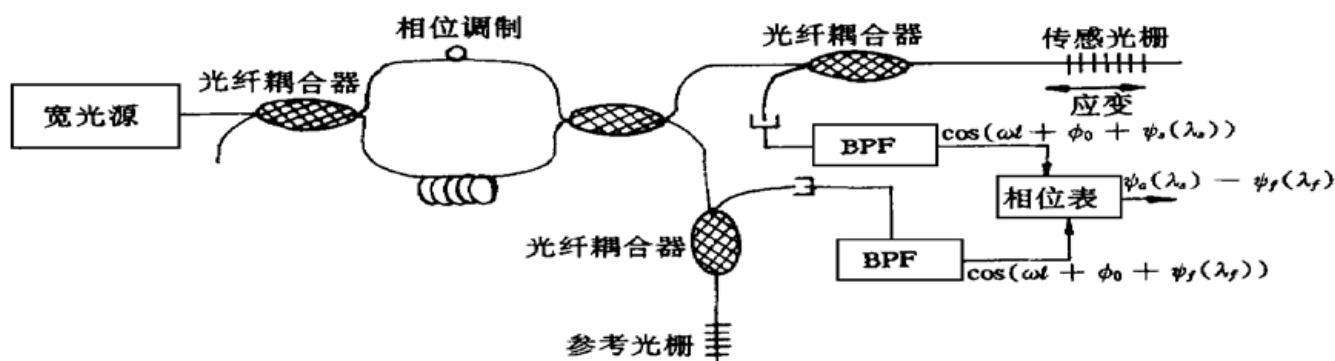


图 10 布拉格光栅型光纤传感器测应变结构框图

### 3.2.5 模间干涉型光纤应变传感器

模间干涉型光纤应变传感器是近几年出现的新型传感器<sup>[25,26]</sup>,它利用光纤中不同模式的光信号因传播速度不同而产生相位差的原理来实现被测信号的检测。设两个不同模式的传播常数分别为  $\beta_u$  和  $\beta_v$ ,传播常数之差为  $\beta_{uv}$ ,则光通过长为  $L$  的光纤后相位差为

$$\phi_{uv} = \beta_{uv}L$$

模间相位差的变化为

$$\Delta\phi_{uv} = \beta_{uv} \cdot \Delta L + L \cdot \Delta\beta_{uv}$$

典型的结构如图 11 所示<sup>[27]</sup>。它的特点是仅需要一根光纤,光路简单,对光源的要求不高,但这种传感器需要的电信号处理电路比较复杂,要求在多种信号中选出所需的信号<sup>[28]</sup>。

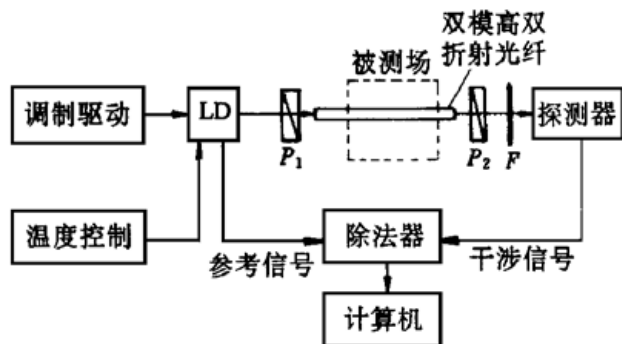


图 11 模间干涉型光纤应变传感系统

### 3.3 偏振调制型光纤应变传感器

偏振型应变传感器能较好地克服马赫-

陈德尔干涉型应变仪的缺点。应变传感器中的偏振调制主要是采用光弹效应和光纤的双折射。根据关系式

$$\Delta\phi = B\Delta L + L\Delta B$$

完成应变测量<sup>[29,30]</sup>。这里  $\phi$  是偏振光的相位,  $\beta$  是给定模在光纤中的传播常数,  $L$  是光纤测量部分的长度。图 12 为偏振型应变传感器

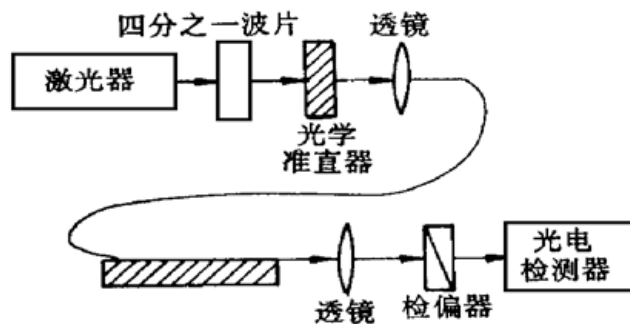


图 12 偏振型光纤应变传感器

的原理图,激光发出的线偏振光经准直器和四分之一波片后成为圆偏振光,再经透镜聚光后进入光纤。光纤的测量部分与被测面相连(一般采用粘贴或埋入结构)。由光弹理论知道,作用在光纤上的应变将改变光纤芯的折射率,从而改变光纤中输出的圆偏振光的偏振方向。这样,被测对象的应变将使检偏器处光波的偏振方向变化  $\Delta\phi$ ,而且可以推得  $\Delta\phi$  和  $\epsilon$  为线性关系。而检偏镜的输出为  $I = I_0 \cos\Delta\phi$ 。这里  $I_0$  为光纤的输出光强最大值。

显然光电检测的输出和结构的应变为余弦关系,这种应变传感器的最大测量范围为 1200  $\mu\epsilon$ ,分辨率为 5  $\mu\epsilon$ <sup>[31]</sup>。

## 4 光纤应变传感器的发展趋势

近年来,光纤应变传感器虽然每年都有大量的文章报导,但多数还处于实验室研究中。随着科学技术的飞速发展,电子与通讯产品向高精度、小型化发展,对传感器提出了更高的要求。因此光纤应变传感器的发展趋势为:1. 全光纤小型化;2. 多参量智能化;3. 高精度实用化。

**全光纤小型化** 使传感头全由光纤构成且只用一根光纤已成为发展趋势。全光纤传感头的体积小<sup>[32]</sup>且工作可靠。目前光纤之间的熔接损耗为 0.1 dB 左右,这样的损耗不影响传感头的正常工作。但目前光纤之间的粘接技术及光纤端面抛光、镀膜等相关技术等还有待进一步研究。

**多参量智能化** 一个传感器同时测多个参量既减少测量装置的元件,又提高测量精度,为此近年来多参量传感器的研究倍受关注<sup>[33~35]</sup>,很有发展前途。且各种参量的准确分离与提取是其技术关键。

**高精度实用化** 高精度传感器是科学技术发展的需要,实用是研究的目的。光纤传感器在研究过程中各组成元件都线性理想化,与实际有一定的差距。为此,光通道中的非线性及误差的研究<sup>[36~38]</sup>是传感器进入实用阶段的基础。以白光为光源的模间干涉型配以先进的信号处理技术在保证精度的同时既降低成本又延长使用寿命,但在这种传感器中如何提取相关信息的信号处理技术有待进一步研究和完善。

## 参 考 文 献

- 1 贾伯年等, 传感器技术. 南京: 东南大学出版社, 1994: 2~ 4
- 2 史锦珊, 郑绳植编, 光电子学及其应用. 北京: 机械工

- 业出版社, 1991, 1~ 5
- 3 强锡富编, 传感器. 北京: 机械工业出版社, 1993, 3~ 5
- 4 Jonathan D. Weiss, Fiber-Optic Strain Gauge. *Journal of Lightwave Technology*, 1989, 7(9): 1308 ~ 1318
- 5 Wang Huiwen *et al.*, Strain Measurement and Cure Monitoring in Thin Plates of Composite Materials by Using Twisted Optical Fibers. *SPIE*, 1996, 2895: 355 ~ 360
- 6 Yang Jianliang *et al.*, Etched Fiber-Optic Strain Sensor. *SPIE*, 1996, 2895: 408~ 414
- 7 Zha Kaide *et al.*, Experimental Study of Measuring Strain by Fiber-Optic Sensor Used in Civil Engineering Structure. *SPIE*, 1996, 2895: 376~ 383
- 8 M. Martinelli *et al.*, Fiber-Optic Interferometric Detection of Slow Phenomena. *SPIE*, 1985, 586 (Fiber Optic Sensor): 104~ 108
- 9 Valis Tomas *et al.*, Passive-quadrature demodulated localized-Michelson fiber-optic strain sensor embedded in composite materials. *Journal of Lightwave Technology*, 1991, 9(4): 535~ 544
- 10 Norbert Furstennau *et al.*, Fiber-Optic Interferometric Strain Gauge Producing Asymmetric Fringes by Using Nonlinear Feedback. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1995, 31(8): 1461~ 1464
- 11 Shojiro Nemoto, Akio Yoshizawa, Fiber-interferometric Measurement of the heat-transfer Coefficient of a Plate. *Applied Optics*, 1992, 31(4): 429~ 431
- 12 Donal Flavin A. *et al.*, Interferometric fiber-optic sensing based on the modulation of group delay and first order dispersion: application to strain-temperature measurand. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, 13(7): 1314~ 1323
- 13 Tanaka Satoshi *et al.*, Fiber-optic strain sensor using a dual Mach-Zehnder interferometric configuration. *Optics Communications*, 1991, 81(5): 267~ 272
- 14 J. Sirkis *et al.*, In-line fiber etalon (ILFE) fiber-optic strain sensors. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, 13(7): 1256~ 1263
- 15 Bernd D. Zimmermann *et al.*, Fiber-Optic Sensors Using High-Resolution Optical Time Domain Instrumentation Systems. *Journal of Lightwave Technology*, 1990, 8(9): 1273~ 1277



- 16 Kent A. Murohy *et al.*, Fabry-Perot fiber-optic sensor in full-scale fatigue testing on an F-15 aircraft. *Applied Optics*, 1992, **31**(4): 431~ 433
- 17 R. Kist *et al.*, The Fiber Fabry-Perot and its Applications as a Fiber-Optic Sensor Element. *SPIE*, 1985, **586**(Fiber Optic Sensors): 126~ 133
- 18 S. F. Masri *et al.*, Experimental study of embedded fiber-optic strain gauges in concrete structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 1994, **20**(8): 1696 ~ 1717
- 19 A. A. Chtcherbakov *et al.*, Long Dual-Cavity Fiber Optic Fabry-Perot Strain Sensor with Rugate Mirrors. *Optics Engineer*, 1996, **35**(4): 1059~ 1063
- 20 Belleville Claude *et al.*, White-light interferometric multimode fiber-optic strain sensor. *Optics Letters*, 1993, **18**(1): 78~ 80
- 21 Chang Chiachen *et al.*, Multiplexed Optical Fiber Sensor using a Single Fabry-Perot Resonator for Phase Modulation. *Journal of Lightwave Technology*, 1996, **14**(7): 1653~ 1663
- 22 Pan Wei *et al.*, Fiber Bragg grating strain sensor for Smart Structures. *SPIE*, 1996, **2895**: 166~ 170
- 23 A. D. Kersey, T. A. Berkoff, Fiber-optic Bragg grating strain sensor with drift-compensated high-resolution interferometric wavelength-shift detection. *Optics Letters*, 1993, **18**(1): 72~ 74
- 24 A. B. Lobo Ribeiro, Time-and-spatial-multiplexing tree topology for fiber-optic Bragg-grating sensors with interferometric wavelength-shift detection. *Applied Optics*, 1996, **35**(13): 2267~ 2273
- 25 A. M. Vengsarkar *et al.*, Fiber-optic dual-technique sensor for simultaneous measurement of strain and temperature. *Journal of Lightwave Technology*, 1994, **12**(1): 170~ 177
- 26 Chen Xiufeng *et al.*, Acoustic Strain Effect of Multimode Optic-Fiber Sensor. *SPIE*, 1996, **2895**: 384~ 392
- 27 马铁华, 光纤应变/温度双参量传感器技术研究. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 1996
- 28 W. J. Bock *et al.*, Fiber-optic strain-gauge manometer up to 100 MPa. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1992, **41**(1): 72~ 76
- 29 梁大开等, 埋入式光纤应变传感器. 南京航空航天大学学报, 1994, **26**(6): 842~ 846
- 30 马建军等, 双波长偏振干涉型应变与温度同时测量的光纤传感器. 光学学报, 1998, **18**(3): 361~ 364
- 31 V. Gusmeroli *et al.*, Polarimetric nonincremental fiber-optic strain-gauge. *Optics Communications*, 1994, **105**(5-6): 359~ 366
- 32 Wang Anbo *et al.*, Split-spectrum intensity-based optical fiber sensor for measurement of micro-displacement, strain, and pressure. *Applied Optics*, 1996, **35**(15): 2595~ 2601
- 33 W. C. Michie *et al.*, Fiber-optic technique for simultaneous measurement of strain and temperature variations in composite materials. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, USA*, **1588**: 342~ 355
- 34 Nadarajah Narendran *et al.*, High temperature fiber-optic strain and temperature sensor for structural health monitoring. *Instrumentation, Control and Automation in the Power Industry. Proceedings Instrument Society of America*, Research Triangle Park, NC, USA. 1995, **38**: 273~ 282
- 35 Mitsuru Kihara *et al.*, Return Loss Characteristics of Optical Fiber Connectors. *Journal of Lightwave Technology*, 1996, **14**(9): 1986~ 1991
- 36 Zhang Kuiwei *et al.*, A Fiber Optic for the Measurement of Surface Roughness and Displacement Using Artificial Neural Networks. *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 1997, **46**(4): 899 ~ 902
- 37 Jin Wei *et al.*, Simultaneous measurement of strain and temperature: error analysis. *Opt. Eng.*, 1997, **36**(2): 598~ 609
- 38 王勇等, 光纤干涉位移传感器相位估计的一种精确方法. 光学技术, 1999, (1): 38~ 43

## Present Status and Development of Research

### on Optical Fiber Strain Sensors

Bi Weihong

(Department of Photonics, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

**Abstract** The present status and development of the research on optical fiber strain

sensors are summarized. The characteristics and the latest research results are reported. The development trend of optical fiber strain sensors is presented.

**Key words** optical fiber, strain, sensor

# 长周期光纤光栅的制作方法和应用研究进展

瞿荣辉<sup>1</sup> 赵浩<sup>2</sup> 方祖捷<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; <sup>2</sup> 上海交通大学光纤所, 上海 200030)

**提 要** 概述了国内外长周期光纤光栅的制作方法、长周期光纤光栅温度应力特性和在通信、传感领域内的广泛应用, 并且对各种制备工艺进行了比较。

**关键词** 长周期光纤光栅, 光纤通信, 传感

## 1 引言

随着新技术的发展, 一大批新型光纤光子学器件因其良好的特性、与光纤系统天然的兼容性, 已经在未来高速率、大容量光纤通信以及传感测量方面显示出广泛的应用前景和极大的开发潜力<sup>[1~3]</sup>。

长周期光纤光栅具有很好的传输谱特性, 它把光纤芯径传输的导模能量耦合到包层中从而导致相应波长的传输损耗, 是一种理想的带阻传输型滤波器, 具有制作工艺简单、插入损耗小、无后向反射、与偏振无关和体积小等优点。由于长周期光纤光栅在光纤通信系统的重要价值和在其它领域的广泛应用前景, 对长周期光纤光栅的开发和应用研究进展十分迅速, 已经成为一大技术热点。

## 2 长周期光纤光栅的光学特性

长周期光纤光栅的周期一般为几百微

米, 它是把芯径中传输的导模(LP<sub>01</sub>) 能量耦合到正向传输的包层模(LP<sub>0m</sub>) 中, 可以用下列耦合模方程来描述<sup>[4]</sup>

$$\begin{aligned}\frac{dA_{01}}{dz} &= ik_{01}^{co-co} A_{01} + i \sum_m k_{0m-01}^{cl-co} \times \\ &\quad A_m \exp(-i2\delta_{0m-01}^{cl-co} z) \\ \frac{dA_m}{dz} &= ik_{0m-01}^{cl-co} A_{01} \exp(2i\delta_{0m-01}^{cl-co} z), \\ \delta_{0m-01}^{cl-co} &= \frac{1}{2}(\beta_{01} - \beta_m^{cl} - \frac{2\pi}{\Lambda})\end{aligned}$$

其中  $\Lambda$  为光栅周期,  $\beta_{01}$  和  $\beta_m^{cl}$  分别是芯径导模和包层模的传播常数,  $k_{01}^{co-co}$  是芯径导模的传播常数,  $k_{0m-01}^{cl-co}$  是第  $m$  阶包层模与芯径导模之间的耦合系数。实现模式之间的转换必须满足相位匹配条件  $\delta_{0m-01}^{cl-co} = 0$ , 可知耦合到第  $m$  阶包层模的波长为

$$\lambda^m = \Lambda(n_{01} - n_{cl}^m)$$

其中  $n_{01}$  和  $n_{cl}^m$  分别是芯径导模和第  $m$  阶包层模的有效折射率。可以看出, 长周期光纤光栅的阻带波长不但取决于光栅周期, 而且还与包层模和芯径导模的折射率差有关系。

## 3 长周期光纤光栅的制作

长周期光纤光栅的制作现在主要有以下