

# 金属化光纤光栅内应力的分析和实验研究

皮浩洋 刘琼 叶青 辛国锋 蔡海文 瞿荣辉 方祖捷

(中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息技术研究中心, 上海 201800)

**摘要** 通过化学镀的方法,在光纤光栅表面得到了不同厚度的均匀金属镍镀层。由于材料热膨胀系数的差异,金属镍镀层将会在光栅内部形成内应力,这种内应力将随着镀层厚度的改变而改变。理论上分析了金属镀层的厚度对光栅中心波长漂移的影响,获得相关的理论曲线;实验上通过对化学镀镍全过程光纤光栅反射光谱的在线监测,获得了不同镀镍层厚度的光纤光栅中心波长的改变量,实验数据与理论分析结果吻合较好。

**关键词** 光纤光栅;金属化;化学镀;内应力

**中图分类号** TP212

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201239.0305008

## Analysis and Experimental Study of Inner Stress for Metallized Fiber Bragg Gratings

Pi Haoyang Liu Qiong Ye Qing Xin Guofeng Cai Haiwen Qu Ronghui Fang Zujie

(Space Laser and Information Technology Research Center, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** By using chemical metallization, nickel layer is coated on the fiber Bragg grating with different thicknesses. The inner stress occurs due to different thermal expanding coefficients between nickel layer and fiber grating layer, which is influenced by metal-film thickness. In this paper, the relationship between the wavelength shift and the thickness of nickel layer is theoretically analyzed. Moreover, the in-situ observation of the fiber grating during electroless plating and the wavelength shift as a function of metal-film thickness are investigated. A good agreement is found between the experimental and calculated results.

**Key words** optic fiber gratings; metallization; electroless plating; inner stress

**OCIS codes** 060.2340; 060.2370

## 1 引言

在近几十年,随着光纤光栅写入技术的不断改进,光纤光栅在光纤传感和光纤通信领域得到越来越多的应用。当作为一种温度或应变传感器件应用时,光纤光栅通常需要通过某种方法集成、封装在基底金属材料中,成为可感知监测结构内部的物理量(例如温度和应变等参数)变化的“光纤智能金属结构”的组成元件<sup>[1~3]</sup>。为使光栅具有埋入金属基底时需要的耐高温性和可焊性,有必要对裸光栅表面进行金属化保护,从而克服各种有机胶的老化对光栅性能的影响。当前,光纤表面金属化有多种方法

可以实现, Lee 等<sup>[4]</sup>最早采用磁控溅射的方法将 TiO<sub>2</sub> 沉积在法布里-珀罗光纤传感器上,再埋入金属基体内。Bartelt 等<sup>[5]</sup>用阴极溅射镀铝的方法在光纤布拉格光栅(FBG)上实现了金属化。Li 等<sup>[6]</sup>采用电磁气相喷镀金属镍或钛,再用电镀增厚镍的方法来获得金属化 FBG。耿健新等<sup>[7]</sup>采用先磁控溅射钛铂金层,再电镀镍来实现光纤光栅的金属化。与其他方法相比,能在相对较低的温度下进行的化学镀,是目前最普遍的实现光纤光栅表面金属化的方法。化学镀具有镀层厚度均匀、镀层外观良好、无需电解设备及附件、能在非金属表面上沉积等优点。

**收稿日期:** 2011-09-27; **收到修改稿日期:** 2011-12-15

**基金项目:** 国家自然科学基金(NSAF 联合)基金(11076028)资助课题。

**作者简介:** 皮浩洋(1982—),女,硕士研究生,工程师,主要从事光电子器件工艺技术方面的研究。

E-mail: hypi@siom.ac.cn

**导师简介:** 辛国锋(1975—),男,副研究员,主要从事半导体光电器件方面的研究。E-mail: gfxin@siom.ac.cn

从工艺复杂程度、成本等角度考虑,化学镀的方法也明显优于其他方法。

镀层的质量和附着的牢固性是金属化光纤的重要性能。由于光纤与表面金属镀层的热膨胀系数不同,化学镀冷却后会产生由于温度变化引起的镀层热应力,这将会对光纤光栅的物理性能产生影响,比如谐振波长的改变。本文对光纤金属镀层的热应力进行了研究,利用弹性理论,研究了杨氏模量、热膨胀系数、泊松比及镀层厚度对光纤光栅谐振波长的影响,获得了金属镀层厚度与谐振波长漂移量的理论结果,实验结果与理论分析吻合良好。

## 2 理论分析

由于石英光纤和金属镀层材料的热膨胀系数不同,金属化光纤存在热应力。金属化一般在一定的高温下进行。化学镀的最佳工艺温度约为85℃,冷却到室温使用时,有50℃左右的温差。由于存在热胀冷缩,而金属镀层的收缩比石英光纤大得多,不可避免地产生了热应力。在镀层粘附牢固的情况下,应力平衡导致光纤受到轴向的压应变,镀层受到轴向的张应变。在横截面方向上,金属镀层和光纤均受到压应变<sup>[8]</sup>。图1是金属化光纤光栅热平衡过程中轴向和径向应变平衡的示意图。

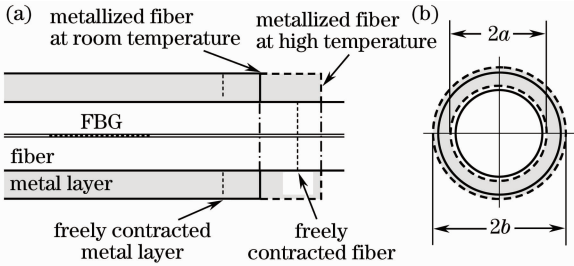


图1 金属化光纤热应变。(a)轴向;(b)径向

Fig.1 Thermally induced strains in metallized fiber.

(a) Axial direction; (b) radical direction

假设金属镀层均匀,即金属化光纤具有轴对称性。考虑到光纤长度远大于直径,可以认为光纤和金属受到环向均匀的正应变;并且切应变可以忽略。应力平衡问题满足柱坐标系下的胡克定律

$$\begin{pmatrix} \epsilon_r \\ \epsilon_\theta \\ \epsilon_z \end{pmatrix} = \frac{1}{E} \begin{pmatrix} 1 & -\nu & -\nu \\ -\nu & 1 & -\nu \\ -\nu & -\nu & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \\ \sigma_z \end{pmatrix}. \quad (1)$$

光纤和金属层的轴向应变分别为

$$\epsilon_{zf} = \frac{1}{E_f} [\sigma_{zf} - \nu_f(\sigma_{rf} + \sigma_{\theta f})], \quad (2)$$

$$\epsilon_{zm} = \frac{1}{E_m} [\sigma_{zm} - \nu_m(\sigma_{rm} + \sigma_{\theta m})]. \quad (3)$$

式中 $\epsilon_{zf}$ 和 $\epsilon_{zm}$ 分别为热应力引起的应变变量, $\sigma_{(z,r,\theta)f}$ 和 $\sigma_{(z,r,\theta)m}$ 分别为光纤和金属层柱坐标下的应力, $E_f$ 和 $E_m$ 分别为光纤和金属的杨氏模量。两应变之差来自于材料的热膨胀系数差:

$$\epsilon_{zm} - \epsilon_{zf} = (\alpha_m - \alpha_f)\Delta T. \quad (4)$$

式中 $\alpha_m$ 和 $\alpha_f$ 分别为金属层和光纤的热膨胀系数。轴向平衡要求光纤受力和金属层受力相等,但方向相反,可以表示为

$$F = \pi(b^2 - a^2)\sigma_{zm} = -\pi a^2\sigma_{zf}. \quad (5)$$

式中 $a$ 和 $b$ 分别为应变平衡状态下光栅层和金属层的外半径。忽略材料泊松比所表征的横向伸缩,可得光纤和金属层的应变为

$$\epsilon_{zm} = -\frac{\beta a^2}{b^2 - a^2}\epsilon_{zf}, \quad (6)$$

$$\epsilon_{zf} = -\frac{2at + t^2}{\beta a^2 + 2at + t^2}\Delta\alpha\Delta T. \quad (7)$$

式中 $\beta = E_f/E_m$ , $t = b - a$ 为金属层厚度。

在横截面上,由于热胀冷缩,金属层对光纤产生收缩压力,记为 $P$ 。在界面上压力平衡

$$\sigma_{rf} = \sigma_{rm} = \sigma_{\theta f} = -P, \quad (8)$$

式中负号表示指向轴心的压力。金属层的收缩压力导致其受到大的环向张应力。根据弹性力学分析<sup>[9]</sup>,交界面上金属层的环向应力为

$$\sigma_{\theta m} = -\sigma_{rm} \frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2}. \quad (9)$$

在此热应力作用下,光纤和金属层产生径向和环向的应变。光纤的环向应变为负,金属层的环向应变为正。在交界面上,它们之差为

$$\epsilon_{\theta m}(a) - \epsilon_{\theta f} = (\alpha_m - \alpha_f)\Delta T. \quad (10)$$

由(1)式,忽略纵向应变的作用,可以得到

$$\epsilon_{\theta f} \approx \frac{-1}{E_f}(1 - \nu_f)P, \quad (11a)$$

$$\epsilon_{\theta m}(a) \approx \frac{1}{E_m} \left( \frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} + \nu_m \right) P. \quad (11b)$$

代入(10)式可得

$$\epsilon_{rf} \approx \frac{-\Delta\alpha\Delta T(1 - \nu_f)(2at + t^2)}{2\beta a^2 + [\beta(1 + \nu_m) + (1 - \nu_f)](2at + t^2)}. \quad (12)$$

由于弹光效应,光纤的折射率因应变而发生变化,即

$$\begin{pmatrix} \Delta n_x \\ \Delta n_y \\ \Delta n_z \end{pmatrix} = -\frac{n^3}{2} \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{12} \\ p_{12} & p_{11} & p_{12} \\ p_{12} & p_{12} & p_{11} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \end{pmatrix}. \quad (13)$$

在光纤内, $x$ 方向和 $y$ 方向的应变等于径向应变,即 $\epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon_r$ 。因此有

$$\Delta n_x = -\frac{n^3}{2} [p_{12}\epsilon_{tz} + (p_{11} + p_{12})\epsilon_{fr}], \quad (14)$$

这一折射率变化与光纤的轴向应变,导致光纤光栅布拉格波长( $\lambda_B = 2n\Lambda$ )的变化,

$$\Delta\lambda = 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda + 2\Lambda\Delta n_{\text{eff}} = \lambda_0 \left\{ \epsilon_z - \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [(p_{11} + p_{12})\epsilon_r + p_{12}\epsilon_z] \right\}. \quad (15)$$

图2为不同的金属层厚度条件下光纤光栅的波长移动的理论模拟结果。理论模拟的根据为上述公式,并计入泊松比在应力、应变分析中的修正。可以看到,热应力导致光纤光栅的波长朝短波方向移动,并且随着金属层厚度的增加,光纤光栅的波长漂移量增加。由(10)式和(12)式可知,在薄的金属层厚度下,波长变化与厚度成线性关系,在大的厚度下,呈现近似二次曲线的关系。在模拟中,所采用的参数中,光纤热膨胀系数  $\alpha_f = 0.55 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ , 杨氏模量  $E_f = 0.74 \times 10^{11}$  Pa, 泊松比  $\nu_f = 0.17$ , 弹光系数  $p_{11} = 0.121$ 、 $p_{12} = 0.27$ 。金属镍层的热膨胀系数  $\alpha_m = 14.2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ , 杨氏模量  $E_m = 1.96 \times 10^{11}$  Pa, 泊松比  $\nu_m = 0.31$ 。

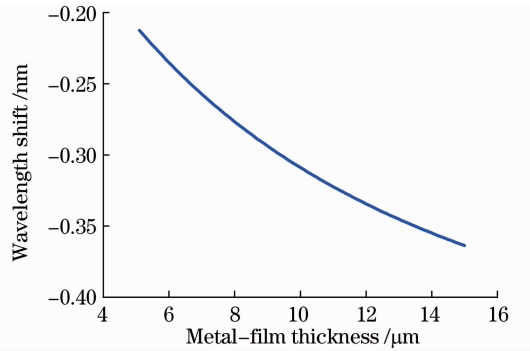


图2 光纤光栅的中心波长漂移量与金属层厚度的关系  
Fig. 2 Wavelength shift of the fiber grating as a function of metal-film thickness

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 光纤光栅的金属化工艺

由于光纤光栅主要是由  $\text{SiO}_2$  组成的非金属难镀基材,需要经过多道光纤表面预处理工序,才可获得附着有催化晶核的活化表面,进而使得化学镀能够顺利进行<sup>[10~13]</sup>,其整个工艺流程如图3所示。

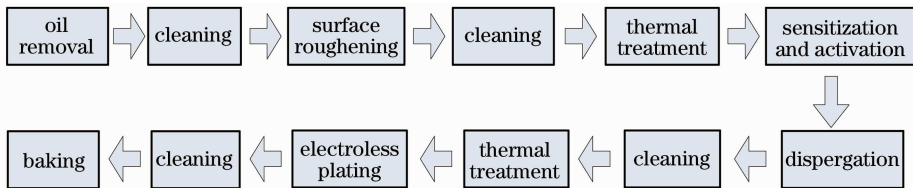


图3 光纤光栅金属化工艺流程图

Fig. 3 Process flow diagram of electroless plating

按照图3的工艺流程,可将光纤光栅金属化工艺简要概括如下。

1) 除油。实验采用氢氧化钠碱液浸泡的方法除油。除油后的光纤经去离子水彻底清洗,再用超声波清洗。

2) 粗化。将除油后的光纤光栅浸入按一定比例配置的氢氟酸和氟硅酸混合溶液中进行粗化,使光纤表面变得微观粗糙,为敏化和活化创造良好的吸附面,并能增强镀层与光纤表面的结合力。粗化后的光纤需经去离子水冲洗,再用超声波清洗。

3) 热处理。敏化活化前需将光纤烘干,去除光纤表面附着的水膜以增强镀层的结合力和完整性。

4) 同步敏化活化。敏化是使具有一定吸附能力的光纤表面上吸附一些容易氧化的物质,然后在活化处理时,利用具有催化活性金属化合物的溶液,氧化表面吸附的敏化剂,还原剂被还原成催化晶核,停留在光纤表面,使得化学镀镍能够顺利进行。实

验采用同步敏化活化的方法,利用贵金属离子  $\text{Pd}^{2+}$  作为氧化剂还原被  $\text{S}_n^{2+}$  还原。

5) 解胶。光纤表面吸附的胶体钯粒子不具有催化活性,需要通过解胶破坏胶团结构,使得钯原子裸露出来。实验采用活化的光纤置入氯化钯溶液中解胶。解胶后用去离子水冲洗光纤表面,然后再将此光纤放入恒温箱中干燥。

6) 化学镀镍。前5道光纤表面前处理工序完成后,就可以将光纤光栅放入化学镀镍溶液进行化学镀,根据施镀时间的控制就可以得到不同厚度的化学镀镍层。

实验中分别对4根光纤光栅进行了化学镀镍,编号1~4号光纤光栅的初始中心波长分别为1555.148,1555.088,1555.072,1555.132 nm,光栅长度为1 cm,金属化长度约为2.5 cm,光栅区位于金属化镀层的中间区域。通过控制化学镀时间,在光纤光栅表面获得了4种厚度的金属化镍层。

### 3.2 光纤光栅金属化镀层厚度的测量

在对 4 根光纤光栅金属化的过程中,分别用了几根同类型的普通光纤作为陪镀来进行镀层厚度的测量。然后用光学读数显微镜(上海蔡康正置金相显微镜 DMM-200C)分别对陪镀光纤横截面的厚度进行了测量( $\times 600$ ),根据施镀时间的不同,光纤横截面形貌及厚度测量结果如图 4 所示。4 根光栅的镍金属层的厚度分别为 5.40,6.08,9.28,13.50  $\mu\text{m}$ ,对应的施镀时间分别为 15,20,25,40 min。

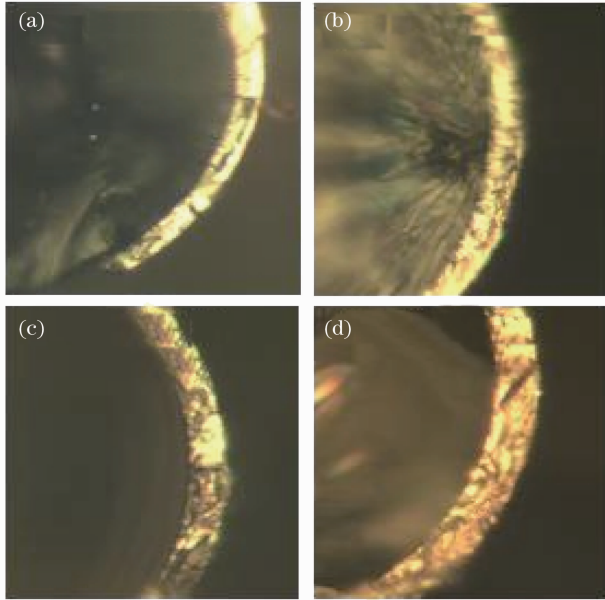


图 4 不同镀层厚度光纤光栅端面的显微结构图。(a)  $d=5.40 \mu\text{m}$ ; (b)  $d=6.08 \mu\text{m}$ ; (c)  $d=9.28 \mu\text{m}$ ; (d)  $d=13.50 \mu\text{m}$

Fig. 4 Cross-section micrographs of fiber gratings with different metal-film thickness. (a)  $d=5.40 \mu\text{m}$ ; (b)  $d=6.08 \mu\text{m}$ ; (c)  $d=9.28 \mu\text{m}$ ; (d)  $d=13.50 \mu\text{m}$

实验所采用的光纤金属化工艺已经过大量实验验证,工艺重复性和镀层稳定性都比较好。利用不同施镀时间及对应的不同镀层厚度,可以计算得到 4 次光纤金属化的化学镀速率,分别为 0.36,0.30,0.37,0.34  $\mu\text{m}/\text{min}$ 。化学镀速率基本比较稳定,从光纤光栅端面的显微图上也可看出,镀层的厚度均匀性很好,镀层和光纤镀层附着比较紧密且没有裂隙。

### 3.3 实验结果与理论计算的对比分析

为了较为清楚地分析光纤光栅金属过程中中心波长的变化情况,在光纤光栅化学镀镍的过程中,利用光谱仪(ANDO-AQ6317C 光纤光谱分析仪)对光栅的反射波长进行了实时监测,每隔几分钟记录一

个数据,观测随着镀层厚度的增加光纤光栅谐振波长的变化。图 5 为其中 1 根镀层厚度为 13.5  $\mu\text{m}$  的光栅,在施镀时间为 40 min 过程中以及化学镀前后中心波长的变化情况。

由图 5 可知,此光纤光栅在化学镀前中心波长为 1555.132 nm,在 85  $^{\circ}\text{C}$  的恒温水浴时,由于石英光纤光栅的温度敏感特性,中心波长往长波方向移动到 1555.696 nm,位移量为 0.564 nm。待化学镀完成并冷却后(室温 23  $^{\circ}\text{C}$ ),由于镀镍层热应力的作用,光栅中心波长从镀前室温下的波长蓝移了 0.548 nm。图 5 还显示了在 40 min 的化学镀过程中 5 个不同时间的波形。可以看到,随着化学镀时间的增加(即镀层慢慢增厚),中心波长渐渐向短波方向移动,移动量约为 0.1 nm,光谱形状基本上没有改变。此过程是在恒温水浴中进行的,不存在由温度变化引入热应力。这一波长变化的确切原因还有待于更多的实验和分析。初步分析可能与金属镀层在化学镀过程中金属材料致密性逐步增强有关。说明金属镀层存在本征应力<sup>[14]</sup>。

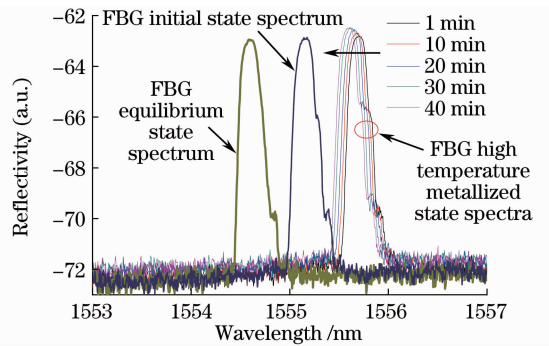


图 5 化学镀前后及化学镀过程中光纤光栅的反射波长变化

Fig. 5 Spectra of reflective wavelength of the fiber grating before, after and during electroless plating

实验分别对 4 根光纤光栅表面做了不同时间的化学镀镍处理,镍层厚度与中心波长漂移数值如表 1 所示。随着镀层厚度的增加,最终化学镀后光纤光栅的波长漂移量也变大。减去化学镀过程中监测到的由于镀层的本征应力引起的波长漂移量,可得到实际由镀镍层热应力引起的漂移,即:实际漂移等于实测波长漂移与本征应力引起的波长漂移的差(由化学镀过程中光谱监测得出)。实验数据与理论计算的波长漂移量差别很小,只有约 0.02 nm。图 6 为 4 根光纤光栅中心波长变化与镀层厚度的关系。图中同时显示了模拟计算曲线,说明理论分析与实验结果吻合良好。



表1 光纤光栅化学镀镍层厚度与中心波长漂移量的实验与理论数值

Table 1 Experimental and theoretical wavelength shifts as a function of metal-film thickness

FBG	Metal-film thickness / $\mu\text{m}$	Experimental data	Theoretical data	Wavelength shift	Wavelength shift	Difference between theoretical and experimental /nm
		of wavelength shift /nm	of wavelength shift /nm	caused by intrinsic stress /nm	caused by thermal stress /nm	
1#	5.40	-0.276	-0.22	-0.08	-0.196	0.024
2#	6.08	-0.266	-0.24	-0.02	-0.264	0.024
3#	9.28	-0.496	-0.29	-0.18	-0.316	0.017
4#	13.5	-0.548	-0.35	-0.21	-0.338	0.012

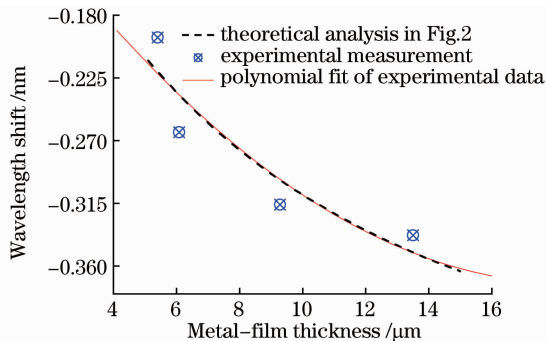


图6 光纤光栅化学镀镍层厚度与中心波长漂移量关系的实验与理论对比

Fig. 6 Comparison between experimental and theoretical wavelength shifts as functions of metal-film thickness

## 4 讨论和结论

通过化学镀的方法,在光纤光栅表面得到了不同厚度的金属镍层。由多次化学镀速率的测量和镀层形貌观察表明,所采用的工艺流程性能稳定重复性良好。实验观察到金属化后光纤光栅的中心波长发生明显的蓝移。分析表明,其主要原因为由于光纤和金属的不同热膨胀系数引起的热应力。基于弹性力学理论,导出了该热应力导致的光纤内部应力、应变,给出了光纤光栅中心波长随镀层材料厚度、热膨胀系数、杨氏模量和泊松比等参数的变化关系。实验获得了化学镀镍光纤光栅的镀层厚度与中心波长漂移关系曲线,表明理论计算与实验结果吻合良好。

实验和理论计算以化学镀镍为例。该方法可以推广到其他金属材料和非金属材料,包括多种金属组成的复合镀层。在理论分析中,假设金属镀层与光纤表面粘附完整。得到的理论方法和计算公式,也为分析镀层粘附性和牢固性提供了一种表征手段。可以预计,镀层牢固度下降时,由热应力导致的中心波长蓝移量将减小。实验数据和计算数据在定量上的吻合,表明镀层材料特性基本上与体块材料一致。

理论分析依据轴对称模型开展。实际金属化可能存在轴向的不均匀性。由此可能引起光纤和光纤光栅偏振特性的变化。有关的实验研究和理论分析正在进行之中。

文中4根光纤光栅的镀层厚度在几微米到十几微米量级,镀层残余应力引起的中心波长的改变量小于0.5 nm。当将光纤光栅应用于温度或应变传感器领域时,有时要求光纤光栅的镀层厚度在几十微米量级<sup>[15]</sup>,由理论推导可知,随着镀层的增厚,镀层残余应力引起的光栅波长漂移量越大,这种影响将不可忽视。本文工作为金属化光纤光栅的波长位置的准确控制提供了参考。由镀层厚度与中心波长的漂移关系可知化学镀后将会引起光栅波长改变值,这就为实现光纤光栅谐振波长的设计要求提供了依据。

## 参 考 文 献

- Tu Yaqing, Liu Xingchang. Intelligent Structurde Based on Optical Fibers[M]. Beijing: Advanced Education Press, 2005  
涂亚庆,刘兴长. 光纤智能结构[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005
- Feng Yan, Zhang Hua, Li Yulong *et al.*. Temperature sensitization model of fiber Bragg with metal coating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 336~341  
冯艳,张华,李玉龙等. 金属化保护的光纤布拉格光栅温度传感模型[J]. 光学学报, 2009, **29**(2): 336~341
- Feng Yan, Zhang Hua, Li Yulong *et al.*. Transversal stress sensing of fiber Bragg grating embedded into metal component [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(s1): s100304  
冯艳,张华,李玉龙等. 埋入金属结构内部的光纤布拉格光栅横向应力传感性能研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(s1): s100304
- C. E. Lee, W. N. Gibler, R. A. Atkins *et al.*. Metal embedded fiber optic Fabry Perot sensors[J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(24): 1990~1992
- H. Bartelt, K. Suhuster, S. Unger *et al.*. Single pulse fiber Bragg gratings and specific coatings for use at elevated temperatures[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(17): 3417~3424
- X. C. Li, F. Prinz. Analytical and experimental study on noncontact sensing with embedded fiber optic sensors in rotatin metal parts [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(7): 1720~1727
- Gen Jianxin, Li Lin, Zhao Ling *et al.*. Temperature tunability of metallized fiber Bragg gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8): 735~738

- 耿健新, 李琳, 赵岭等. 金属化光纤光栅的温度调谐[J]. 中国激光, 2003, **30**(8): 735~738
- 8 X. C. Li, F. Prinz, J. Seim. Thermal behavior of a metal embedded fiber Bragg grating sensor[J]. *Smart Mater Struct.*, 2001, **10**(4): 575~579
- 9 Liu Hongwen. *Mechanics of Materials*[M]. Beijing: Advanced Education Press, 2010  
刘鸿文. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010
- 10 S. T. Shiue, C. H. Yang, R. S. Chu *et al.*. Effect of the coating thickness and roughness on the mechanical strength and thermally induced stress voids in nickel-coated optical fibers prepared by electroless plating method[J]. *Thin Solid Films*, 2005, **48**(5): 169~175
- 11 Jiang Xiaoxia, Shen Wei. *The Fundamentals and Practice of Electroless Plating* [M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 2000. 99~181  
姜晓霞, 沈伟. 化学镀理论与实践[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000. 99~181
- 12 Xu Haipeng. *Research of Electroless Nickel Plating on the Surface of Quartz Optic Fiber Grating and the Sensing Characters* [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007  
徐海鹏. 石英光纤光栅表面化学镀镍及其传感特性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007
- 13 Li Xiaofu, Jiang Desheng, Yu Haihu *et al.*. Electroless nickel-phosphor plating process on surface of quartz optical fiber[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2005, **56**(1): 126~129  
李小甫, 姜德生, 余海湖等. 石英光纤表面镀镍磷合金工艺[J]. 化工学报, 2005, **56**(1): 126~129
- 14 C. S. Whiteman, Y. W. Chung. Thermo mechanically induced voiding of Al-Cu thin films[J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1991, **9**(4): 2516~2522
- 15 Y. Feng, H. Zhang, Y. L. Li *et al.*. A plating method for metal coating of fiber Bragg grating[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(2): 115~117

栏目编辑: 谢婧