

光纤布拉格光栅金属化保护中的应力

饶春芳^{1,2} 张华¹ 冯艳¹ 肖丽丽¹ 叶志清²

(¹南昌大学机电工程学院机器人与焊接自动化重点实验室, 江西 南昌 330031
²江西师范大学物理与通信电子学院光子与通信重点实验室, 江西 南昌 330022)

摘要 在用化学镀结合电镀方法对光纤布拉格光栅(FBG)进行金属化保护的过程中产生的应力直接影响到金属化FBG(MFBG)的传感精度。为此,基于应力产生的机制,对应力作用下化学镀和电镀过程中FBG的谐振谱变化进行了分析。实验发现化学镀后FBG谐振谱出现了较大的谱带展宽与峰值损耗减少。对化学镀产生的应力进行了理论及数值分析,结果显示热应力在FBG内部产生了扰动。通过延长化学镀后冷却时间的方法减少热应力,并通过充分搅拌化学镀液的方法减少应力的不均匀性,优化后的化学镀应力对FBG的影响很小。其后的电镀实验显示电镀过程是产生应力的主要原因。通过稳定较高的电镀温度、充分搅拌及采用双电极的方法达到了尽可能减少电镀过程应力对FBG频谱影响的目的。对优化化学镀和电镀条件后制成的MFBG进行温度传感实验表明,其回程误差小于已有的报道。

关键词 光纤光学;金属化光纤布拉格光栅;化学镀结合电镀保护;应力;谐振谱变化

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.060601

Stress in Metal Coating Fiber Bragg Grating

Rao Chunfang^{1,2} Zhang Hua¹ Feng Yan¹ Xiao Lili¹ Ye Zhiqing²

¹Key Laboratory of Robot and Welding Automation, School of Mechatronics Engineering,
Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China

²Key Laboratory of Optoelectronics and Communication, College of Physics and Communication
Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang, Jiangxi 330022, China

Abstract Stress produced in metallization of fiber Bragg grating (FBG) using electroless-electroplating method affects the sensing accuracy of FBG directly. Based on the mechanism of stresses, the changes of FBG's transmission spectrum in metallization are studied for better sensing accuracy. Experiments show that electroless plated FBG exhibits broadened spectrum and reduced peak value. Theory and simulation analyses are conducted to study the stress in electroless plating. Results show that the thermal stress causes perturbation in FBG. Prolonging the cooling time is used to reduce the thermal stress. And during the electroless plating, the solution is mixed timely to make the stress uniform. It is shown that stress in electroless plating with the optimal condition affects the FBG little. The following electroplating experiments show that most stress is produced in the electroplating process. The changes of FBG's spectrum are minimized by stabilizing higher electroplating temperature, mixing timely and using double electrodes. Finally, temperature sensor experiments for the metal coated FBG (MFBG) metalized under the optimized condition prove that the hysteresis error is reduced compared with the reported results.

Key words fiber optics; metal coated fiber Bragg grating; electroless and electroplating method; stress; change of resonance spectrum

OCIS codes 060.3735; 060.2370; 230.0230; 280.4788

收稿日期: 2012-03-05; 收到修改稿日期: 2012-03-15; 网络出版日期: 2012-04-24

基金项目: 国家自然科学基金(61067003, 60967002, 50905082)、高等学校博士点新教师基金(20103601120005)和江西省自然科学基金(20114BAB205067)资助课题。

作者简介: 饶春芳(1975—),女,博士研究生,副教授,主要从事光纤智能金属结构及光波导传感等方面的研究。

E-mail: rcf0322@163.com

导师简介: 张华(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤智能金属结构、焊接自动化、工业机器人智能化和水下移动焊接机器人技术等方面的研究。E-mail: zhanghua_lab@163.com

1 引言

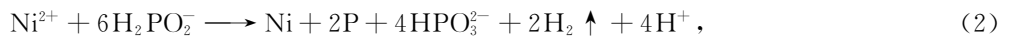
光纤布拉格光栅(FBG)由于其径细、质轻、免电磁干扰以及优良的可埋入性、集信息传输与传感于一体等优良特性,是近年来发展最快的光纤无源器件之一,并在通信、传感等领域均有广阔的应用前景^[1~3]。由于裸 FBG 极易折断,因此,适当的保护层对于 FBG 的实际使用有重要的意义。相对于传统光纤的丙烯酸盐涂层,金属保护层能为 FBG 提供更好的保护。目前报道的几种金属化 FBG(MFBG)的方法中,物理气相沉积会产生较大的热应力,且涂覆的厚度也不能达到要求;而铸造的方法也会产生较大的热应力,且只局限于少数几种熔点低的金属,如锡、锌和铅^[4];直接用漆刷在光纤上涂一层导电漆的方法不能保证金属层的均匀性。化学镀结合电镀的方法由于能在较低温度下进行,不会产生较大的热应力,且沉积厚度也可根据需要控制,是一种简单、经济、实用的保护方法,近些年来被研究和使用得较多^[3~9]。另一方面,由于金属材料与光纤材料较大的差异,金属层又可以作为固化在 FBG 上的功能材料,如由于金属层有较大的热膨胀系数,因此可使 FBG 温度灵敏度得到提高^[7],且可使温度传感范围扩大到低温^[8]、超低温(小于 40 K)^[4]、高温^[6,9]环境。而表面的金属层为 FBG 提供了良好的可焊性,本实验室将其用钎焊的方法嵌入 42CrMo 钢中^[10]。但类似于 FBG 的其他二次涂敷方法,涂敷层的不均匀或应力等原因将产生光栅的啁啾,严重影响了光纤光栅的传感精度^[11],如在已有的 MFBG 温度传感的报道中,直接将金属化后的 FBG 进行温度传感实验,会产生较明显的回程误差^[6,7,12]。因此,要提高 MFBG 的传感精度,必须深入研究金属化过程对于 FBG 本身的影响。但目前尚没有相关的报道。本文研究金属化对于 FBG 的影响机理,以优化 FBG 金属化技术,为扩大 MFBG 的传感对象和范围、提高 MFBG 的传感精度提供依据。

2 化学镀结合电镀的光纤保护方法

金属化保护光纤包括三个步骤:预处理、化学镀和电镀。光纤属于难镀非金属,因此在对其做化学镀前,需经预处理以获得适合于化学镀的洁净催化过渡表面。预处理包括除油、敏化和活化三个步骤^[13]。去除涂敷层的光纤除去油污后,首先放入以氯化亚锡为主要成分的敏化液(含 $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,质量浓度为 10 g/L, HCl,体积比为 40 mL/L)中约 10 min,再放入含钯盐的活化液(PdCl_2 ,质量浓度为 0.5 g/L, HCl,体积比为 5 mL/L)中 10~15 min。经预处理后光纤表面形成以钯为催化中心的催化表面,金属离子将在此中心开始还原,预处理的反应机制为



由于化学镀镍-磷技术成熟,使用的化学试剂相对安全,因此被普遍采用。化学镀镍-磷的配方及工艺条件如下: $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$,质量浓度为 25~45 g/L, $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$,质量浓度为 20~37 g/L, $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$,体积比为 20~37 mL/L, H_3BO_3 ,质量浓度为 20~37 g/L,pH 值 4.2~4.8,温度 82 °C~86 °C,反应机制为



化学镀层结构是无定形态^[13]。在化学镀中,虽然没有外加电极存在,但是存在由电荷移动形成的电流。化学镀时的镍由镍盐($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)提供,充当阳极,而带有钯催化中心的光纤衬底充当阴极。化学镀时有氢气逸出。由于化学镀层较薄(本研究中小于 10 μm),为更好地保护光纤,研究中在化学镀层上进一步进行电镀镍。电镀液配方及工艺条件如下: $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$,质量浓度为 180~300 g/L, NiCl_2 ,质量浓度为 30~50 g/L, H_3BO_3 ,质量浓度为 35~40 g/L, $\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{SO}_4\text{Na}$,质量浓度为 0.1~1.0 g/L,pH 值 3.9~4.2,温度 20 °C~60 °C、电流密度 0.03~0.04 A/cm²。镍板连直流电源的正极,化学镀后的光纤连接直流电源的负极。通电后,镍沉积在化学镀光纤外表面。主要反应为



(3)~(5)式分别为阴极、阳极和副反应。

为保持金属化保护后 FBG 受力的对称性,本研究所有 FBG 均保留两头尾纤,FBG 在被镀光纤的中部,使用的化学镀与电镀装置如图 1 所示。以上工艺条件下金属外包层材料特性参见文献^[13]。

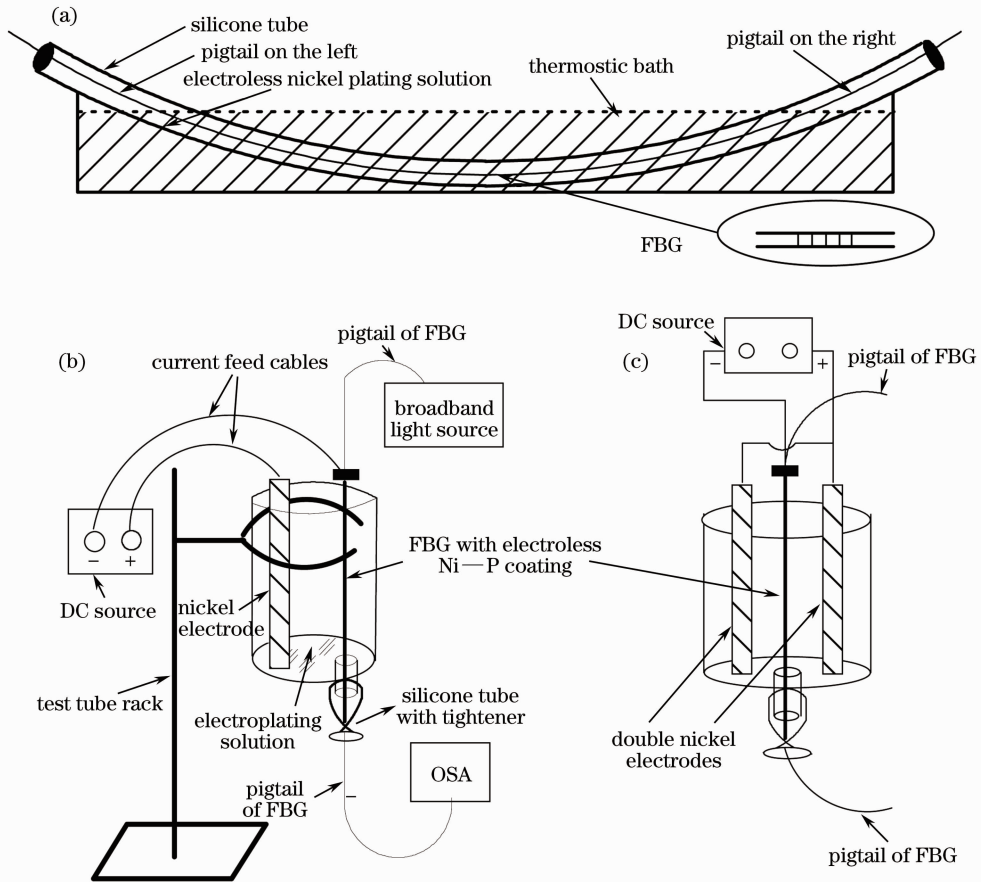


图1 化学镀及电镀光纤装置示意图。(a)化学镀装置；(b)电镀装置；(c)双阳极电镀装置
Fig. 1 Sketches of metallization equipments (a) for electroless plating; (b) for electroplating; (c) for double-anode electroplating

3 化学镀与电镀应力来源的理论分析

3.1 应力来源的理论分析

虽然有关化学镀与电镀的应力来源有众多的理论,但各种理论都不能单独解释所有的现象。归纳起来有这样几个方面:热应力、分子合并(如残余气体)、化学反应等。联系在研究中所使用的化学镀与电镀光纤技术具体情况,系统地可归纳为以下几个方面^[14,15]:

1) 以核为中心生长的材料在相遇时引起的应力。在沉积过程中,最开始是形成弥散的核,核长大后,当各个核之间横向相遇时,类似于两个液滴相遇,形成一个大核,其表面积减小、密度变大,因此在镀层中产生拉应力。

2) 氢引起的应力。沉积过程中产生氢,当氢释放时,引起体积的降低形成拉应力;而当氢没有离开镀层而是往相反方向运动并在下层形成高压气袋时,则产生压应力。

3) 其他原子进入时引起的体积变化。由于杂质元素引起的体积变化会产生应力。

4) 材料的不匹配。在镀层形成连续结构时,衬底和镀层是不同的材料,它们之间的不匹配形成应力。

5) 热应力。当温度变化时,由于 MFBG 内部各部分之间膨胀系数之间存在差异,彼此相互约束,从而形成应力。

3.2 化学镀与电镀应力的热历程及其影响

由 3.1 节分析可知,化学镀与电镀过程中,一些因素如聚结、氢、杂质的掺入及衬底和材料的不匹配而产生的应力是不可避免的。另一个重要原因是热因素,而化学镀和电镀光纤中的热历程是一个较易控制的过程,因此有必要专门研究化学镀与电镀的热历程及其对应力的影响。从理论上说主要有以下几个方面:

- 1) 由于沉积通常在较高温度下进行,因此,在将金属化光纤冷却到室温时将产生热应力^[16]。
- 2) 由过能量引起的热应力。化学镀与电镀过程中,溶液中的金属离子必须克服能量势垒才能从水合离子转变为能附着在晶格上的金属离子。当金属离子能量超过能量势垒时,一部分离子将比环境温度高,在其冷却的过程中将产生应力^[14]。
- 3) 电镀过程中,升高电镀温度会降低阴极的极化,导致镀层结晶变粗^[17],而镀层应力与表征极化的过电位成正比,与晶粒的尺寸成反比^[18],这时镀镍层的内应力减小。

4 化学镀应力作用下 FBG 的谐振谱

4.1 实验结果

图 2(a)是 86 °C 化学镀后(镀层约 4 μm)直接取出到 11 °C 室温时的谐振谱变化图。化学镀后 FBG 中心波长由 1540.201 nm 蓝移 0.248 nm 到 1539.953 nm;3 dB 带宽由 0.083 nm 扩大到 0.115 nm,扩大了 38.6%;峰值损耗由化学镀前的 7.20 dB 下降到 5.47 dB。因此,化学镀后 FBG 发生了较大退化。

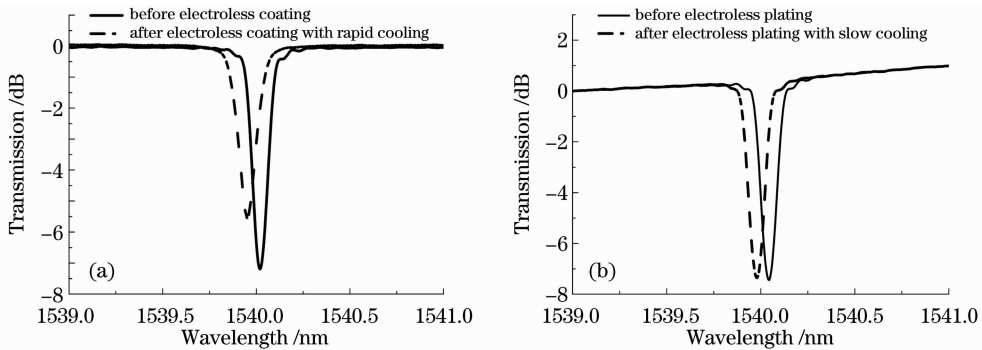


图 2 化学镀前后 FBG 透射谱的变化。(a)优化前;(b)优化后

Fig. 2 Changes of transmission spectrum for electroless plated FBG. (a) Before optimization and (b) under the optimal condition

4.2 分 析

根据光纤模式耦合理论,对于纤芯写入周期折射率调制的 FBG,涂敷层光学性质的改变不会影响 FBG 谐振谱^[19]。因此,此处只需考虑化学镀应力对 FBG 的影响。首先,考虑化学镀后 FBG 冷却到室温时的热应力。此时热应力产生的原因是温度变化时化学镀层与光纤层的热膨胀系数的一致,使两种材料间互相约束,从而产生应力。对于化学镀后 FBG 所处的温度场,如温度随时间而变称为非定常温度场,不随时间而变则称为定常温度场。降温问题属于非定常温度场问题,根据弹性力学理论,热应力的大小除与材料的弹性模量、泊松比及材料的几何特征相关外,还与温度变化速度有关。柱坐标下,热应力的平衡方程可写为^[20]

$$\sum_k \frac{\partial \sigma_{th,ik}}{\partial k} = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}, \quad (i, k = r, \theta, z) \quad (6)$$

式中 σ_{th} 表示由温度变化而引起的热应力, u 表示由热应力引起的位移, ρ 为材料的密度, t 为时间。当温度变化缓慢,即缓冷时,可当作准静态处理,即不考虑(6)式等号右边的加速度项。

4.2.1 缓慢冷却时的热应力

对缓慢冷却时化学镀 FBG 所受热应力进行仿真分析。在镀层材料和几何尺寸均匀、整个 FBG 所处温度场一致的情况下,FBG 受力对称于光纤的轴线 z 轴,如图 3 所示。根据弹性力学理论,光纤内各处的应力、应变和位

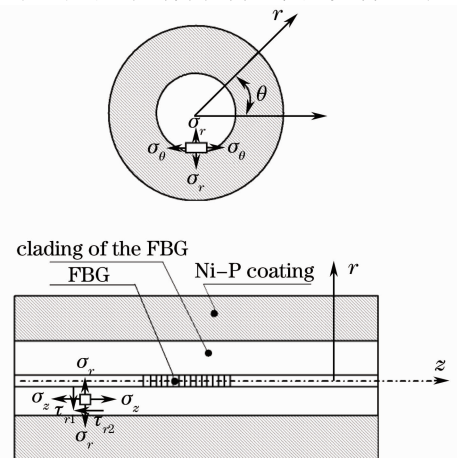


图 3 化学镀 Ni-P 金属化保护 FBG 轴对称条件下受力示意图

Fig. 3 Schematic of stress for electroless Ni-P coated FBG with axial symmetry

移分量都以 z 轴为对称轴, 这些物理量是半径 r 和 z 的函数。所以, 在轴坐标下, 光纤及金属层内都只有径向正应力 σ_r 、环向正应力 σ_θ 、轴向正应力 σ_z 、沿着 z 轴方向且垂直于 r 方向的剪应力 τ_{rz} 和沿着 r 方向且垂直于 z 轴方向的剪应力 τ_{zr} 不为零, 且根据剪应力互等定律有 $\tau_{rz} = \tau_{zr}$ 。同理, 在这种情况下只有径向正应变 ϵ_r 、环向正应变 ϵ_θ 、轴向正应变 ϵ_z 及 r 与 z 方向之间的剪应变 γ_{zr} 不为零。物体的平衡方程、几何方程及应力应变关系均可按线性弹性热应力理论给出^[21]。通过有限元方法计算化学镀后光纤截面(取标准单模光纤, 纤芯半径小于等于 $4.15 \mu\text{m}$, 光纤半径 $62.5 \mu\text{m}$)处从 86°C 经缓慢冷却到 11°C 的应变, 如图 4 所示。计算所用参数如表 1 所示。

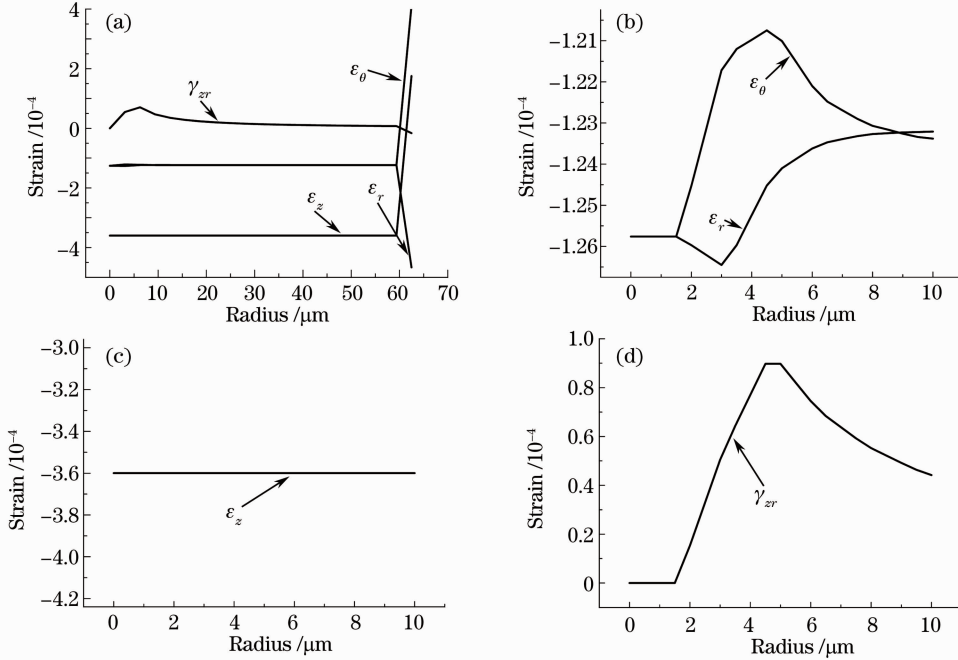


图 4 FBG 经化学镀 Ni-P 保护后缓冷到室温(11°C)时光纤的应变。(a)纤芯和包层应变;(b) $r \leq 10 \mu\text{m}$ 处径向应变 ϵ_r 与环向正应变 ϵ_θ ;(c) $r \leq 10 \mu\text{m}$ 处轴向正应变 ϵ_z ;(d) $r \leq 10 \mu\text{m}$ 处 r 与 z 方向的剪应变 γ_{zr}

Fig. 4 Strain in FBG after electroless plating with slow cooling to room temperature (11°C). (a) Strain in both core and cladding; (b) radial strain ϵ_r and hoop strain ϵ_θ when $r \leq 10 \mu\text{m}$; (c) axial strain ϵ_z when $r \leq 10 \mu\text{m}$; (d) shearing strain γ_{zr} when $r \leq 10 \mu\text{m}$

表 1 化学镀 FBG 缓冷热应力计算所用参数(化学镀层厚度 $4.6875 \mu\text{m}$)

Table 1 Parameters for optical fiber and electroless Ni-P coating (with the coating thickness of $4.6875 \mu\text{m}$)

	Elasticity modulus /MPa	Poisson's ratio	Coefficient of thermal expansion
Optical fiber	7.40×10^4	0.17	5.5×10^{-7}
Electroless Ni-P coating	1.96×10^5	0.31	1.3×10^{-5}

根据弹光效应, 最初各向同性的光纤, 在应力作用下其折射率的变化张量表达式为^[11]

$$\begin{bmatrix} \Delta n_r \\ \Delta n_\theta \\ \Delta n_z \\ \Delta n_4 \\ \Delta n_5 \\ \Delta n_6 \end{bmatrix} = -\frac{n^3}{2} \begin{bmatrix} B_r - B_0 \\ B_\theta - B_0 \\ B_z - B_0 \\ B_4 \\ B_5 \\ B_6 \end{bmatrix} = -\frac{n^3}{2} \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{11} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{12} & p_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_r \\ \epsilon_\theta \\ \epsilon_z \\ \gamma_{zr} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中 \mathbf{B} 为光纤相对介电抗渗张量, 是二阶张量, \mathbf{p} 为光纤弹光系数, 是一个四阶张量, n 为折射率, 对于熔融石英, $p_{11} = 0.121$, $p_{12} = 0.270$, $p_{44} = 0.5(p_{11} - p_{12})$ 。

由图 4 可知, 首先, 热应力引起的大幅度的应变发生在光纤包层与金属层结合的部分, 即图 4(a)中半径大于 $55 \mu\text{m}$ 处。由于 FBG 中发生模式耦合的基模在包层中的能量迅速衰减, 因此可以认为光纤与金属结合

部分引入的大幅度应变不会影响 FBG 的谐振谱。其次,由图 4(b)~(d)可知,热应力下纤芯所受的径向应变、环向应变和轴向应变均不相同,且还存在 r 与 z 方向之间的剪应变 γ_{rz} 。将仿真所得平均值代入(7)式中,并取 $n=1.46$,计算 n_r ,可得纤芯折射率与包层折射率差增大了约 5.27×10^{-7} 。因此,缓慢冷却化学镀 FBG 时的热应力在 FBG 内部产生了微小扰动。

4.2.2 急速冷却时的热应力

由于实验中化学镀 FBG 是从 $86\text{ }^\circ\text{C}$ 直接抽出冷却到室温,是一个急速降温的过程,必须考虑(6)式中的加速度项。此时温度 T 随时间 t 的变化表达式为^[22]

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\alpha}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (8)$$

式中 c, λ 分别为材料的比热容与导热系数。急冷时的热应力问题可以归结为在求解缓冷问题热应力的基础上将含温度分布的积分项积分^[20]。由于化学镀 FBG 直径不足 1 mm ,属微米尺度传热学问题,急冷时产生的热应力远大于缓冷过程中产生的热应力^[23]。另一方面,除与缓冷过程一样,急冷时产生的热应力与材料的弹性模量、泊松比和热膨胀系数有关外,还与密度、比热容与导热系数相关,而化学镀 Ni-P 镀层的无定形态,必然造成这些参数在空间分布上的不一致。因此,这些共同的原因将加剧热应力对 FBG 的扰动,使 FBG 产生更严重的啾啾。

4.3 改进的化学镀

根据理论分析,采取以下措施减少应力对 FBG 的影响。首先,及时搅动化学镀液,一方面使化学镀液在整个光栅区域均有槽液更新,以避免因局部消耗的金属离子得不到补充而导致的镀层不均匀,另一方面使产生的氢气迅速从镀液中逸出,避免因氢气泡停滞在表面产生微孔而使应力不均匀。其次,化学镀后不立即拿出化学镀 FBG,而是随整个化学镀装置一起冷却到室温($11\text{ }^\circ\text{C}$),整个冷却过程约 6 h 。图 2(b)是改进化学镀工艺后化学镀 FBG 透射谱的变化情况,化学镀后 FBG 中心波长由 1540.045 nm 蓝移 0.065 nm 到 1539.980 nm ; 3 dB 带宽由 0.081 nm 变化到 0.083 nm ,扩大了 2.4% ;峰值损耗由化学镀前的 7.21 dB 到 7.053 dB 。化学镀后 FBG 的退化现象明显得到了改观。

4.4 化学镀本身对 FBG 的作用

考察图 2(b)FBG 中心波长的变化。裸 FBG 的温度灵敏度约为 $11\text{ pm}/^\circ\text{C}$,因此,当它从 $11\text{ }^\circ\text{C}$ 室温放入 $86\text{ }^\circ\text{C}$ 的化学镀液时,其中心波长应红移 0.825 nm ;当化学镀厚度约 $4\text{ }\mu\text{m}$,缓慢冷却时温度灵敏度约为 $13\text{ pm}/^\circ\text{C}$ ^[13],因此,从 $86\text{ }^\circ\text{C}$ 再回到室温时,中心波长应蓝移 0.975 nm 。将这两个数值与图 2(b)实测结果相比较,可知化学镀本身使中心波长红移了 0.082 nm 。因此,综合图 2(b)中 3 dB 带宽及峰值损耗的变化,可以认为化学镀本身对于 FBG 中心波长及谐振谱没有产生显著的影响。

5 电镀应力作用下的 FBG 谐振谱

电镀采用图 1(b)所示基本装置,电镀液使用外部加热管照射方式加热到 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 。图 5(a)和(b)分别是用改进工艺前后的两种化学镀 FBG 电镀 15 h 后,FBG 谐振谱变化的情况。金属层厚约 $360\text{ }\mu\text{m}$ 。由图可知,FBG 中心波长均向短波方向移动,因此,本研究中电镀在 FBG 中产生了压应力^[11]。图 5(a)中,工艺改进前的化学镀 FBG 在电镀后中心波长由 1539.950 nm 蓝移 4.517 nm 到 1535.433 nm ,峰值损耗由 5.47 dB 下降到 2.78 dB ;图 5(b)中,工艺改进后的化学镀 FBG 在电镀后中心波长由 1540.250 nm 蓝移 3.765 nm 到 1536.485 nm ,峰值损耗由 7.8 dB 下降到 6.58 dB 。相对于图 5(a),图 5(b)的 FBG 透射谱在变化幅度上更小。但两种情况下均出现了双峰现象。这是由于一方面化学镀后热应力产生的微扰在电镀应力的作用下进一步加深,而改进前的化学镀 FBG 受扰动程度高于改进后的化学镀 FBG,因此图 5(a)中的变化更明显;另一方面,由于电镀均镀性较差,由不同的镀层厚度产生的电镀应力也不相同,这进一步加剧了 FBG 的啾啾及光纤的微弯。因此,为尽可能减少电镀过程对于 FBG 的影响,根据电镀应力产生的原因,采取以下措施优化电镀过程:1) 升高电镀温度(大于 $30\text{ }^\circ\text{C}$),如 3.2 节所述,由于温度升高可降低阴极的极化,导致镀层结晶变粗,因而应力下降;2) 尽可能减少电镀时温度的起伏,这样可减少电镀液和 FBG 各部分因温度不均匀而产生的热应力;3) 给予电镀液充分的搅拌,一方面促进电镀液中离子的流动,使离子浓度均匀,提高镀层的均

匀性,另一方面使电镀中的氢气能及时排出,由氢而产生的应力能均匀;4)采用双阳极,如图1(c)所示,合理的电极分布可以使电镀液中离子均匀,进而使在FBG上沉积的金属更加均匀。将改进化学镀工艺后的FBG在优化条件下进行电镀,其谐振谱的变化如图6(a)所示。在获得与图5中保护层同样的厚度情况下,镀速加快,电镀时间缩短为10 h,化学镀FBG在电镀后中心波长由1540.080 nm蓝移2.650 nm到1537.430 nm,峰值损耗由6.59 dB下降到5.22 dB。MFBG没有出现显著的双峰现象。将它放入水浴箱中缓慢升、降温,并观察其中心波长与温度变化的关系,如图6(b)所示。升温灵敏度为21.0 pm/°C,降温灵敏度为20.5 pm/°C,相关系数均达99.9%以上,回程误差小于1.5 °C,因此,优化金属化方案后,相对于已有的MFBG回程误差大于2 °C的报道^[6,7,12],MFBG的温度传感精度得到了改善。

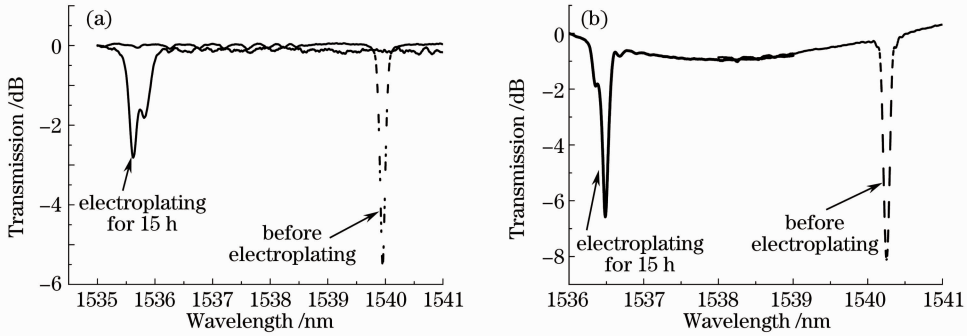


图5 FBG经电镀后谐振谱的变化。(a)用来改进化学镀工艺的FBG进行电镀;(b)用改进化学镀工艺后的FBG进行电镀
Fig. 5 Transmission spectrum changes for electroplating using FBGs (a) without and (b) with optimal electroless plating

6 讨论

首先,化学镀结合电镀金属化保护过程中不可避免地存在应力,本研究通过优化化学镀及电镀条件,尽可能减少FBG传输谱的变化,其本质是减少由金属层材料性能的不一致给FBG性能带来的不确定性,进而减少传感误差。其次,由化学镀急冷和缓冷情况下FBG热应力分析可以推断,当MFBG作为传感器使用、存在急速变化的温度场时,其传感特性同时受温差及温度变化速度影响,此时的传感结果必须同时考虑这两个因素。再次,金属化保护层中的FBG本身可以作为传感器,以测试金属化过程中的一些参数,如在电镀的过程中,实时监测FBG频谱的变化就能反映电镀应力的情况。最后,根据电镀理论知识^[16],电镀产生的应力与电化学各种参量密切相关,因此,今后可开展诸多的研究,以优化电镀技术,按需求控制其对FBG的影响。

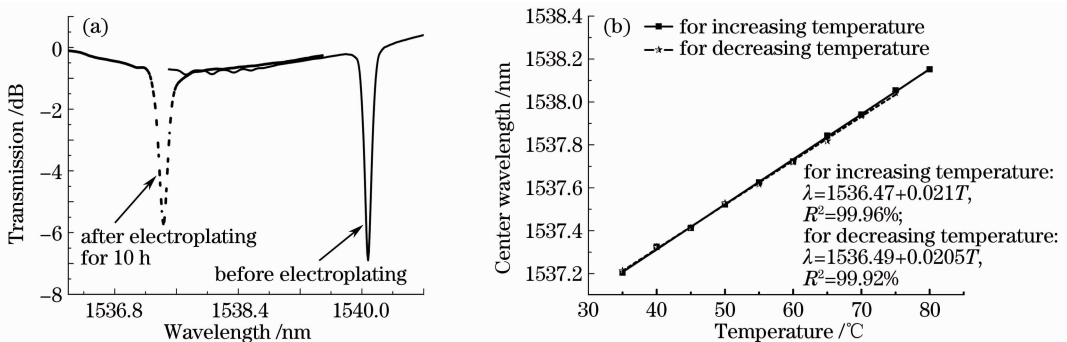


图6 在优化电镀条件下对化学镀FBG进行电镀的结果。(a)透射谱的变化;(b)温度传感特性

Fig. 6 Electroplating the slow cooling FBG under optimum conditions. (a) Changes of transmission spectrum; (b) center wavelength response to temperature

7 结论

研究了化学镀结合电镀金属化保护FBG过程中产生的应力以及在其作用下FBG谐振谱的变化。系统

分析了保护过程中应力产生的原因。针对化学镀过程,通过理论分析,认为热应力使 FBG 内部产生了扰动;实验上通过延长化学镀后冷却时间的方法减少热应力,并通过充分搅拌化学镀液的方法减少应力的不均匀性。优化化学镀工艺后,FBG 谐振谱变化大大减少。电镀过程是产生应力及影响 FBG 的主要原因,在本文中使用的电镀方法使 FBG 中心波长产生了较大的蓝移,即产生了较大的压应力;实验上通过稳定较高的电镀温度、充分搅拌及采用双电极的方法达到了降低应力大小以及使应力均匀的效果,因而尽可能地减少了电镀过程对 FBG 谐振谱的影响。对优化金属化条件后的 MFBG 进行温度传感实验,结果表明其回程误差小于已有的报道。同时,这种金属化方法也可用于其他光纤传感器的保护中。

参 考 文 献

- 1 Zhang Le, Wu Bo, Ye Wen *et al.*, Highly sensitive fiber-optic vibration sensor based on frequency-locking of a FBG Fabry-Perot cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0406006
张 乐, 吴 波, 叶 雯 等. 基于光纤光栅法布里珀罗腔锁频原理的高灵敏度光纤振动传感器[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0406006
- 2 Wang Yubao, Lan Haijun. Study of fiber Bragg grating sensor system based on wavelength-division multiplexing/time-division multiplexing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2196~2201
王玉宝, 兰海军. 基于光纤布拉格光栅波/时分复用传感网络研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2196~2201
- 3 Yan Feng, Hua Zhang, Yulong Li *et al.*. Temperature sensing of metal-coated fiber Bragg grating[J]. *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, 2010, **15**(4): 511~519
- 4 Carla Lupi, Ferdinando Felli, Andrea Brotzu *et al.*. Improving FBG sensor sensitivity at cryogenic temperature by metal coating[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, **8**(7): 1299~1304
- 5 S. Sandlin, T. Kinnunen, J. Rämö *et al.*. A simple method for metal re-coating of optical fibre Bragg gratings[J]. *Surf. Coat. Technol.*, 2006, **201**(6): 3061~3065
- 6 Xiao Chunli, Fritz Prinz, John Seim. Thermal behavior of a metal embedded fiber Bragg grating sensor[J]. *Smart Material and Structures*, 2001, **10**(4): 575~579
- 7 Feng Yan, Zhang Hua, Li Yulong *et al.*. Temperature sensitization model of fiber Bragg grating 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
- 8 Guo Mingjin, Jiang Desheng. Low temperature properties of fiber Bragg grating temperature sensor with plating gold[J]. *Chinese J. Low Temperature Physics*, 2006, **28**(2): 138~141
郭明金, 姜德生. 镀金光纤光栅温度传感器的低温特性[J]. *低温物理学报*, 2006, **28**(2): 138~141
- 9 R. S. Shen, J. Zhang, Y. Wang *et al.*. Study on high-temperature and high-pressure measurement by using metal-coated FBG[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2008, **50**(5): 1138~1140
- 10 Li Yulong, Feng Yan, Zhang Hua *et al.*. Fiber Bragg grating sensor metallization and embedding into 42CrMo steel by soldering[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, **29**(3): 69~72
李玉龙, 冯 艳, 张 华 等. 光纤光栅传感器金属化保护及钎焊嵌入 42CrMo 钢[J]. *焊接学报*, 2008, **29**(3): 69~72
- 11 Li Ming, Liao Yanbiao. Fiber Optic Sensors and Their Applications[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2008. 118~127
黎 敏, 廖延彪. 光纤传感器及其应用技术[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2008. 118~127
- 12 Rao Chunfang, Zhang Hua, Feng Yan *et al.*. Heat Treatment on fiber Bragg grating with Ni coating for elevated temperature sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(9): 2006~2013
饶春芳, 张 华, 冯 艳 等. 镍金属保护光纤布拉格光栅的热处理及高温传感[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(9): 2006~2013
- 13 Yulong Li, Hua Zhang, Yan Feng *et al.*. Metal coating of fiber Bragg grating and the temperature sensing character after metallization[J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2009, **15**(4): 391~397
- 14 Jack W. Dini. Electrodeposition; the Materials Science of Coating and Substrates[M]. Norwich: Noyes Publications, 1993. 297~299
- 15 Y. Jeon, K. Paik. Stress in electroless Ni-P films for electronic packaging applications[J]. *IEEE Trans. Components and Packaging Technologies*, 2002, **25**(1): 169~173
- 16 Milan Paunovic, Mordechai Schlesinger. Fundamentals of Electrochemical Deposition[M]. Wiley Interscience, 2006. 232

- 17 Zhu Liqun. Electrodeposition Theory and Technology for Functional Membrane[M]. Beijing: Beihang University Press, 2005. 39
朱立群. 功能膜层的电沉积理论与技术[M]. 北京: 北京航空大学出版社, 2005. 39
- 18 Huang Shixun, Wu Chunshu. Theory of Electroplating[M]. Beijing: China Agriculture and Machine Press, 1982. 123
黄世勋, 吴纯素. 电镀理论[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1982. 123
- 19 Truan Erdogan. Fiber Grating Spectra[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 20 Takeuqi Youqirou. Thermal Stress[M]. Guo Lianwei, Li Anding transl.. Beijing: Science Press, 1977. 62
竹内洋一. 热应力[M]. 郭连伟, 李安定 译. 北京: 科学出版社, 1977. 62
- 21 Li Weite, Hang Baohai, Bi Zhongbo. Theoy and Application of Thermal Stress[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006. 89~90
李维特, 黄保海, 毕仲波. 热应力理论分析及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006. 89~90
- 22 Yang Shiming, Tao Wenquan. Heat Transfer[M]. Beijing: High Education Press, 2010. 115
杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010. 115
- 23 Guo Zengyuan. Frontier of heat transfer—microscale heat transfer[J]. *Advances in Mechanics*, 2000, **30**(1): 1~6
过增元. 国际传热研究前沿——微细尺度传热[J]. 力学进展, 2000, **30**(1): 1~6