

单端腐蚀光纤布拉格光栅在低折射率区的理论模型及设计

罗彬彬^{1,2} 赵明富² 周晓军¹ 黄德翼² 曹雪梅²

(¹ 成都电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)
(² 重庆理工大学电子信息工程系, 重庆 400054)

摘要 研究单端腐蚀光纤布拉格光栅(FBG)在低折射率区(约 1.333~1.360)对折射率与温度同时测量的理论模型,分析其主要结构参数对折射率灵敏度和线性度的影响,建立相应的线性近似理论和误差分析方法。理论仿真结果表明,可通过减小腐蚀区的直径或选择光栅周期较大的 FBG 制作传感器来提高折射率灵敏度,但这同时会降低传感器的线性度及增大折射率灵敏度的理论误差。在此理论分析基础上,设计并制作一个单端腐蚀 FBG,进行相应实验研究,实验结果与仿真结果一致。

关键词 光纤传感;光纤布拉格光栅;单端腐蚀;折射率传感;温度

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0406004

Theoretical Model and Design of Single-End Etched Fiber Bragg Grating in Low Refractive-Index Area

Luo Binbin^{1,2} Zhao Mingfu² Zhou Xiaojun¹ Huang Deyi² Cao Xuemei²

(¹ School of Opto-Electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)
(² Department of Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract The theoretical model of single-end etched fiber Bragg grating (FBG) for simultaneous measurements of surrounding refractive index (SRI) and temperature in the low refractive-index area (from about 1.333 to 1.360) is researched, the effects of the structural parameters on the SRI sensitivity and linearity are analyzed in detail, and the corresponding methodology of linear approximation and error analysis is established. Simulated results show that the SRI sensitivity can be increased by reducing the diameter of the etched region or selecting the FBG with a relative bigger grating pitch for the fabrication of the sensor, however, these will cause not only the decline in the linearity but also the rise in theoretical error of the SRI sensitivity of the sensor. Based on the theoretical analysis, a single-end etched FBG is designed and fabricated for the corresponding experiments, the results of which are in accord with the simulated ones.

Key words fiber sensing; fiber Bragg grating; single-end etching; refractive-index sensing; temperature

OCIS codes 060.0060; 060.3735; 280.4788; 060.2370

1 引言

近来,研究对外部介质折射率(SRI)敏感的光

纤光栅传感器已成为其在生化领域传感应用的热点之一^[1~10]。光纤光栅包括光纤布拉格光栅(FBG)

收稿日期: 2010-08-25; **收到修改稿日期**: 2010-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(50876120)和重庆市自然科学基金(CSTC,2010BB2298)资助课题。

作者简介: 罗彬彬(1981—),男,讲师,博士研究生,主要从事光纤 Bragg 光栅生化传感器技术方面的研究。

E-mail: luobinbin@cqut.edu.cn

导师简介: 周晓军(1952—),女,教授,博士生导师,主要从事光纤通信、光纤传感技术和光纤光栅理论等方面的研究。

E-mail: xjzhou@uestc.edu.cn

和长周期光纤光栅 (LPFG) 两种基本类型。虽然 FBG 本质上不像 LPFG 对 SRI 敏感, 但通过氢氟酸 (HF) 溶液腐蚀 FBG 的包层或部分纤芯, 可使其包层模或纤芯模的倏逝场与外部介质发生作用, 从而构成各种 FBG 折射率传感器。此外, FBG 的谐振带宽 (小于 1 nm) 较 LPFG 的 (大于 10 nm) 要小得多, 温度灵敏度较后者也低得多, 故它对 SRI 测量的精度在理论上较 LPFG 要高得多, 同时具有更好的温度不相关性。单端腐蚀 FBG 由 A. Iadicco^[11] 提出, 具有 SRI 与温度同时测量的功能。A. Iadicco^[11] 已描述单端腐蚀 FBG 的原理, 分析其在 SRI 从 1.333 到包层折射率范围内的 SRI 传感特性, 但没有深入分析其结构参数对 SRI 传感特性的影响。此外, 在大多数生化传感应用中, SRI 的变化多处于低折射率区 (约 1.333~1.360), 并希望传感器对 SRI 的测量应具有较好的线性特性, 该特性与单端腐蚀 FBG 的某些主要结构参数具有很大关系。

本文在文献[11]的研究基础上, 完善单端腐蚀 FBG 对 SRI 与温度同时测量的模型, 分析其主要结构参数对 SRI 传感特性的影响, 建立其在低折射率区对 SRI 测量的线性近似和理论误差分析方法。基于理论研究的结果, 设计一个单端腐蚀 FBG 传感器, 进行相应的实验研究。

2 理论模型及仿真

2.1 单端腐蚀 FBG 对折射率和温度同时测量理论

图 1 为单端腐蚀 FBG 的结构, 其结构参数包括: 被 HF 溶液腐蚀的光栅区的长度 L_{Th} 和直径 D_{Th} , 未被腐蚀的光栅区的长度 L_{Un} 及直径 D_{cl} (即包层直径), 光栅周期 Λ , 光栅的总长度 L_B , 纤芯的直

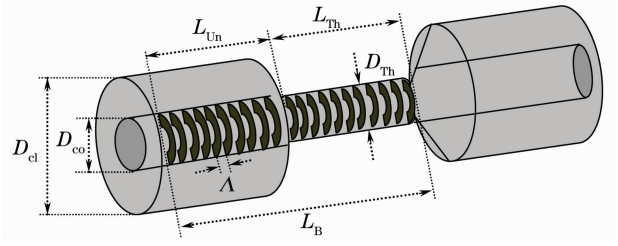


图 1 单端腐蚀 FBG 的结构示意图

Fig. 1 Configuration of the single-end etched FBG 径 D_{co} 。

图 1 的结构使得 FBG 的原始反射峰分裂为两个独立的反射峰, 其中一个对应未被腐蚀的光栅区, 其布拉格波长与原始布拉格波长基本重合, 且仅对温度敏感, 另外一个对应被腐蚀的光栅区, 其布拉格波长相对于原始布拉格波长向短波方向漂移了一段距离, 它不仅对温度敏感, 对 SRI 也敏感, 这是由于该光栅区纤芯模的倏逝场透射到外部介质中, 当 SRI 发生变化将引起纤芯模的有效折射率的改变, 从而使得其布拉格波长发生漂移^[6]。因此, 单端腐蚀 FBG 的谐振公式可表示为

$$\lambda_{Un} = 2n_{effUn}(T)\Lambda(T), \quad (1)$$

$$\lambda_{Th} = 2n_{effTh}(T, S_{RI})\Lambda(T), \quad (2)$$

式中 λ_{Un} 和 λ_{Th} 分别为未腐蚀区和腐蚀区的光栅的布拉格波长, n_{effUn} 和 n_{effTh} 分别为未腐蚀区和腐蚀区的基模 (LP₀₁/HE₁₁) 有效折射率, Λ 为光栅周期, T 为温度, S_{RI} 为外部介质折射率的值。

若假设两段光栅的热膨胀系数相等, 但由于腐蚀区的包层或纤芯的热光系数与外部介质的热光系数存在差别, 因此腐蚀区和未腐蚀区的温度灵敏度存在略微的差别^[11]。因此, 对 (1), (2) 式进行全微分可得

$$\Delta\lambda_{Un} = \lambda_{Un} \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial\Lambda}{\partial T} + \frac{1}{n_{effUn}} \frac{\partial n_{effUn}}{\partial T} \right) \Delta T = \lambda_{Un} (\alpha + \beta_{Un}) \Delta T = k_{Un} \Delta T, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_{Th} &= \lambda_{Th} \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial\Lambda}{\partial T} + \frac{1}{n_{effTh}} \frac{\partial n_{effTh}}{\partial T} \right) \Delta T + \lambda_{Th} \frac{1}{n_{effTh}} \left(\frac{\partial n_{effTh}}{\partial S_{RI}} \right) \Delta S_{RI} = \\ &= \lambda_{Th} (\alpha + \beta_{Th}) \Delta T + \lambda_{Th} \frac{1}{n_{effTh}} \left(\frac{\partial n_{effTh}}{\partial S_{RI}} \right) \Delta S_{RI} = k_{Th} \Delta T + g_{Th} \Delta S_{RI}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 α 为两段光栅的热膨胀系数 (假设相同), β_{Un} 和 β_{Th} 分别为未腐蚀区和腐蚀区的热光系数; k_{Un} 为未腐蚀区的温度灵敏度; 而 k_{Th} 与 g_{Th} 分别为腐蚀区的温度灵敏度和 SRI 灵敏度, 根据 (4) 式可表示为

$$k_{Th} = \lambda_{Th} (\alpha + \beta_{Th}), \quad (5)$$

$$g_{Th} = \lambda_{Th} \frac{1}{n_{effTh}} \left(\frac{\partial n_{effTh}}{\partial S_{RI}} \right) = 2\Lambda \left(\frac{\partial n_{effTh}}{\partial S_{RI}} \right). \quad (6)$$

根据 (6) 式, g_{Th} 可通过计算 $\partial n_{effTh} / \partial S_{RI}$ 获得, 且 g_{Th} 与光栅周期 Λ 成正比。显然, 如果已知单端腐蚀 FBG 的 k_{Un} , k_{Th} 和 g_{Th} 的值, 则可通过一个 2×2 矩阵计算 SRI 和温度的变化, 即

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta S_{\text{RI}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{\text{Un}} & 0 \\ k_{\text{Th}} & g_{\text{Th}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{\text{Un}} \\ \Delta\lambda_{\text{Th}} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

2.2 单端腐蚀 FBG 在低折射率区的折射率测量特性分析

计算(6)式中的 $\partial n_{\text{effTh}}/\partial S_{\text{RI}}$ 需使用光波导理论。其中对于包层部分腐蚀的单端腐蚀 FBG,计算腐蚀区 LP₀₁模的谐振波长 λ_{Th} 及有效折射率 n_{effTh} 应采用3层结构的光纤波导模型,如图2(a)所示。设 LP₀₁模的工作波长和有效折射率分别为 λ 与 n_{eff} ,则 LP₀₁模的色散方程可表示为^[12]

$$\frac{[\hat{J}_0(u) - \hat{K}_0(v'c)][\hat{K}_0(v) + \hat{I}_0(v')]}{[\hat{J}_0(u) + \hat{I}_0(v'c)][\hat{K}_0(v) - \hat{K}_0(v')]} = \frac{I_1(v'c)K_1(v')}{I_1(v')K_1(v'c)}, \quad (8)$$

$$u = (2\pi/\lambda)a(n_1^2 - n_{\text{eff}}^2)^{1/2}, \quad (9)$$

$$v' = (2\pi/\lambda)b(n_{\text{eff}}^2 - n_2^2)^{1/2}, \quad (10)$$

$$v = (2\pi/\lambda)b(n_{\text{eff}}^2 - S_{\text{RI}}^2)^{1/2}, \quad (11)$$

式中 a 为纤芯半径(对应图1中的 $D_{\text{co}}/2$), b 为腐蚀之后的包层半径(对应图1中的 $D_{\text{Th}}/2$), n_1 和 n_2 分

别为纤芯和包层的折射率, $c = a/b$, J 是第一类贝塞尔函数, I 是第一类变型的贝塞尔函数, K 是第二类变型的贝塞尔函数, \hat{J}_0, \hat{I}_0 和 \hat{K}_0 表示为^[12]

$$\hat{Z}_0(x) = \frac{Z_0(x)}{xZ_1(x)}. \quad (12)$$

对于包层完全腐蚀或纤芯部分腐蚀的单端腐蚀 FBG,计算腐蚀区 LP₀₁模的谐振波长 λ_{Th} 及有效折射率 n_{effTh} 应采用两层结构的光纤波导模型,如图2(b)所示,则 LP₀₁模的色散方程可以表示为^[13]

$$V\sqrt{1-B}\frac{J_1(V\sqrt{1-B})}{J_0(V\sqrt{1-B})} = V\sqrt{B}\frac{K_1(V\sqrt{B})}{K_0(V\sqrt{B})}, \quad (13)$$

$$V = (2\pi/\lambda)a\sqrt{n_1^2 - S_{\text{RI}}^2}, \quad (14)$$

$$B = \frac{(n_{\text{eff}}^2 - S_{\text{RI}}^2)}{(n_1^2 - S_{\text{RI}}^2)}, \quad (15)$$

式中 V 为光纤的归一化频率, B 为腐蚀区 LP₀₁模的归一化传播常数, a 为纤芯半径(对应图1中的 $D_{\text{Th}}/2$),其他参数与(8)~(12)式一致。

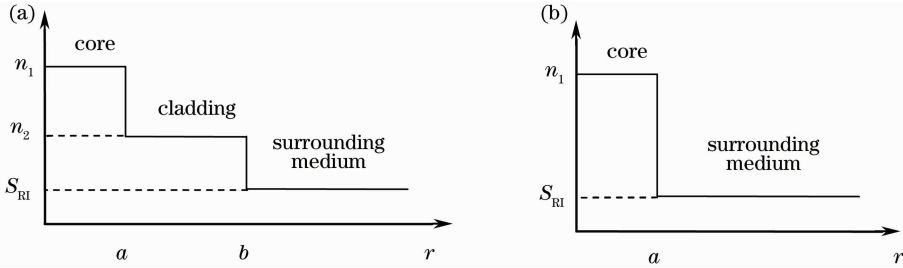


图2 (a) 三层结构和(b)两层结构光波导模型

Fig. 2 (a) Three-layer and (b) double-layer fiber waveguide model

对于特定的 S_{RI} ,找出同时满足(8)~(12)式和 FBG 谐振方程(即 $\lambda = 2n_{\text{eff}}\Lambda$)的 λ 与 n_{eff} 的值,即为包层部分腐蚀的光栅区的谐振波长 λ_{Th} 及有效折射率 n_{effTh} 。同样,找出同时满足(13)~(15)式和 FBG 谐振方程的 λ 与 n_{eff} 的值,即为包层完全腐蚀或纤芯部分腐蚀的光栅区的 λ_{Th} 及 n_{effTh} 。于是,可进一步计算出在所分析的 SRI 范围内每个 S_{RI} 对应的 $\partial n_{\text{effTh}}/\partial S_{\text{RI}}$,再由(6)式可得出单端腐蚀 FBG 的 g_{Th} 。

仿真中采用康宁公司的 SMF-28TM 光纤,具体参数为纤芯直径 $D_{\text{co}} = 8.3 \mu\text{m}$ 、包层直径 $D_{\text{cl}} = 125.0 \mu\text{m}$ 、纤芯和包层折射率分别为 $n_1 = 1.4682$, $n_2 = 1.46281$,设单端腐蚀 FBG 的主要结构参数为光栅周期分别为 $\Lambda = 525.0 \text{ nm}$ 和 540.0 nm ,腐蚀区直径分别为 $D_{\text{Th}} = 10.3, 8.1, 6.2 \mu\text{m}$, S_{RI} 变化范围设定在低折射率区 $1.333 \sim 1.355$,并假设温度不变。使用

以上参数进行仿真,其中当 $D_{\text{Th}} = 10.3 \mu\text{m}$ 时大于纤芯直径 D_{co} ,包层被部分腐蚀,因此采用3层结构光波导模型进行仿真,而当 $D_{\text{Th}} = 8.1 \mu\text{m}$ 和 $6.2 \mu\text{m}$ 时小于纤芯直径 D_{co} ($8.3 \mu\text{m}$),包层已被完全腐蚀,因此采用两层结构光波导模型进行仿真。腐蚀区的布拉格波长变化 $\Delta\lambda_{\text{Th}}$ 与 S_{RI} 的关系如图3(a)所示,相应的 $\partial n_{\text{effTh}}/\partial S_{\text{RI}}$ 及 g_{Th} 与 S_{RI} 的关系分别如图3(b),3(c)所示,其中riu表示折射率单位,即 refractive index unit 的缩写。

为了进一步比较不同结构参数单端腐蚀 FBG 的 SRI 传感特性,将图3(a),3(c)中的主要数据列于表1中,包括在 S_{RI} 变化范围内($1.333 \sim 1.355$)腐蚀区的布拉格波长的变化量 $\Delta\lambda_{\text{Th}}$ 和 SRI 灵敏度变化量 Δg_{Th} 。

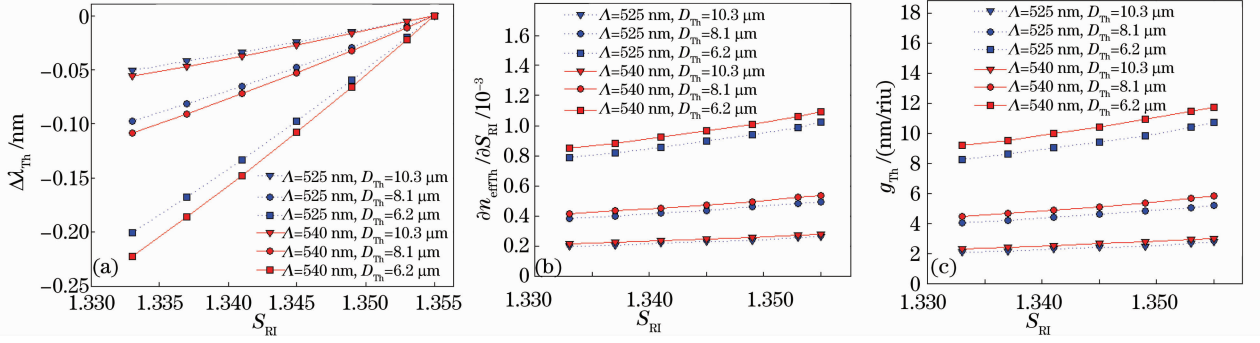


图 3 不同结构参数单端腐蚀 FBG 的腐蚀区仿真结果。(a)布拉格波长的变化 $\Delta\lambda_{Th}$ 与 S_{Ri} 的关系, (b) $\partial n_{effTh}/\partial S_{Ri}$ 与 S_{Ri} 的关系, (c) g_{Th} 与 S_{Ri} 的关系

Fig. 3 Simulated results of the etched region of single-end etched FBG with different structural parameters. (a) Bragg wavelength shifts $\Delta\lambda_{Th}$ versus the S_{Ri} , (b) $\partial n_{effTh}/\partial S_{Ri}$ versus the S_{Ri} , (c) g_{Th} versus the S_{Ri}

表 1 图 3(a), 3(c) 中主要数据 ($\Delta\lambda_{Th}$, Δg_{Th}) 及相应的 S_{Ri} 传感参数 ($\overline{g_{Th}}$, σg_{Th} , $\overline{\delta g_{Th}/g_{Th}}$)

Table 1 Primary data of Fig. 3 (a) and Fig. 3 (c) ($\Delta\lambda_{Th}$, Δg_{Th}) and S_{Ri} sensing parameters ($\overline{g_{Th}}$, σg_{Th} , $\overline{\delta g_{Th}/g_{Th}}$)

$D_{Th}/\mu m$	Λ / nm	$\Delta\lambda_{Th}/nm$	$\Delta g_{Th}/(nm/riu)$	$\overline{g_{Th}}/(nm/riu)$	$\sigma g_{Th}/(nm/riu)$	$\overline{\delta g_{Th}/g_{Th}}/\%$
10.3	525	-0.051	0.69	2.39	0.24	7.48
	540	-0.056	0.71	2.64	0.26	7.65
8.1	525	-0.098	1.16	4.60	0.44	7.74
	540	-0.110	1.35	5.12	0.49	7.79
6.2	525	-0.200	2.48	9.46	0.91	7.82
	540	-0.221	2.56	10.44	0.96	7.96

图 3(a) 表明, 在温度不变的情况下, 布拉格波长 λ_{Th} 随 S_{Ri} 的增大而增大, 这是由于 S_{Ri} 增大, 腐蚀区 LP_{01} 模的有效折射率 n_{effTh} 也增大^[14], 因此 λ_{Th} 发生红移。但从图 3(c) 可知, g_{Th} 并不是一个常数, 而是随 S_{Ri} 的增加也逐渐变大, 这是由于 S_{Ri} 越大, LP_{01} 模的功率向外部介质区域延伸得越多, 因此 λ_{Th} 受 S_{Ri} 的影响也就越大(即对 S_{Ri} 越敏感)。由图 3(a) 可见, λ_{Th} 随 S_{Ri} 的变化只是近似线性的。但由图 3(c) 与表 1 可知, g_{Th} 在低折射率区的变化很平缓, 若将 g_{Th} 的平均值 $\overline{g_{Th}}$ 看作传感器的 SRI 灵敏度在此折射率区内的设计值, 则图 3(a) 中 λ_{Th} 随 S_{Ri} 的变化可以认为是完全线性的。为了进行比较, 计算得出在此折射率区内的 g_{Th} 在理论上的方差 σg_{Th} 及平均相对误差 $\overline{\delta g_{Th}/g_{Th}}$ 也列于表 1 中。显然, $\overline{\delta g_{Th}/g_{Th}}$ 体现了传感器对 S_{Ri} 测量的理论误差, 即 $\overline{\delta g_{Th}/g_{Th}}$ 越大则理论误差越大; 而 Δg_{Th} 与 σg_{Th} 则体现了传感器对 S_{Ri} 测量的线性特性, 即 Δg_{Th} 或 σg_{Th} 越小则线性度越高。因此, 图 3 与表 1 的计算结果也表明, 可通过降低腐蚀区的光栅直径 D_{th} 或选择光栅周期较大的 FBG 制作传感器来提高其 SRI 灵敏度(即 $\overline{g_{Th}}$), 但这不仅会增大传感器的 SRI 灵敏度的理论误差, 还会降低传感器的线性度。因此, 在应用中应根据实

际情况综合考虑 SRI 灵敏度、线性度及理论误差的因素来设计传感器的腐蚀区光栅直径 D_{th} 及光栅周期 Λ 等结构参数。

3 实验及讨论

3.1 单端腐蚀 FBG 的设计与制作

实验中 FBG 的制作采用康宁公司的 SMF-28TM 光纤(具体参数与仿真中使用的光纤参数一致), FBG 的光栅周期与布拉格波长分别为 535.85 nm 和约 1550.2 nm。考虑到 SRI 灵敏度和线性度两个矛盾的因素, 所设计的单端腐蚀 FBG 的结构参数如表 2 所示。

表 2 单端腐蚀 FBG 的结构参数设计

Table 2 Designed values of the structural parameters of the single-end etched FBG

Structural parameter	Value
$D_{co}/\mu m$	8.3
$D_{cl}/\mu m$	125.0
L_B/mm	5
L_{Un}/mm	3
L_{th}/mm	2
$D_{th}/\mu m$	7.2
Λ / nm	535.85

制作单端腐蚀 FBG 的装置如图 4(a) 所示, 使用环氧树脂粘贴 FBG 两端将其固定在有机玻璃支架上, 并通过单模光纤连接至光纤光栅解调系统(型号: MOI_SM-125, 波长分辨率: 1 pm, 频率: 1 Hz, 集成扫频激光光源: 1510~1590 nm), 将 FBG 一端长为 2 mm 的光栅部分(裸栅, 无涂覆层)浸入盛有质量分数为 20% 的 HF 溶液的有机玻璃容器中, 而另外一端长度为 3 mm 的光栅部分(覆 polyimide 涂覆层, 以保护光栅不被 HF 腐蚀)暴露于空气中, 实验中, 通过光纤光栅解调系统监测 FBG 的布拉格波长变化。实

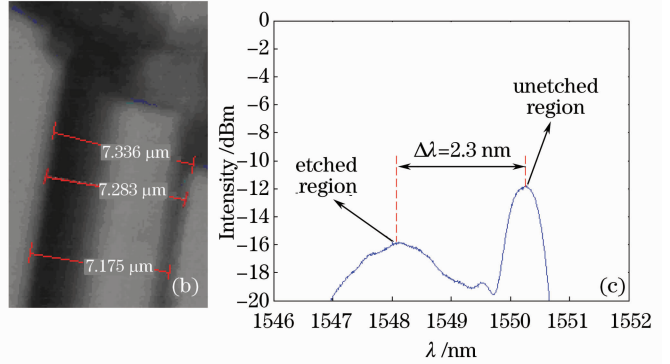
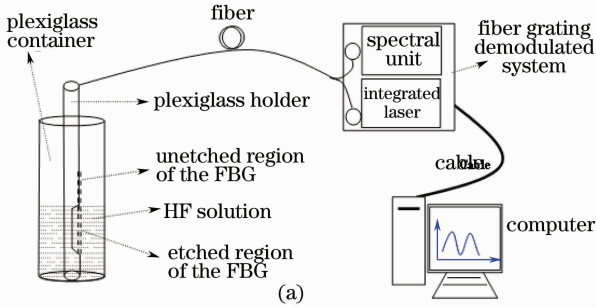


图 4 单端腐蚀 FBG 的(a)制作装置, (b)腐蚀区与未腐蚀区之间的连接区域的显微结构图和(c)反射谱

Fig. 4 (a) Setup for the fabrication, (b) micro-structure image of the pontes between the etched and unetched region and (c) reflectance spectrum of the single-end etched FBG

3.2 单端腐蚀 FBG 的标定及讨论

将制作好的单端腐蚀 FBG 置入恒温箱中进行温度标定, 结果如图 5(a) 所示。使用图 4(a) 的装

置, 将不同折射率值的折射率匹配液分别换置于有机玻璃容器中, 对单端腐蚀 FBG 进行折射率标定, 结果如图 5(b) 所示。

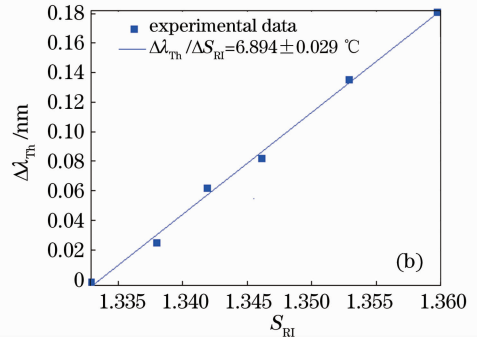
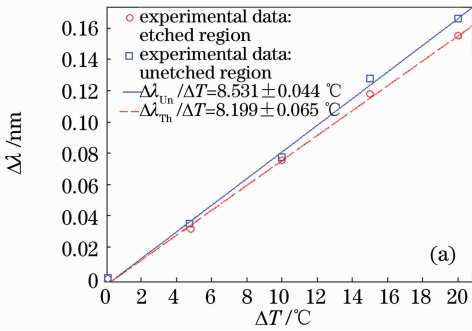


图 5 实验结果。单端腐蚀 FBG 的(a)温度标定数据和(b)折射率标定数据

Fig. 5 Experimental results. (a) temperature calibration and (b) SRI calibration for the single-end etched FBG

所设计的腐蚀区直径 $D_{th} = 7.2 \mu\text{m}$ 小于纤芯直径 D_{co} ($8.3 \mu\text{m}$), 包层已被完全腐蚀, 因此采用两层结构光波导模型及表 2 中的结构参数进行仿真, 可计算出该单端腐蚀 FBG 的 SRI 传感参数的理论值, 如表 3 所示。

由图 5 可知, 该单端腐蚀 FBG 的未腐蚀区和腐蚀区的温度系数分别为 $k_{un} = 8.531 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 和 $k_{th} =$

$8.199 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, 在 S_{RI} 为 $1.333 \sim 1.355$ 范围内的 $g_{th} = 6.894 \text{ nm}/\text{riu}$, 与表 3 中的理论仿真值 ($\overline{g_{th}} = 6.83 \text{ nm}/\text{riu}$) 基本吻合, 说明本文所建立的线性近似理论模型是合理的。参照(7)式, 可得该单端腐蚀 FBG 的 2×2 矩阵可表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta S_{RI} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8.531 & 0 \\ 8.199 & 6.894 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{un} \\ \Delta \lambda_{th} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

表 3 单端腐蚀 FBG 的 SRI 传感参数(理论仿真值)

Table 3 SRI sensing parameters of the single-end etched FBG(simulated values)

SRI sensing parameter	Value
$\Delta\lambda_{Th}/nm$	0.145
$\Delta g_{Th}/(nm/riu)$	1.72
$\overline{g_{Th}}/(nm/riu)$	6.83
$\sigma g_{Th}/(nm/riu)$	0.65
$\overline{\delta g_{Th}}/g_{Th}/\%$	7.80

考虑表 3 中 g_{Th} 的平均相对误差理论值(即 $\overline{\delta g_{Th}}/g_{Th}=7.80\%$),当光谱分析仪的波长分辨率为 1 pm 时,由(16)式可以得出该单端腐蚀 FBG 在 1.333~1.355 的 S_{RI} 范围内,能够测量的最小折射率变化 ΔS_{RI} 与最小温度变化 ΔT 分别为 $0.012\% \pm 0.0009\%$ (对应 SRI 分辨率为 10^{-4} 量级)与 $0.12\text{ }^\circ\text{C}$ 。

4 结 论

单端腐蚀 FBG 具有折射率与温度同时测量的功能,结构紧凑以及折射率灵敏度高的优点,当其应用于生化领域的传感时能够在线测量与折射率有关的各种被测量及温度的连续信息。本文通过研究单端腐蚀 FBG 在低折射率区(约 1.333~1.360)的折射率与温度同时测量的理论模型,分析其主要结构参数对折射率测量的灵敏度和线性度的影响,建立相应的折射率测量的线性近似和误差分析方法。结果表明,在单端腐蚀 FBG 设计中,可以通过减小其腐蚀区的光栅直径(即 D_{th})或选择光栅周期较大的 FBG 制作传感器来提高其折射率灵敏度,但这同时会增大其折射率灵敏度的理论误差和降低传感器的线性度。

参 考 文 献

1 Yun Binfeng, Chen Na, Cui Yiping. Refractive index sensing characteristics of fiber Bragg grating based on cladding mode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1013~1015

恽斌峰,陈娜,崔一平.基于包层模的光纤布拉格光栅折射率传感特[J].光学学报,2006,**26**(7):1013~1015

2 Na Chen, Binfeng Yun, Yiping Cui. Cladding mode resonances of etch-eroded fiber Bragg grating for ambient refractive index sensing [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**: 133902-1

3 Xu Junjiao, Li Jie, Rong Huabei *et al.*. Analysis and measurement on refractive index sensing of few mode fiber Bragg gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 565~568

徐俊娇,李杰,戎华北等.少模光纤布拉格光栅折射率传感的分析与测量[J].光学学报,2008,**28**(3):565~568

4 Miao Yinping, Liu Bo, Zhao Qida. Refractive index sensing characteristic of tilted fiber Bragg gratings with different cladding-diameter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2072~2076

苗银萍,刘波,赵启大.不同包层直径的倾斜光纤光栅折射率传感特性[J].光学学报,2008,**28**(11):2072~2076

5 Heather J. Patrick, Alan D. Kersey, Frank Bucholtz. Analysis of the response of long period fiber gratings to external index of refraction [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(9): 1606~1612

6 A. Iadicicco, A. Cusano. Thinned fiber Bragg gratings as high sensitivity refractive index sensor [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(4): 1149~1151

7 X. W. Shu, B. A. L. Gwandu, Y. Liu *et al.*. Sampled fiber Bragg grating for simultaneous refractive-index and temperature measurement [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(11): 774~776

8 X. F. Huang, Z. M. Chen, L. Y. Shao *et al.*. Design and characteristics of refractive index sensor based on thinned and microstructure fiber Bragg grating [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(4): 504~511

9 Kaiming Zhou, Xianfeng Chen, Lin Zhang *et al.*. Implementation of optical chemsensors based on HF-etched fibre Bragg grating structures [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2006, **17**(5): 1140~1145

10 A. Iadicicco, S. Campopiano, A. Cutolo *et al.*. Refractive index sensor based on microstructured fiber Bragg grating [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(6): 1250~1252

11 A. Iadicicco, S. Campopiano, A. Cutolo *et al.*. Nonuniform thinned fiber Bragg gratings for simultaneous refractive index and temperature measurements [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(7): 1495~1497

12 Michel Monerie. Propagation in doubly clad single-mode fibers [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, **18**(4): 535~542

13 T. Erdogan. Cladding-mode resonances in short- and long-period fiber grating filters [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(8): 1760~1773

14 Zhang Xia, Xia Yuehui, Huang Yongqing *et al.*. Analysis of shift in Bragg wavelength of fiber Bragg gratings with finite cladding radius [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(2): 222~224

张霞,夏月辉,黄永清等.有限包层半径光纤 Bragg 光栅的理论研究[J].光子学报,2003,**32**(2):222~224