

# 腐蚀薄包层布拉格光纤光栅折射率传感研究

王旭东, 顾宏\*, 廖帮全, 张海明, 张新陆, 杨丹, 王文彬

天津工业大学, 物理科学与技术学院, 天津

Email: \*guhong1120@163.com

收稿日期: 2021年1月26日; 录用日期: 2021年2月3日; 发布日期: 2021年3月8日

## 摘要

本文对腐蚀薄包层光纤布拉格光栅折射率传感的理论进行了分析, 并利用该理论进行了折射率测量的实验研究。首先在理论上, 基于光纤三层结构模型, 分析了Bragg波长与光纤直径的关系, 同时计算了不同光纤直径下, Bragg波长与环境折射率的变化关系, 得到不同直径的薄包层光纤光栅的折射率响应曲线。模拟计算结果表明, Bragg波长与环境折射率变化呈非线性关系, 直径更小的光纤传感器拥有更高的灵敏度, 在1.333~1.462的折射率范围中, 腐蚀到纤芯的薄包层光纤光栅折射率传感器灵敏度约为22 nm/RIU, 这是在理论上, 该类传感器在特定折射率范围内的最大灵敏度。随后在实验中, 通过对一个布拉格光纤光栅分三个阶段腐蚀, 得到了三个不同直径( $32 \mu\text{m}$ ,  $14 \mu\text{m}$ ,  $8.45 \mu\text{m}$ )的薄包层光纤布拉格光栅折射率传感器, 记录了腐蚀过程中反射光谱的变化, 并分别进行了折射率传感实验。实验结果表明, 在 $1.33300\sim1.42789$ 的折射率范围内, 传感器的平均灵敏度分别为 $0.246 \text{ nm/RIU}$ 、 $1.319 \text{ nm/RIU}$ ,  $6.332 \text{ nm/RIU}$ , 考虑到 $0.02 \text{ nm}$ 光谱分辨率, 计算得到的折射率分辨率值为 $0.08 \text{ RIU}$ 、 $0.015 \text{ RIU}$ 、 $0.00316 \text{ RIU}$ 。最后, 对于理论与实验结果存在微小的差异, 即理论模型没有能够预测Bragg波长红移这一趋势, 本文也提出了新的见解。

## 关键词

光纤布拉格光栅, 腐蚀, 折射率传感

# Study on Refractive Index Sensing of Etched Thin Cladding Fiber Bragg Grating

Xudong Wang, Hong Gu\*, Bangquan Liao, Haiming Zhang, Xinlu Zhang, Dan Yang, Wenbin Wang

School of Physical Science and Technology, Tiangong University, Tianjin

Email: \*guhong1120@163.com

Received: Jan. 26<sup>th</sup>, 2021; accepted: Feb. 3<sup>rd</sup>, 2021; published: Mar. 8<sup>th</sup>, 2021

\*通讯作者。

## Abstract

In this paper, the theory of refractive index sensing of etched thin-cladding optical fiber Bragg grating is analyzed, and the experimental study of refractive index measurement is carried out using the theory. Firstly, in the theory, the relationship between Bragg wavelength and fiber diameter is analyzed based on the three-layer structure model of the fiber, and the variation of Bragg wavelength with ambient refractive index is also calculated for different fiber diameters to obtain the refractive index response curves of thin-cladding fiber gratings with different diameters. The simulation results show that there is a nonlinear relationship between the Bragg wavelength and the change of the ambient refractive index. The smaller diameter of the fiber sensor has a higher sensitivity. In the refractive index range of 1.333~1.462, the sensitivity of the thin-cladding fiber grating refractive index sensor etched to the core is about 22 nm/RIU, which is theoretically the maximum sensitivity of this kind of sensor in the specific refractive index range. Then in the experiment, three thin-clad fiber grating refractive index sensors with different diameters (32  $\mu\text{m}$ , 14  $\mu\text{m}$ , 8.45  $\mu\text{m}$ ) are obtained by etching a Bragg fiber grating in three stages. The change of reflection spectrum during the etching process is recorded, and the refractive index sensing experiments are carried out respectively. The experimental results show that the average sensitivity of the sensor is 0.246 nm/RIU, 1.319 nm/RIU and 6.332 nm/RIU in the refractive index range of 1.33300~1.42789. Considering the spectral resolution of 0.02 nm, the calculated refractive index resolution is 0.08 RIU, 0.015 RIU and 0.00316 RIU. Finally, a new opinion is put forward for the slight difference between the theoretical and experimental results, that is, the theoretical model cannot predict the trend of red shift of Bragg wavelength.

## Keywords

Fiber Bragg Grating, Etching, Refractive Index Sensing

---

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

折射率是物质的基本属性之一，可间接地反映物质的许多物化特性，对折射率的精确测量在生物、化学、食品、环境等众多领域中至关重要[1]。光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)自1978年问世以来，很快就在通信和传感领域得到了广泛的应用[2]。在传感领域，从最基础的温度和应变传感开始，到土木工程和航空船舶领域的拓展应用，再到高温强电强辐射环境中的实时监测，直至折射率传感领域，FBG的应用领域不断扩大[3]。在众多光纤折射率传感方案中，FBG折射率传感方案除了拥有着光纤本身抗电磁干扰、结构简单灵活的天然优势，又有着其独特的特点：结构上，FBG折射率传感结构易于制成反射式的探针，使得折射率测量操作非常便捷。解调方式上，FBG折射率传感是波长解调，具有远高于光强解调的稳定性，其他方面的特点包括反射波半高宽小，便于复用构成分布式传感网络等等。

众所周知，普通的FBG对环境折射率并没有明显的响应，要作为折射率传感器，需要对FBG进行额外的加工处理。1998年，瑞士皇家物理研究院的Asseh等人首次提出光纤布拉格光栅折射率传感方案[4]。他们将一根FBG直径腐蚀到11  $\mu\text{m}$ ，当环境折射率接近光纤包层折射率时，最大折射率分辨率可达 $10^{-5}$  RIU (refractive index unit, 折射率单位, 无量纲)。通过化学腐蚀使FBG直径减小的方法，成本低，操作简单，一直到今天仍然是研究人员在实验室低成本制备微结构光纤的主要方法之一。其缺点是腐蚀

通常用到的 HF 酸溶液属于危化品，使用过程中可能会对操作人员造成不必要的伤害。为此在 2001 年，Schroeder 等人首次提出侧面抛磨 FBG 方案，同样可使光纤倏逝场暴露在环境中，使得 FBG 的共振波长即 Bragg 波长与环境折射率相关，但侧面抛磨光纤需要特定的精密仪器才能保证抛磨质量[5]。腐蚀法和抛磨法可实现直径为微米量级的 FBG 折射率传感器，而随着光纤微纳加工技术的发展和微纳光纤的提出[6]，研究人员开始用拉锥法和飞秒激光微纳加工技术制作 FBG 折射率光纤传感器，低至几百纳米的微纳 FBG 得以实现更好的传感性能，满足高灵敏度高分辨率的应用场景[7]。然而，上述 FBG 折射率传感器在实际应用中具有共同的缺点，即机械强度过低，重复利用次数有限。

薄包层 FBG 折射率传感器指仍然保留光纤包层的 FBG 折射率传感器，相比于腐蚀到只有纤芯的 FBG，具有更好的机械强度和化学稳定性，在我们之前测量染料溶液浓度的工作中，已经证明了其在折射率传感中具有现实意义[8]，在此基础上，本文进一步对薄包层 FBG 折射率传感器进行一个从理论到实验的全方面的研究。首先在理论上论述了薄包层 FBG 折射率传感的原理，分析了在光纤三层结构模型下，Bragg 波长与光纤直径的关系，同时计算出随着环境折射率的变化，不同直径的 FBG 的折射率响应曲线。之后在实验中，通过对一个 FBG 进行三个阶段的腐蚀，得到三个不同直径的薄包层 FBG 折射率传感器，记录了腐蚀过程中反射光谱的变化，并将每个阶段的 FBG 用于甘油溶液的检测。实验结果与理论分析基本吻合，但也存在微小偏差，对这一微小偏差进行了深入讨论和分析。

## 2. 薄包层 FBG 折射率传感原理和仿真

FBG 是一种能够反射特定中心波长的光无源器件，特定中心波长即布拉格(Bragg)波长  $\lambda_B$  由下式给出：

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \Lambda \quad (1)$$

其中， $\Lambda$  为光栅周期， $n_{\text{eff}}$  为纤芯模的有效折射率，在普通的单模光纤中，纤芯模的能量主要分布在纤芯中，其有效折射率几乎与环境折射率无关。当光栅所在区域的光纤直径减小到一定程度时，纤芯模能量分布发生变化，模场范围扩大到纤芯之外的环境当中，使得纤芯模有效折射率受到环境折射率的影响，从而引起 Bragg 波长的移动。通过监测 Bragg 波长的移动，就可以得到环境折射率的变化情况，这就是 FBG 折射率传感的原理。

为定量分析 Bragg 波长与光纤直径以及环境折射率的关系，需要从光纤的色散方程出发，求解不同参数下  $n_{\text{eff}}$  的变化，进一步根据公式(1)计算得到 Bragg 波长的变化情况。对于薄包层 FBG，光纤包层仍然存在，应当采用如图 1 所示的光纤三层结构模型，其色散方程为[9]

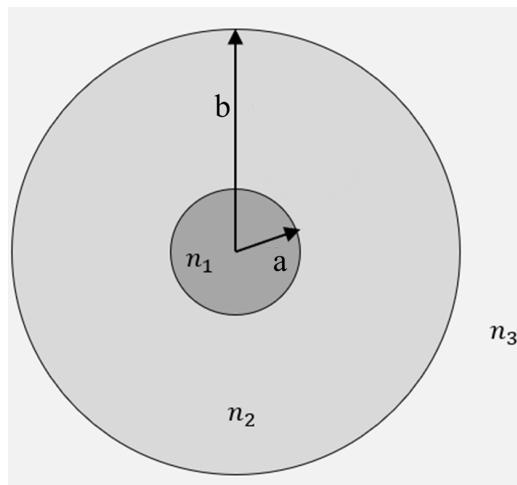
$$\begin{cases} \frac{\left[ \hat{J}_m(u) - \hat{Y}_m(u'c) \right] \left[ \hat{K}_m(v) - \hat{J}_m(u') \right]}{\left[ \hat{J}_m(u) - \hat{J}_m(u'c) \right] \left[ \hat{K}_m(v) - \hat{Y}_m(u') \right]} = \frac{\hat{J}_{m+1}(u'c) \hat{Y}_{m+1}(u')}{\hat{J}_{m+1}(u') \hat{K}_{m+1}(u'c)} & (\beta < k_0 n_2) \\ \frac{\left[ \hat{J}_m(u) - \hat{K}_m(wc) \right] \left[ \hat{K}_m(v) + \hat{I}_m(w) \right]}{\left[ \hat{J}_m(u) + \hat{I}_m(wc) \right] \left[ \hat{K}_m(v) - \hat{K}_m(w) \right]} = \frac{\hat{I}_{m+1}(wc) \hat{K}_{m+1}(w)}{\hat{I}_{m+1}(w) \hat{K}_{m+1}(wc)} & (\beta > k_0 n_2) \end{cases} \quad (2)$$

其中  $\hat{Z}_m(x) = Z_m(x)/xZ_{m+1}(x)$  ( $Z$  代表贝赛尔函数  $J$ ,  $Y$ ,  $I$ ,  $K$ )， $c = a/b$

$$\begin{aligned} u &= a \left( k_0^2 n_1^2 - \beta^2 \right)^{1/2} \\ u' &= b \left( k_0^2 n_2^2 - \beta^2 \right)^{1/2} \\ w &= b \left( \beta^2 - k_0^2 n_2^2 \right)^{1/2} \\ v &= b \left( \beta^2 - k_0^2 n_3^2 \right)^{1/2} \end{aligned} \quad (3)$$

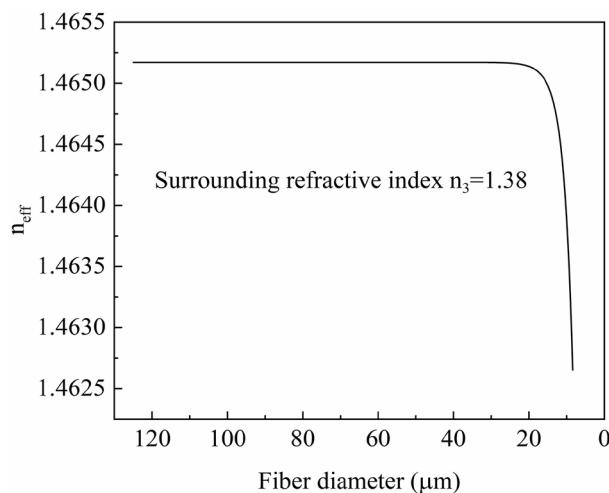
这里，光波模式的传播常数  $\beta = (2\pi/\lambda)n_{\text{eff}}$ ， $J_m$ ,  $Y_m$ ,  $I_m$ ,  $K_m$  分别为第一类、第二类 Bessel 函数

及修正的第一类、第二类 Bessel 函数;  $a$ 、 $b$  分别为纤芯与包层半径,  $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$  分别为纤芯、包层以及环境折射率。该色散方程为带有贝塞尔函数的超越方程, 仿真计算时采用标准的 Coning SMF-28 单模光纤参数:  $a = 4.15 \mu\text{m}$ ,  $b = 62.5 \mu\text{m}$ ,  $n_1 = 1.4681$ ,  $n_2 = 1.4628$ 。考虑到纤芯模的传播常数  $\beta > k_0 n_2$ , 本文采用公式(2)中的第二个公式, 并将其化简以便用 vpasolve 函数进行数值求解。



**Figure 1.** Three layer structure model of optical fiber  
**图 1.** 光纤三层结构模型

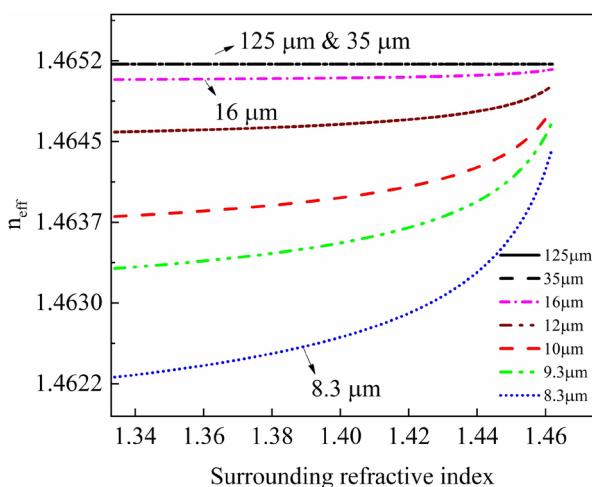
图 2 给出了  $n_{\text{eff}}$  与光纤直径变化( $125 \mu\text{m} \sim 8.4 \mu\text{m}$ )的理论关系曲线, 考虑到实验中是通过氢氟(HF)酸溶液腐蚀减小光纤直径, 计算时采用的环境折射率  $n_3 = 1.38$ , 这是浓度为 40% 的 HF 酸溶液的折射率近似值。从计算结果可以看出, 在光纤包层减小的过程中,  $n_{\text{eff}}$  在直径范围  $125 \mu\text{m}$  到  $20 \mu\text{m}$  之间基本保持不变, 当包层直径减小到  $30 \mu\text{m}$  左右,  $n_{\text{eff}}$  开始减小, 对应 Bragg 波长的蓝移。当光纤包层几乎完全消失时,  $n_{\text{eff}}$  的变化量约为  $2.5 \times 10^{-3}$ 。对于中心波长在  $1550 \text{ nm}$  附近, 周期约为  $530 \text{ nm}$  的 FBG 来说, 对应的 Bragg 波长的蓝移量为  $2.65 \text{ nm}$ 。利用此特性可实现对腐蚀过程中光纤直径的监控和控制。



**Figure 2.** The relationship between the effective refractive index of the fiber core mode and the fiber diameter, the surrounding refractive index  $n_3$  is set to 1.38

**图 2.** 纤芯模有效折射率与光纤直径的关系, 环境折射率  $n_3$  设定为 1.38

图 3 给出不同直径光纤下的  $n_{\text{eff}}$  与环境折射率(1.333~1.462)的关系, 从图中可以得出的结论有, 第一,  $n_{\text{eff}}$  随着环境折射率的增加而增加, 并在模拟的整个折射率范围内与之呈现非线性的关系, 反映到 Bragg 波长的变化, 根据  $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$ , 波长随着环境折射率的增加而发生红移; 第二, 对于直径一定的光纤,  $n_{\text{eff}}$  在环境折射率大的范围内有更高的折射率灵敏度; 第三, 光纤直径越小, 其  $n_{\text{eff}}$  对环境折射率的灵敏度越高, 且包层直径的减小对于折射率灵敏度的提高, 也是非线性的。这体现在图中光纤直径为 125  $\mu\text{m}$  和 35  $\mu\text{m}$  时, 两条曲线重合在一起,  $n_{\text{eff}}$  对环境折射率几乎没有任何响应。而当光纤直径继续减小, 折射率灵敏度迅速提升。在光纤直径减小到 16  $\mu\text{m}$  时,  $n_{\text{eff}}$  开始出现折射率敏感, 当光纤直径为 8.3  $\mu\text{m}$  时, 光纤包层被全部腐蚀掉, 此时  $n_{\text{eff}}$  在模拟的折射率范围内增加了约  $2.7 \times 10^{-3}$ , 若 FBG 周期为 530 nm, 则对应的 Bragg 波长变化为 2.862 nm, 在 1.333~1.462 的折射率范围内, 平均灵敏度约为 22 nm/RIU。这是薄包层 FBG 折射率传感器在此折射率范围内的最大理论灵敏度。



**Figure 3.** Relationship between effective refractive index of fiber core mode and surrounding refractive index under different fiber diameters

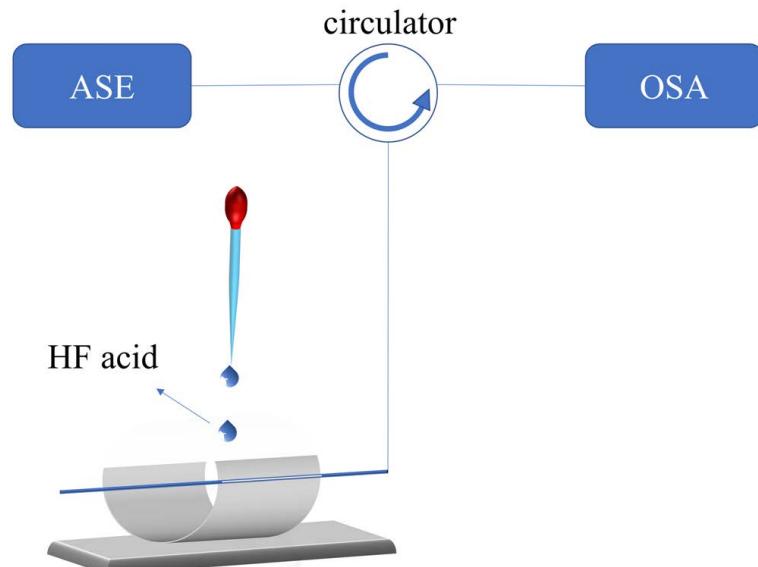
**图 3.** 不同光纤直径下纤芯模有效折射率与环境折射率的关系

### 3. 薄包层 FBG 折射率传感测量实验研究

#### 3.1. FBG 腐蚀实验

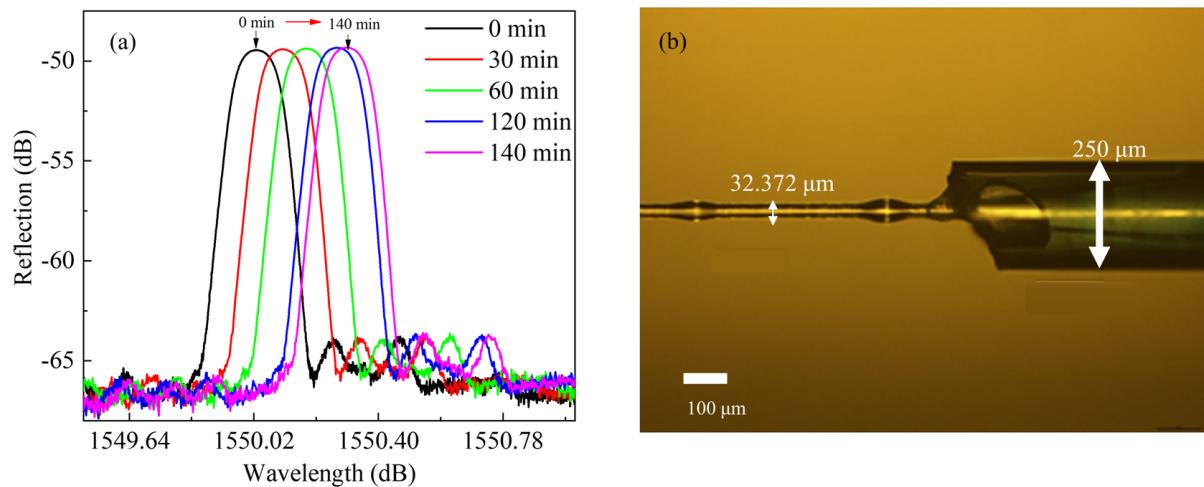
FBG 腐蚀实验的关键是能够尽可能的精准控制腐蚀光纤的直径。在缺少在线显微观测设备的情况下, 可以通过重复性的腐蚀光纤实验, 获得特定 HF 酸浓度对于光纤的腐蚀速率经验值, 然后估计实际腐蚀 FBG 的直径。这种方式的缺点在于可靠性有限。由上一节的理论分析可知, FBG 直径与其对应的 Bragg 波长有着明确的关系, 所以在实验中可以通过监测 Bragg 波长的变化来估计腐蚀 FBG 的直径。以 Bragg 波长蓝移为节点, 分三个阶段, 即 Bragg 波长蓝移前, 刚开始蓝移以及蓝移后, 对同一 FBG 进行腐蚀, 从而获得三个不同直径的 FBG 折射率传感器, 分别测试其折射率传感特性。为了能在腐蚀过程中实时的监测 Bragg 波长的变化情况, 采用如图 4 所示的光谱监测系统, 系统主要由放大自发辐射(Amplified Spontaneous Emission, ASE)光源, 三端口环形器(circulator), 封装好的 FBG 折射率传感器, 以及光谱分析仪(Optical Spectrum Analyzer, OSA)组成。其中, FBG 封装装置由一个聚丙稀离心管改装而成, 用热熔胶将 FBG 拉紧, 固定在半圆筒的两端, 特别要注意的是, 两端的热熔胶要与圆筒壁紧密贴合, 形成封闭

的液体容器结构。该封装方式可容纳液体体积约 3 ml，可有效进行腐蚀和折射率测量实验的同时，尽可能的减少了折射率匹配液和 HF 酸溶液的使用量(不超过 3 ml)，是一种成本极低的环境友好型封装方式。



**Figure 4.** Spectrum monitoring system of optical fiber refractive index sensor  
**图 4.** 光纤折射率传感器的光谱监测系统

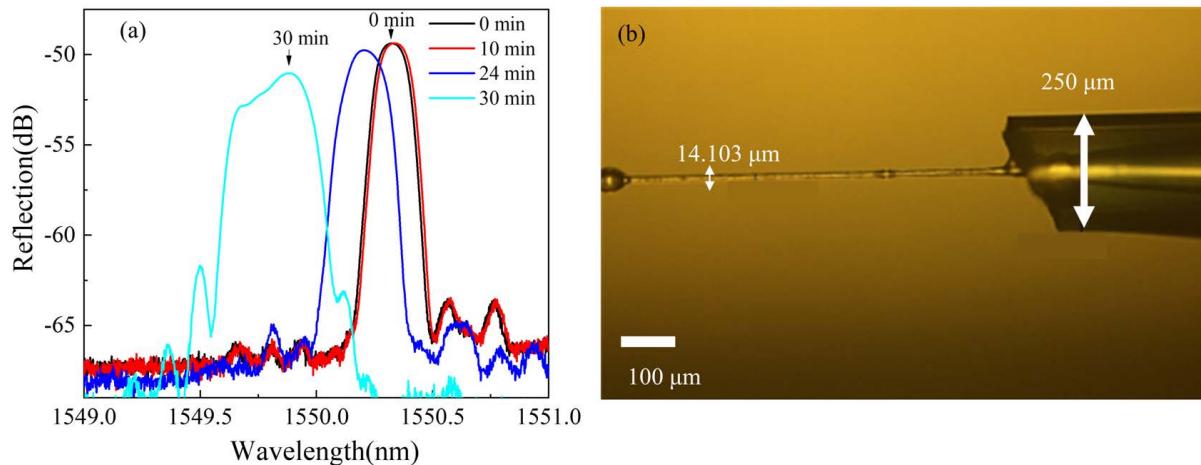
腐蚀第一阶段，用一 2 ml 的塑料吸管向封装 FBG 的半圆筒中加入稀释的 HF 酸溶液(40% 的 HF 酸溶液与去离子水的体积比为 1:2)，用无尘塑料纸覆盖半圆筒，减少 HF 酸溶液挥发对人体健康安全的威胁。腐蚀过程中实时观察光谱移动情况，每 10 min 记录一次光谱图。**图 5(a)** 为腐蚀开始后 0~140 min 期间五个时间点的光谱。在腐蚀 140 min 后将 FBG 封装装置取下，在去离子水中漂洗多次。去除残留的 HF 溶液，放置在光学显微镜下观察，如**图 5(b)** 所示，此时光纤直径约为 32  $\mu\text{m}$ 。之后进行后面提到的折射率传感实验，为便于讨论，将第一阶段腐蚀得到的 FBG 命名为 FBG1。



**Figure 5.** (a) The change of spectrum with corrosion time in the first stage of etching (b) micrograph of FBG1  
**图 5.** (a) 第一阶段腐蚀过程中光谱随腐蚀时间的变化；(b) FBG1 显微图

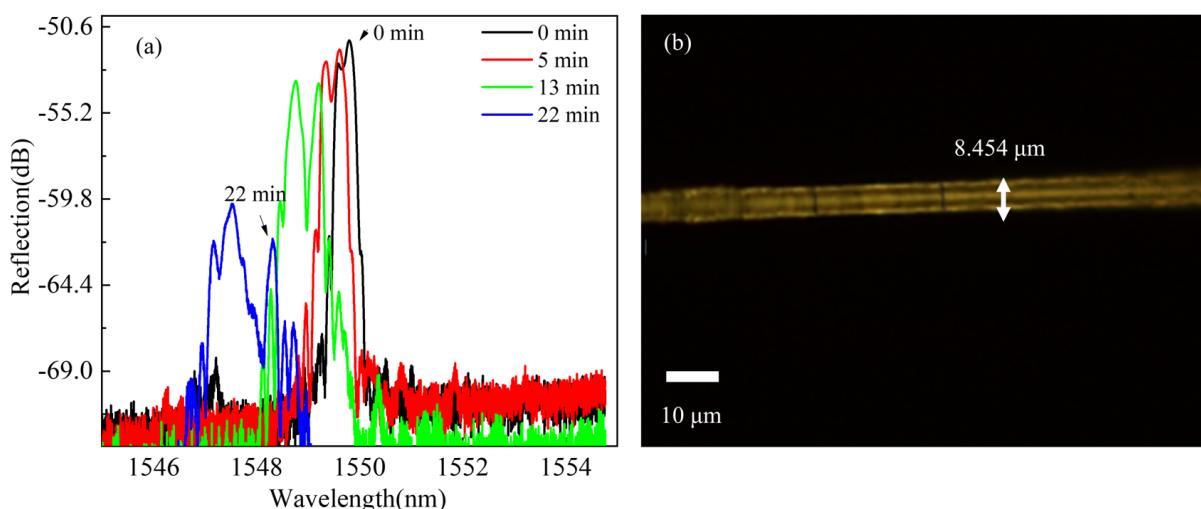
完成第一阶段的折射率传感实验后，继续腐蚀 FBG1，进行第二阶段的腐蚀。为了能够获得相对光

滑的光纤表面,进一步稀释HF溶液,使得40%的HF酸溶液与去离子水的体积比为1:4。腐蚀30 min后,Bragg波长相对未腐蚀的FBG蓝移,此时停止腐蚀。图6为第二阶段FBG反射光谱的变化情况与腐蚀完成后的显微图,此时半径减小到14  $\mu\text{m}$ 左右,将其命名为FBG2并重复同FBG1一样的折射率传感实验。



**Figure 6.** (a) The change of spectrum with corrosion time in the second stage of etching (b) micrograph of FBG2  
**图 6.** (a) 第二阶段腐蚀过程中光谱随腐蚀时间的变化; (b) FBG2 显微图

在第二阶段的腐蚀过程中注意到两点,第一, Bragg 波长蓝移的速度较快,为了能够更加精确的控制腐蚀程度,第三阶段采用的腐蚀液进一步稀释,40%的HF酸溶液与去离子水的体积比为1:7。第二,反射波形“展宽”,事实上,这是高阶模式开始在基模左边出现,高阶模式会随着腐蚀的进行与基模分离开,在第三阶段的腐蚀过程中会更明显的观察到这一现象。为获得薄包层FBG传感器,根据理论模拟可知,腐蚀到包层时,Brass波长会蓝移2.65 nm。由于用去离子水冲洗FBG使其完全停止腐蚀需要几分钟的时间,最终选择将Brass波长的蓝移量控制在2 nm以内,以防止腐蚀过度。最终,第三阶段的腐蚀持续了22 min,光谱变化和显微图如图7所示。最终得到直径约8.45  $\mu\text{m}$ 的薄包层FBG折射率传感器,命名为FBG3。

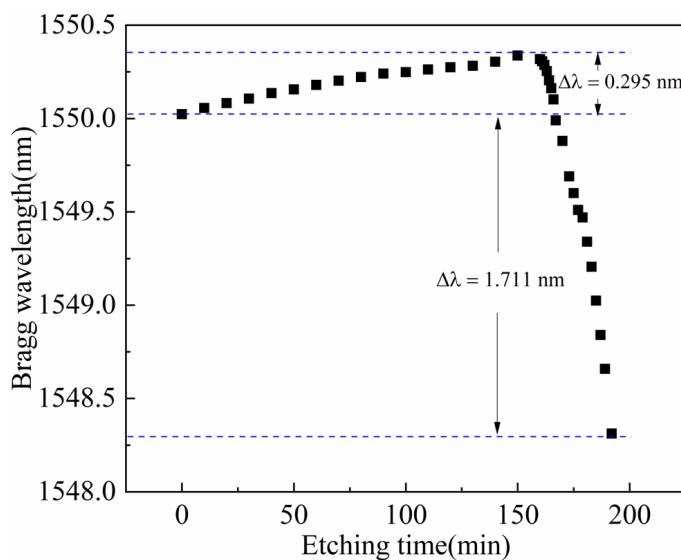


**Figure 7.** (a) The change of spectrum with corrosion time in the third stage of etching (b) micrograph of FBG3  
**图 7.** (a) 第三阶段腐蚀过程中光谱随腐蚀时间的变化; (b) FBG3 显微图

图8为整个腐蚀过程当中,Brass波长随腐蚀时间的变化规律。可以看出,Brass波长随着腐蚀的进

行，呈现出先缓慢红移再快速蓝移的变化规律，红移量为 0.295 nm，蓝移量 1.711 nm。蓝移阶段与前面的理论模拟基本吻合，然而理论模拟没有能够预测红移这一趋势。很多研究人员在类似的实验中发现这一现象[10] [11] [12]，报道的红移量在 0.3~0.7 nm 之间。他们对于红移原因的猜想和解释趋于一致：腐蚀是一个化学放热过程，局部温度的升高导致了 Bragg 波长的红移。

本文对放热导致红移这一解释存疑。首先，FBG 的温度灵敏度一般约为  $10 \text{ pm}/\text{C}$ ，腐蚀后 FBG 的灵敏度也不会发生较大变化[13]。要使其 Bragg 波长红移 0.3~0.7 nm 则需要温度升高  $30^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$ 。仅仅是 HF 溶液腐蚀放热不太可能产生如此大的热量。其次，在 FBG1 腐蚀实验后，Bragg 波长并没有在停止腐蚀后蓝移到初始位置，同时在后面的折射率传感实验中可以看到，相同温度和折射率环境下，FBG1 的 Bragg 波长相对未腐蚀前，永久性的红移了约 0.3 nm。这可以说明，Bragg 波长在腐蚀开始后出现的红移现象，并非是腐蚀放热导致温度升高而引起的。充分的理解这一现象需要更加仔细和深入的研究。



**Figure 8.** The variation of Bragg wavelength with corrosion time in the whole corrosion process

图 8. 整个腐蚀过程中，Bragg 波长随腐蚀时间的变化规律

### 3.2. 基于薄包层 FBG 折射率传感的甘油浓度测量实验

丙三醇通常也称之为甘油，是一种无色，透明，无臭，无毒的粘稠液体。可与水以任意比例混溶，可配置成 1.33~1.47 大折射率范围内的折射率样本，经常用在光纤折射率传感的测试实验中。在实验中配置了十个不同浓度的丙三醇溶液作为待测折射率样本，在室温  $25^\circ\text{C}$  的环境中放置 4 小时以上以达到充分的热平衡。表 1 列出了 10 个折射率样本的浓度和折射率大小

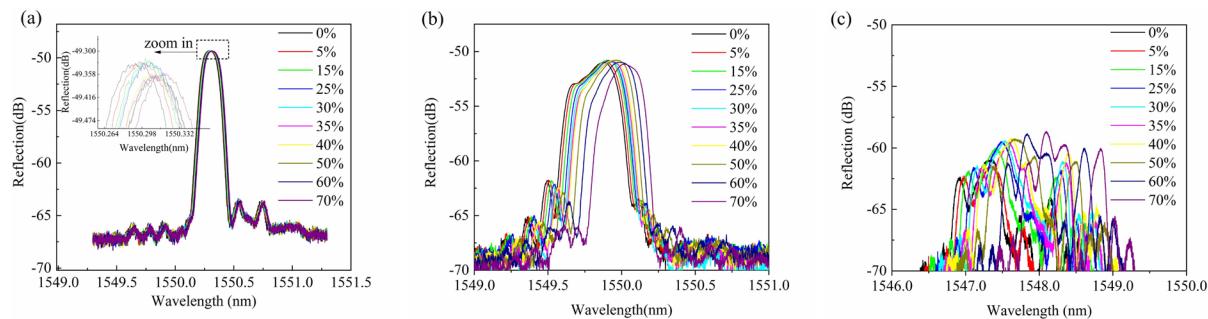
**Table 1.** Concentration and refractive index of glycerol solution refractive index sample  
**表 1.** 甘油溶液折射率样本的浓度和折射率

样本	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
浓度(%)	0	5	15	25	30	35	40	50	60	70
折射率	1.33300	1.33880	1.35106	1.36404	1.370700	1.37740	1.38413	1.39809	1.41600	1.42789

对上述三个腐蚀阶段后得到的 FBG1、FBG2、FBG3 分别进行折射率传感实验，采用的实验装置与

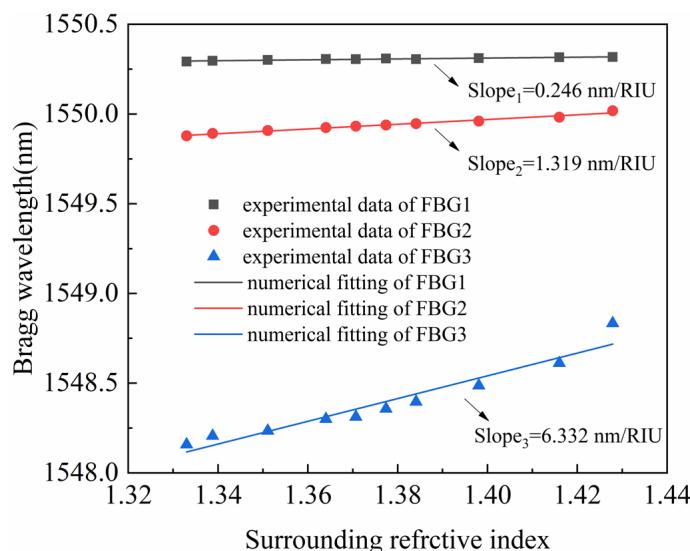
腐蚀实验基本相同，区别只在于将 HF 酸腐蚀液换成了甘油溶液。连接好 ASE 光源，FBG 和 OSA，开机预热 1 小时后确保光源和光谱仪稳定工作。用去离子水冲洗干净传感器封装装置后，用 2 ml 的塑料吸管向半圆筒内缓缓滴入待测甘油溶液样本，确保 FBG 完全浸入液体中；观察到 Bragg 波长即刻响应并稳定下来，保存当前 Bragg 波长数据；手持封装装置，将样本倒出，并用去离子水漂洗至少 5 次，确保在开始下一次测试之前不会受到上一个样本残留液的干扰；换甘油溶液样本 2，重复以上步骤，直至所有样本测完为止。

图 9 为三个薄包层 FBGs 在不同浓度甘油溶液当中的反射光谱。对于图 9(a)反映的 FBG1 的情况，可以看到十条曲线几乎重叠在一起。只有在放大波峰附近的插图中，才能看到随着甘油浓度的增大，Bragg 波长整体呈现红移的趋势。为了量化这种关系，图 10 给出了实验中测得的三个薄包层 FBGs 的 Bragg 波长与环境折射率的关系，并对其进行线性拟合。对 FBG1 来说，度量线性拟合优度的判定系数  $R^2 = 0.92844$ ，根据拟合直线的斜率 slope1 的值，得到 FBG1 的折射率灵敏度为 0.246 nm/RIU，考虑到 OSA 的光谱分辨率为最高的 0.02 nm，计算出 FBG1 在 1.333~1.42789 的范围内，仅有 0.08 RIU 的折射率分辨率。也就是说，尽管实验所测得的十个数据整体上表现出一定的规律，但其实都是不可信的。直径约为 32  $\mu\text{m}$  的 FBG1 无法分辨实验中配置的样本溶液。很难作为一个合格的折射率传感器。



**Figure 9.** Reflection spectra of three thin-cladding FBGs in glycerol solutions with different concentrations. (a) FBG1 spectrum; (b) FBG2 spectrum; (c) FBG3 spectrum

**图 9.** 三个薄包层 FBGs 在不同浓度甘油溶液中的反射光谱。(a) FBG1 光谱；(b) FBG2 光谱；(c) FBG3 光谱



**Figure 10.** Relationship between Bragg wavelength and surrounding refractive index of three thin-cladding FBGs

**图 10.** 三个薄包层 FBGs 的 Bragg 波长与环境折射率的关系

图 9(b)为 FBG2 在不同浓度的甘油溶液环境下光谱变化情况，随着浓度的升高，折射率增大，Bragg 波长呈现规律的红移。同时在图 10 中也可以看到，实验数据的线性拟合曲线拟合优度较好， $R^2 = 0.9807$ ，斜率为  $1.319 \text{ nm/RIU}$ ，计算得到的折射率分辨率为  $0.015 \text{ RIU}$ 。直径约为  $14 \mu\text{m}$  的 FBG2 相比于 FBG1 来说，折射率灵敏度和分辨率性能提升了 5~6 倍。

直径约  $8.45 \mu\text{m}$  的 FBG3 的甘油溶液折射率传感结果如图 9(c)所示。由于直径的减小和不光滑的表面，反射谱功率降低且出现了高阶模，整个光谱看起来显得混乱不堪。不过 Bragg 波长的变化仍然与环境折射率呈现良好的线性关系，仍如图 10 所示，判定系数  $R^2 = 0.93126$ ，代表折射率灵敏度的斜率 slope3 达到  $6.332 \text{ nm/RIU}$ ，在所测范围内的折射率分辨率为  $3.16 \times 10^{-3}$ 。

## 4. 结论

本文从光纤三层模型出发，理论模拟了光纤包层直径减小时纤芯模有效折射率的变化情况，得出不同包层直径光纤下，纤芯模有效折射率与环境折射率变化的理论关系曲线。并得出薄包层 FBG 在  $1.333\sim1.462$  的范围内的最大理论灵敏度约为  $22 \text{ nm/RIU}$ 。

实验中将一根 FBG 分三个阶段腐蚀，得到三种不同直径的薄包层 FBG 折射率传感器 FBG1、FBG2 和 FBG3，并将其用于甘油溶液的折射率传感。实验结果表明，在  $1.333\sim1.42789$  的折射率范围内，FBG1、FBG2 和 FBG3 的平均灵敏度分别为  $0.246 \text{ nm/RIU}$ 、 $1.319 \text{ nm/RIU}$ 、 $6.332 \text{ nm/RIU}$ ，考虑到  $0.02 \text{ nm}$  光谱分辨率，计算得到的折射率分辨率为  $0.08 \text{ RIU}$ 、 $0.015 \text{ RIU}$ 、 $0.00316 \text{ RIU}$ 。理论与实验结果存在微小的差异，即理论模型没有能够预测红移这一趋势。在以后的工作中，对其解释仍然需要进一步的探讨与分析。

## 参考文献

- [1] Urrutia, A., Del Villar, I., Zubiate, P. and Zamarreño, C.R. (2019) A Comprehensive Review of Optical Fiber Refractometers: Toward a Standard Comparative Criterion. *Laser & Photonics Reviews*, **13**, 1900094. <https://doi.org/10.1002/lpor.201900094>
- [2] Hill, K.O., Fujii, Y., Johnson, D.C. and Kawasaki, B.S. (1978) Photosensitivity in Optical Fiber Waveguides: Application to Reflection Filter Fabrication. *Applied Physics Letters*, **32**, 647-649. <https://doi.org/10.1063/1.89881>
- [3] Riza, M.A., Go, Y.I., Harun, S.W. and Maier, R.R. (2020) FBG Sensors for Environmental and Biochemical Applications—A Review. *IEEE Sensors Journal*, **20**, 7614-7627. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2982446>
- [4] Asseh, A., Sandgren, S., Ahlfeldt, H., Sahlgren, B., Stubbe, R. and Edwall, G. (1998) Fiber Optical Bragg Grating Refractometer. *Fiber and Integrated Optics*, **17**, 51-62. <https://doi.org/10.1080/014680398245055>
- [5] Schroeder, K., Ecke, W., Mueller, R., Willsch, R. and Andreev, A. (2001) A Fibre Bragg Grating Refractometer. *Measurement Science and Technology*, **12**, 757. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/12/7/301>
- [6] Tong, L., Lou, J. and Mazur, E. (2004) Single-Mode Guiding Properties of Subwavelength-Diameter Silica and Silicon Wire Waveguides. *Optics Express*, **12**, 1025-1035. <https://doi.org/10.1364/OPEX.12.001025>
- [7] 彭星玲, 李兵, 李玉龙. 微纳光纤布拉格光栅折射率与浓度传感器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(12):119-127.
- [8] Gu, H., Li, X., Wang, X. and Liu, X. (2020) High-Precision Differential Measurement of Dye Concentration Based on Two Cascaded Fiber Bragg Gratings. *Applied Optics*, **59**, 413-417. <https://doi.org/10.1364/AO.376631>
- [9] Monerie, M. (1982) Propagation in Doubly Clad Single-Mode Fibers. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **30**, 381-388. <https://doi.org/10.1109/TMTT.1982.1131079>
- [10] Iadicicco, A., Cusano, A., Campopiano, S., Cutolo, A. and Giordano, M. (2005) Thinned Fiber Bragg Gratings as Refractive Index Sensors. *IEEE Sensors Journal*, **5**, 1288-1295. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2005.859288>
- [11] Tsigaridas, G., Polyzos, D., Ioannou, A., Fakis, M. and Persephonis, P. (2014) Theoretical and Experimental Study of Refractive Index Sensors Based on Etched Fiber Bragg Gratings. *Sensors and Actuators A: Physical*, **209**, 9-15. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.01.007>
- [12] Kuhne, J.F., Rocha, A.M., Barreto, R.C. and Kamikawachi, R.C. (2020) Estimation Models for the Refractive Index

- 
- Response Curve of EFBGS. *IEEE Sensors Journal*, **20**, 13394-13402. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3005596>
- [13] Pereira, D.A., Frazao, O. and Santos, J.L. (2004) Fiber Bragg Grating Sensing System for Simultaneous Measurement of Salinity and Temperature. *Optical Engineering*, **43**, 299-304. <https://doi.org/10.1117/1.1637903>