

基于结构化光纤 Bragg 光栅的折射率梯度 传感器研究

罗彬彬^{1,2} 赵明富¹ 周晓军² 石胜辉² 曹 阳¹ 韩 汐¹ 曹雪梅¹

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

摘要 研究结构化光纤 Bragg 光栅(FBG)在折射率(RI)呈线性分布的液相介质环境下的响应特性。数值仿真结果表明,结构化 FBG 的反射谱特性强烈依赖于液相介质折射率(RI)的线性分布函数的某些特征参数,比如液相介质的 RI 沿 FBG 轴向的分布梯度、RI 在 FBG 两端的差值等。基于理论仿真结果,建立了结构化 FBG 在低 RI 区(1.330~1.360)对液相介质的 RI 梯度进行测量的线性近似理论模型。通过相关实验研究,证明了理论仿真和分析的合理性及基于结构化 FBG 的 RI 梯度传感器在现实应用中的可行性。

关键词 光纤传感;光纤 Bragg 光栅;折射率梯度;传输矩阵法

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0306004

Research on the Refractive-Index Gradient Sensor Based on the Structured Fiber Bragg Grating

Luo Binbin^{1,2} Zhao Mingfu¹ Zhou Xiaojun² Shi Shenghui²

Cao Yang² Han Xi¹ Cao Xuemei¹

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

Abstract The responsive characteristics of the structured fiber Bragg grating (FBG) under liquid medium with the refractive-index (RI) linear distribution are analyzed. The simulated results show that the reflection spectrum of the structured FBG are closely related to the properties of the RI distribution function of the liquid medium, such as the RI gradient along its axis and the value of the RI at both of its ends. Based on the numerical results, the theoretical model for the linear-approximation measurement of the RI gradient of the liquid medium by the structured FBG at the low RI area (1.330~1.360) is established. Through the experiments, the feasibility of the theoretical simulations and analyses and the practical applications of the RI gradient sensor based on the structured FBG are verified.

Key words optical fiber sensing; fiber Bragg grating (FBG); refractive-index (RI) gradient; transfer matrix method

OCIS codes 060.3735; 280.4788; 060.2370

1 引 言

光纤 Bragg 光栅(FBG)传感器以其微型尺寸、

抗电磁干扰、高灵敏度、高精度、绝对测量及波长解调等优点,已广泛应用于温度、压力和应变等方面的

收稿日期: 2011-08-19; **收到修改稿日期**: 2011-10-26

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

作者简介: 罗彬彬(1981—)男,博士研究生,讲师,主要从事光纤传感技术、光纤光栅传感器技术及其生化传感应用等方面的研究。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

传感^[1,2]。国内外许多学者研究包层被完全或部分腐蚀的结构化 FBG 用于液相介质折射率(RI)的测量^[3~5],并应用于生物化学等领域的传感,如各种溶液浓度的测量^[6,7]、海水盐度的测量^[8]和燃料的质量鉴定^[9]等。

近两年来,国外一些学者开始研究结构化 FBG 的微流体 RI 传感器^[10,11],从而使对该类型传感器的研究从较大空间范围缩小到了微管道(几十至几百微米)内液相介质 RI 的测量。微流体 RI 传感器在众多生化反应过程都有可能应用,比如液相介质扩散、DNA 和病原体探测等。由于微管道内生化的液相介质扩散往往都是浓度梯度驱动的,而一般液相介质的浓度与其 RI 呈线性关系,因此,若能实现基于结构化 FBG 的液相介质 RI 梯度传感器,将对各种生化反应过程的研究具有重要意义。然而,过去对 FBG 折射率传感器的应用研究仅考虑液相介质的 RI 为均匀分布的情况^[4~11],此时,仅可利用 FBG 谐振波长的漂移量来确定 RI 的变化大小。若微管道内液相介质的 RI 存在梯度分布,则不仅会导致谐振波长的漂移效应,还可能会出现其他新的响应特性。

本文在过去关于结构化 FBG 对均匀 RI 传感的理论和实验研究基础上^[4~11],结合光波导理论^[12,13]和传输矩阵法^[14],从理论和实验两方面研究了结构化 FBG 在 RI 呈线性分布的液相环境下的响应特性,同时,建立结构化 FBG 对处于低 RI 区(1.33~1.36)液相介质的 RI 梯度进行测量的理论模型。

2 理论模型

通过氢氟酸(HF)溶液腐蚀 FBG 的包层甚至纤芯,使其包层模或纤芯模的倏逝场透射到外部介质中,则外部介质 RI 的变化将引起 FBG 的导模有效折射率的变化,导致 FBG 谐振波长的漂移^[3~10],从而构成结构化 FBG 折射率传感器。图 1 为结构化

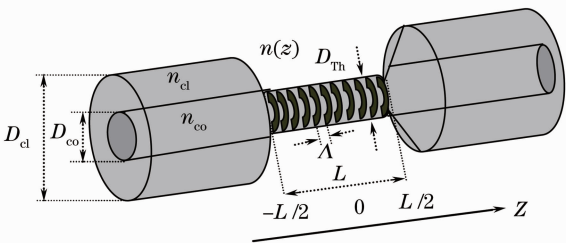


图 1 结构化 FBG 折射率传感器模型

Fig. 1 Configuration of the structured FBG refractive-index sensor

FBG 折射率传感器的模型,其主要参数为腐蚀之后光栅的直径 D_{th} 、纤芯的直径 D_{co} 、包层直径 D_{cl} 、光栅周期 Λ 、光栅的总长度 L 、纤芯折射率 n_{co} 和包层折射率 n_{cl} ,图 1 中 $n(z)$ 表示液相介质 RI 的分布函数,为轴向 z 的函数。

若液相介质的扩散源强度不随时间变化,扩散运动持续进行下去,最终达到稳定状态,空间中各点的浓度不再随时间变化。假设 FBG 区域处于扩散源之外(即处于无源扩散区),根据 Fick 第一定律(物质扩散定律)^[15]可得,在 FBG 区域的液相介质的浓度分布符合拉普拉斯方程,即

$$\Delta u(x, y, z) = 0, \quad (1)$$

式中 $u(x, y, z)$ 表示液相介质的浓度分布场。简单起见,本文仅考虑一维分布的情况,即液相介质仅沿 FBG 的轴向 z 扩散,则(1)式可以简化为

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0. \quad (2)$$

求解(1)式可得该情况下液相介质的一维浓度分布函数,即

$$u(z) = Dz + c = (\partial u / \partial z)z + c, \quad (3)$$

式中 $D = \partial u / \partial z$ 表示液相介质的浓度梯度, c 为待定常数,与边界条件有关。

可见,在扩散源强度稳定的情况下,液相介质在无源区的浓度呈线性分布,因此,其 RI 分布也应该是呈线性的。此时 FBG 反射谱的计算可采用传输矩阵法^[13],如图 2 所示,将非均匀液相介质视为结构化 FBG 的外包层(对应 FBG 的包层被部分腐蚀的情况)或包层(对应 FBG 的包层被完全腐蚀的情况),然后将 FBG 和液相介质同时分割成 M 个长度相等、近似均匀的 FBG 段,将每个 FBG 段对应的液相介质的 RI 在该段内的平均值视为外部介质 RI 的近似值 n_i ,即

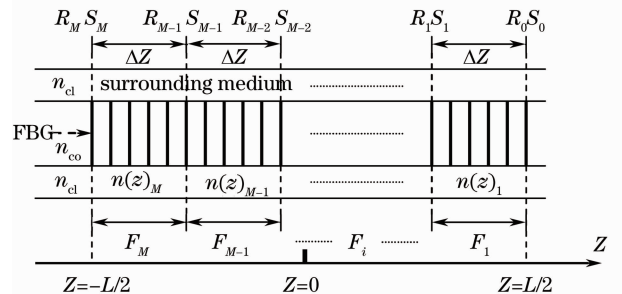


图 2 非均匀液相介质下的结构化 FBG 传输矩阵法模型图

Fig. 2 Model of the transfer matrix method of the structured FBG under the unhomogeneous liquid phase

$$n_i = \overline{n(z)}_i = \int_{z_{i-1}}^{z_i} n(z)_i dz / \Delta z, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (4)$$

$$F_i = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_{Bi} \Delta z) - j \frac{\hat{\sigma}_i}{\gamma_{Bi}} \sinh(\gamma_{Bi} \Delta z) & -j \frac{\kappa_i}{\gamma_{Bi}} \sinh(\gamma_{Bi} \Delta z) \\ j \frac{\kappa_i}{\gamma_{Bi}} \sinh(\gamma_{Bi} \Delta z) & \cosh(\gamma_{Bi} \Delta z) + j \frac{\hat{\sigma}_i}{\gamma_{Bi}} \sinh(\gamma_{Bi} \Delta z) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中

$$\gamma_{Bi} \equiv \sqrt{\kappa_i^2 + \hat{\sigma}_i^2}, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

式中 Δz 为每个 FBG 段的长度, κ_i 为第 i 段的交流耦合系数, $\hat{\sigma}_i$ 为第 i 段的总直流自耦合系数。

在每个 FBG 段的结构参数及 n_i 已知的情况下, 其纤芯基模的模场和有效折射率可采用三层圆光波导模型^[12] (对应 FBG 包层部分腐蚀的情况) 或两层圆光波导模型^[13] (对应 FBG 包层完全腐蚀的情况) 来计算, 从而进一步可以计算相应的 κ_i 、 $\hat{\sigma}_i$ 等模式耦合参数。可见, 若已知结构化 FBG 的结构参数及液相介质的 RI 沿 FBG 的轴向 z 的分布函数, 则可获得各个 FBG 段的矩阵, 即 $F_i, i=1, 2, \dots, M$ 。最后将各段矩阵连乘, 获得总的传输矩阵, 最终可计算出结构化 FBG 的反射谱。

3 数值仿真及分析

3.1 RI 梯度传感器的数值响应特性

仿真中采用的结构化 FBG 的参数为: $D_{co} = D_{th} =$

表 1 处于高 RI 区(1.420~1.450)和低 RI 区(1.33~1.360)的液相介质的 RI 的线性分布函数、RI 边界条件及对应的 RI 梯度 D_n

Table 1 Linear distribution functions, the RI boundary conditions and the corresponding RI gradient of the liquid medium in the high RI area (1.420~1.450) and the low RI area (1.330~1.360)

RI area	Linear distribution function	$D_n/(riu/mm)$	$n(-L/2)$	$n(L/2)$	$ n(-L/2) - n(L/2) $
1.420~1.450	$n(z) = -5.0 \times 10^{-5} z + 1.4495$	-5.0×10^{-5}	1.450	1.449	1.0×10^{-3}
	$n(z) = -2.0 \times 10^{-4} z + 1.4480$	-2.0×10^{-4}		1.446	4.0×10^{-3}
	$n(z) = -5.0 \times 10^{-4} z + 1.4450$	-5.0×10^{-4}		1.440	1.0×10^{-2}
	$n(z) = -1.5 \times 10^{-3} z + 1.4350$	-1.5×10^{-3}		1.420	3.0×10^{-2}
1.330~1.360	$n(z) = -5.0 \times 10^{-4} z + 1.3350$	-5.0×10^{-4}	1.340	1.330	1.0×10^{-2}
	$n(z) = -1.0 \times 10^{-3} z + 1.3400$	-1.0×10^{-3}	1.350		2.0×10^{-2}
	$n(z) = -1.5 \times 10^{-3} z + 1.3450$	-1.5×10^{-3}	1.360		3.0×10^{-2}

表 1 中高 RI 区和低 RI 区的 RI 线性分布函数对应的传感器响应谱的仿真结果分别如图 3(a) 和 (b) 所示。

图 3 表明, 传感器的响应谱与外部介质的 RI 在光栅区轴向的分布特性有很大的关系。首先, 在非

然后分别计算每个 FBG 段的有效折射率、直流耦合系数、交流耦合系数等参数, 获得该 FBG 段的传输矩阵。第 i 个 FBG 段的传输矩阵可表示为^[13]

5.0 μm , $D_{cl} = 125.0 \mu\text{m}$, $L = 20 \text{ mm}$, $\Lambda = 534.5 \text{ nm}$, $n_{co} = 1.453$, $n_{cl} = 1.450$, 并假设纤芯导模有效折射率变化的直流项 $\overline{\delta n_{eff}} = 3 \times 10^{-5}$ 。为了比较非均匀外部环境分别处于高 RI 区和低 RI 区下的结构化 FBG 的响应特性, 因此分为高 RI 和低 RI 两区域进行仿真。

因为很多生化介质的 RI 略大于水的折射率 (1.330) 且处于较低的折射率范围, 因此仿真中设置低 RI 区为 1.330~1.360; 由于仿真中已经假设包层折射率为 1.450, 因此外部介质 RI 的上限不能大于 1.450, 否则纤芯导波模将变成辐射模完全透射到外部介质中, 无法形成谐振, 因此设置高 RI 区域范围为 1.420~1.450。

因此, 可以假设液相介质 RI 沿 FBG 轴向 z 的分布为线性分布函数, 且分别处于高 RI 区 (1.420~1.450) 和低 RI 区 (1.330~1.360) 两种情况, 具体函数、RI 边界条件及对应的 RI 梯度 D_n 列于表 1 中。

均匀液相介质的环境下, 结构化 FBG 反射谱的幅度将急剧下降, 总的谐振带宽也增大, 同时, 原本的主谐振峰将分裂为众多连续的微谐振峰。并且, 随着 RI 梯度 (对应表 1 中的 D_n 值) 及 RI 在传感器两端的差值 [对应表 1 中的 $|n(-L/2) - n(L/2)|$] 的增

大,传感器的反射率下降程度也越大,总的谐振带宽增大的程度越大,原始的反射谱分裂出的微谐振峰个数也越多。此外,传感器的响应谱是非对称的,一方面,谐振波长最长的微谐振峰(对应 RI 最高的 FBG 段)的幅值略高于与其相邻的微谐振峰的幅

值;另一方面,随着波长向短波方向移动,微谐振峰的幅值在总体上呈上升的趋势,谐振波长最短的微谐振峰(对应 RI 最低的 FBG 段)的幅值在所有微谐振峰中是最大的。

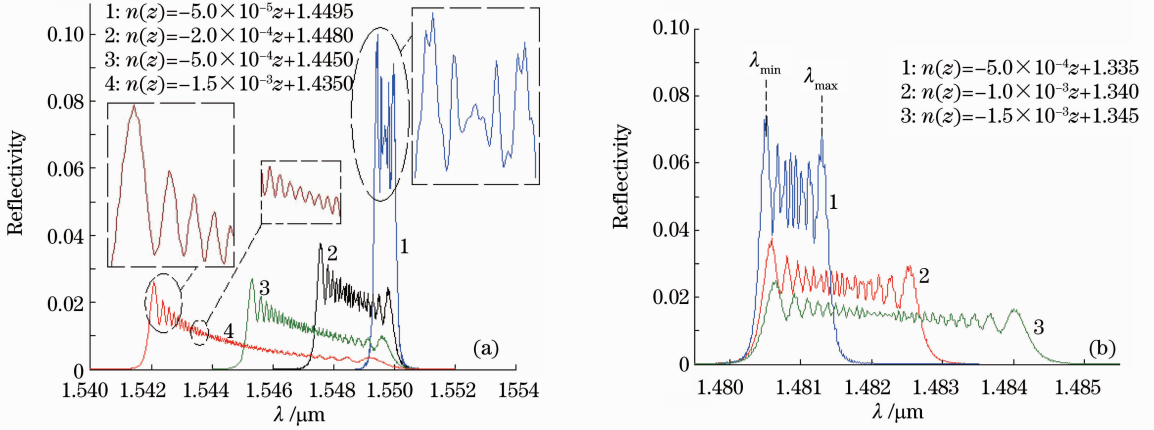


图 3 结构化 FBG 在 RI 呈线性分布的液相介质环境下的反射谱。(a)高 RI 区(1.420~1.450); (b)低 RI 区(1.330~1.360)

Fig. 3 Reflection spectrum of the structured FBG under the linear RI distributed liquid medium environment with (a) high RI area (1.420~1.450); (b) low RI area (1.330~1.360)

这些效应可以解释为:在非均匀液相介质环境下的结构化 FBG 可看成是由多个长度很短的、近似均匀的 FBG 段相互连接构成,每个 FBG 段形成一个微小的反射谱,相邻的 FBG 段的正反向传播光的输入输出幅值互为边界条件,于是众多微反射谱叠加构成总反射谱,类似于线性啁啾 FBG^[16]的响应谱,因此,其总反射谱的带宽将随着 RI 梯度(或 RI 在传感器两端的差值)的增大而增大,并逐渐分裂出多个微谐振峰;同时,已有研究^[3~10]都表明,FBG 的谐振波长随着 RI 的减小(或增大)向短波方向(或长波方向)移动的幅度将越来越小(或越来越大),呈非线性的关系。因此,这些近视均匀的 FBG 段的微反射谱在短波区域的叠加要大于波长相对长的区域,从而导致总反射谱的能量分布趋向短波区域,形成非对称的总反射谱。

3.2 RI 梯度传感模型

设图 3 中各反射谱曲线中最左边和最右边的微谐振峰对应的谐振波长分别为 λ_{\min} 和 λ_{\max} ,两者的差值 $\lambda_{\max} - \lambda_{\min}$ 如表 2 所示。根据 3.1 节的理论分析,若不考虑各近似均匀 FBG 段的微反射谱的非线性叠加效应, λ_{\min} 和 λ_{\max} 应分别对应最小 RI 和最大 RI[即 $n(L/2)$ 和 $n(-L/2)$] 的 FBG 段的谐振波长,则 FBG 轴向的 RI 梯度 D_n 应该是 $\lambda_{\max} - \lambda_{\min}$ 的函数,可

表示为

$$D_n = \partial n / \partial z = [n(L/2) - n(-L/2)] / L = (1/\beta)(\lambda_{\max} - \lambda_{\min}), \quad (7)$$

式中 L 表示光栅的长度, β 的绝对值 $|\beta|$ 表示 RI 梯度因子,单位为 $\text{nm} \cdot \text{mm}/\text{riu}$ 。显然, $|\beta|$ 与传感器的结构参数、RI 的分布区间[即 $n(L/2) \sim n(-L/2)$] 有关,且 $|\beta|$ 越大传感器的 RI 梯度灵敏度越高。结合表 1 中各 RI 分布函数的 RI 梯度 D_n 及其在图 3 中所对应反射谱的 $\lambda_{\max} - \lambda_{\min}$ 的计算值,由(7)式可得不同 RI 分布区间对应的 $|\beta|$ 值,如表 2 所示。

由表 2 可知,对于某个结构参数确定的结构化 FBG,其 $|\beta|$ 值随着 RI 分布区间的增大而增大。此外,计算 $|\beta|$ 分别处在高 RI 区和低 RI 区中的均方差 $\sigma|\beta|$,也列于表 2 中, $\sigma|\beta|$ 表示 $|\beta|$ 的离散程度,可见,在高 RI 区 $|\beta|$ 值的离散程度较其而在低 RI 区的离散程度大得多。这是由于 FBG 的谐振波长 λ_B 随外部介质 RI 的增大向长波方向漂移的幅度越大,呈非线性关系^[3~10];而在低 RI 区, λ_B 与外部介质 RI 的这种非线性关系并不明显,可近似为线性关系^[17]。因此,传感器在低 RI 区对 RI 梯度的测量才具有较好的线性特性。

表 2 呈表 1 中的 RI 分布函数的液相介质环境下的结构化 FBG 的理论仿真数据
 Table 2 Theoretical simulation data of the structured FBG under the liquid medium with the RI distribution function listed Table 1

RI area	Linear function	$D_n/(riu/mm)$	$\lambda_{\max} - \lambda_{\min}/nm$	$ \beta /(nm \cdot mm/riu)$	$\sigma \beta $
1.420~1.450	$n(z) = -5.0 \times 10^{-5}z + 1.4495$	-5.0×10^{-5}	0.55	1.1×10^4	2.81×10^3
	$n(z) = -2.0 \times 10^{-4}z + 1.4480$	-2.0×10^{-4}	2.00	1.0×10^4	
	$n(z) = -5.0 \times 10^{-4}z + 1.4450$	-5.0×10^{-4}	4.30	8.6×10^3	
	$n(z) = -1.5 \times 10^{-3}z + 1.4350$	-1.5×10^{-3}	6.90	4.6×10^3	
1.330~1.360	$n(z) = -5.0 \times 10^{-4}z + 1.3350$	-5.0×10^{-4}	0.80	1.6×10^3	3.06×10^2
	$n(z) = -1.0 \times 10^{-3}z + 1.3400$	-1.0×10^{-3}	2.00	2.0×10^3	
	$n(z) = -1.5 \times 10^{-3}z + 1.3450$	-1.5×10^{-3}	3.30	2.2×10^3	

4 实验及讨论

考虑到传感器在低 RI 区对 RI 梯度的测量才具有较好的线性特性,且大多数生化介质的折射率都处于低 RI 区(约 1.33~1.36),因此仅对传感器处于低 RI 区的非均匀液相介质环境下的特性进行实验。采用 HF 溶液腐蚀初始谐振波长 $\lambda_B \approx 1547.65$ nm 的均匀型 FBG,腐蚀之后的主要结构参

数为:剩余直径的平均值 $D_{th} \approx 5.73$ μm 、包层直径 $D_{cl} = 125.0$ μm 、纤芯直径 $D_{co} = 8.2$ μm 、纤芯折射率 $n_{co} = 1.4682$ 、包层折射率 $n_{cl} = 1.46281$ 、光栅的总长度 $L = 10$ mm。图 4(a)为在高倍率显微镜下传感器的实物图,腐蚀之后 FBG 处于水中的谐振波长 $\lambda_B \approx 1539.14$ nm,如图 4(b)所示。

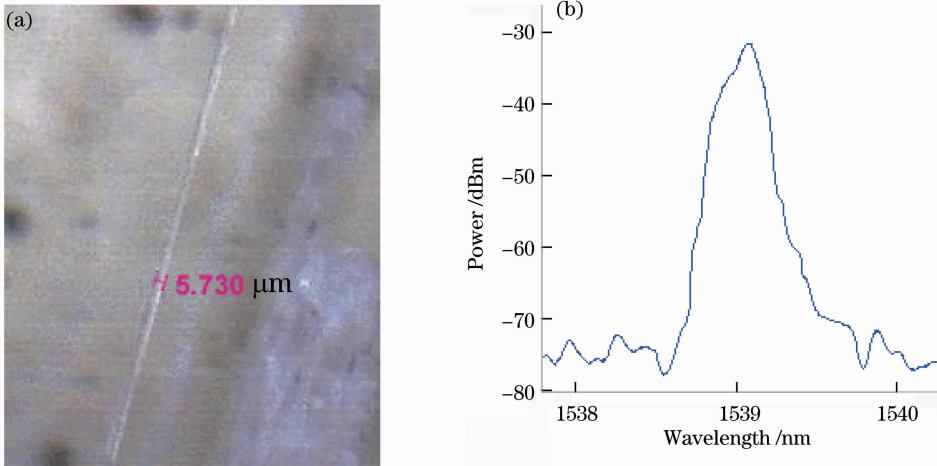


图 4 (a)高倍率数码显微镜下传感器实物图;(b)传感器在常温下处于水中的反射谱

Fig. 4 (a) Image of the sensor under the high-magnification digital microscopes; (b) reflection spectrum by the sensor under water at room temperature

RI 呈线性分布的液相介质环境及相应的 RI 梯度传感实验系统如图 5 所示。两个溶液池(体积约 1 L)分别装入蔗糖溶液和蒸馏水,蔗糖溶液在浓度差的驱动下透过半透膜并经过微管道(直径 0.5 mm,长度 10 mm)从左向右扩散,传感器的两端分别紧靠微管道的左右两端。配置若干组质量分数不同的蔗糖溶液,使用阿贝折射仪测量其折射率,使用最小二乘法拟合实验数据,可得蔗糖溶液的折射率 n 与其质量分数($C\%$)之间的线性关系为

$$n = 1.328 + 0.00184C. \quad (8)$$

取其中质量分数分别为 6.0%、11.0%、13.0% 和 16.0% 的蔗糖溶液,对应的 RI 实测值分别为 1.3414、1.3498、1.3533 和 1.3586,都处于低 RI 区域。将此 4 组蔗糖溶液轮流换置于左边的溶液池中,通过光纤光栅解调仪观察传感器的反射谱。由于微管道相对于溶液池而言很小,从溶液开始扩散到稳定之后,左端溶液池的蔗糖溶液的 RI[即 $n(-L/2) = 1.3414$ 、1.3498、1.3533 或 1.3586]和右端溶液池的蒸馏水 RI[$n(L/2) = 1.330$]可认为在一段较长的时间内保持不变,因此,左端的半透膜处可视

为一个扩散强度稳定的点扩散源,而微管道可视为稳定的一维无源扩散区。根据(1)~(3)式,溶液扩散达到稳定之后,将在微管道内形成稳定的线性 RI 分布。因此,当传感器的反射谱趋于稳定时,说明微

管道内溶液的质量分数分布(或 RI 分布)趋于平稳。基于此分析,由边界条件[即 $n(-L/2)$ 和 $n(L/2)$ 的值]可得 4 组蔗糖溶液在微管道内的 RI 分布函数和 RI 梯度的理论值 D_n ,如表 3 所示。

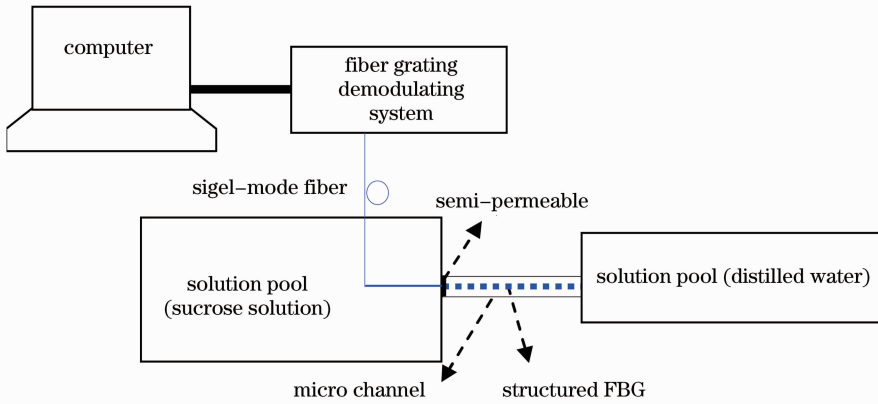


图 5 RI 呈线性分布的液相介质环境及相应的 RI 梯度传感实验系统示意图

Fig. 5 Scheme of the liquid phase medium with linear RI distribution and the corresponding RI gradient sensing system

表 3 微管道内蔗糖溶液的 RI 分布函数、RI 梯度的理论值 D_n ,传感器的 RI 梯度因子的理论值 $|\beta|$ 和实验值 $|\beta'|$, $\lambda'_{\max} - \lambda'_{\min}$ 的实验值

Table 3 Theoretical RI distribution function and RI gradient D_n of sucrose solution in the micro channel, theoretical RI gradient factor $|\beta|$ and the corresponding experimental value $|\beta'|$ of the sensor, and the experimental value of $\lambda'_{\max} - \lambda'_{\min}$

RI Distribution function	$D_n /$ (10^{-3} riu/mm)	$ n(-L/2) -$ $n(L/2) / 10^{-2}$	$ \beta /$ (10^2 nm•mm/riu)	$(\lambda'_{\max} - \lambda'_{\min}) /$ nm	$ \beta' /$ (10^2 nm•mm/riu)
$n(z) = -1.14 \times 10^{-3}z + 1.3357$	-1.14	1.14	3.02	0.35	3.07
$n(z) = -1.98 \times 10^{-3}z + 1.3399$	-1.98	1.98	3.09	0.62	3.13
$n(z) = -2.33 \times 10^{-3}z + 1.3417$	-2.33	2.33	3.13	0.74	3.18
$n(z) = -2.86 \times 10^{-3}z + 1.3443$	-2.86	2.86	3.21	0.93	3.25

传感器在微管道内 4 组蔗糖溶液情况下的实验反射谱的如图 6 所示。可见,实验反射谱的形状与图 3(b)的理论仿真存在一定差异,这是因为仿真中考虑的是绝对理想的情况,而实际上微管道内蔗糖溶液的实际 RI 分布存在非线性因素,且 HF 溶液腐蚀 FBG 也存在一定的不均匀性。同时,为了减少 FBG 被 HF 腐蚀过程中其表面的不均匀性,传感器的平均剩余直径($5.73 \mu\text{m}$)和长度(10 mm)分别较仿真中传感器的剩余直径($5.0 \mu\text{m}$)和长度(20 mm)要大和短得多,这也是导致这些差异的原因之一。但是,图 6 的实验反射谱和图 3(b)的仿真反射谱随 RI 梯度及 RI 分布区间的变化而变化的基本趋势是一致的,说明对 RI 梯度传感器的响应特性的理论仿真和分析是合理的。

图 6 中各实验反射谱的 $\lambda'_{\max} - \lambda'_{\min}$ 的值如表 3 所示,结合(7)式可得传感器 RI 梯度因子的实验值

$|\beta'|$ (见表 3)。采用该传感器的结构参数及表 3 中已知的 RI 分布函数,并结合(4)~(7)式和两层圆光波导模型^[15]进行仿真,可得该传感器的 RI 梯度因子的理论值 $|\beta|$ (见表 3)。比较表 3 中的 $|\beta'|$ 和 $|\beta|$ 可知,RI 梯度因子的实验值与理论值基本一致,因此,实验说明建立的 RI 梯度理论模型是合理的。

由于 RI 梯度传感器在低 RI 区的 RI 梯度因子差异不大,因此在实际应用中,可取其中的实验标定值 $|\beta'|$ 的平均(即 $\overline{|\beta'|}$)为传感器的 RI 梯度常数。比如,对于实验中的传感器在 RI 为 1.330~1.3586 区间的 RI 梯度常数可取表 3 中 4 个 $|\beta'|$ 的平均值,即 $\overline{|\beta'|} \approx 3.158 \times 10^2$ nm•mm/riu。显然,RI 梯度常数是衡量传感器对 RI 梯度测量的一个非常重要的参数, $|\beta'|$ 越大,则传感器对 RI 梯度的检测灵敏度越高。

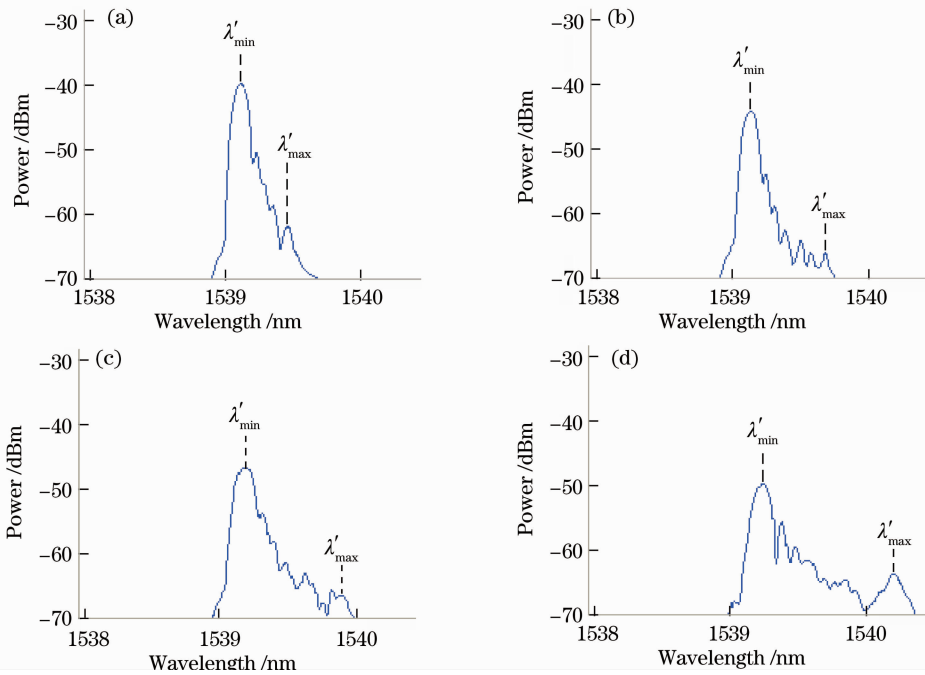


图6 微管道内的 RI 梯度传感器在 4 组 RI 线性分布函数下的实验反射谱。(a) 1.330~1.3414；
(b) 1.330~1.3498；(c) 1.330~1.3533；(d) 1.330~1.3586

Fig. 6 Experimental reflection spectra of the RI gradient sensor of the micro channel under three different RI distribution functions. (a) 1.330~1.3414; (b) 1.330~1.3498; (c) 1.330~1.3533; (d) 1.330~1.3586

5 结 论

本文从理论上研究了基于结构化 FBG 的 RI 梯度传感器在 RI 呈线性分布的非均匀液相环境下的响应特性。研究表明,传感器的反射谱与外部介质 RI 在光栅区轴向的梯度、RI 在传感器两端的差值有很大关系,特别在低 RI 区(1.330~1.360),传感器的反射谱的最大微谐峰与最小微谐振峰之间的波长差与 RI 梯度之间可近似为线性关系,基于此,建立了相应的 RI 梯度传感的线性近似理论模型。同时,通过相应的实验研究,证明了所建立的 RI 梯度传感理论模型的合理性。该研究结果对结构化 FBG 应用于生物、化学、生命科学等领域中与 RI 梯度变化有关的各种过程参数的传感具有一定意义。

参 考 文 献

- 1 Wang Jing, Feng Dejun, Sui Qingmei *et al.*. Study of optical fiber Bragg grating seepage pressure sensor based on draw-rar structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 686~691
王 静, 冯德军, 隋青美 等. 基于拉杆结构的光纤布拉格光栅渗压传感器研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 686~691
- 2 Li Kuo, Zhou Zhenan, Liu Aichun *et al.*. High-sensitivity fiber Bragg grating temperature sensor at high temperature [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **29**(1): 249~251
李 阔, 周振安, 刘爱春 等. 一种高温下高灵敏光纤光栅温度传感器的制作方法[J]. *光学学报*, 2008, **29**(1): 249~251
- 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 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
- 5 A. N. Chryssis, S. M. Lee, S. B. Lee *et al.*. High sensitivity evanescent field fiber Bragg grating sensor [J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(6): 1253~1255
- 6 A. Iadicicco, S. Campopiano, A. Cutolo *et al.*. Nonuniform thinned fiber Bragg gratings for simultaneous refractive index and temperature measurements [J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(7): 1495~1497
- 7 N. Chen, B. Yun, Y. Cui. Cladding mode resonances of etched-core fiber Bragg grating for ambient refractive index sensing [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(13): 1339~1342
- 8 D. A. Pereira, O. Frazao, J. L. Santos. Fiber Bragg grating sensing system for simultaneous measurement of salinity and temperature [J]. *Opt. Engng.*, 2004, **43**(2): 299~304
- 9 Kerstin Schroeder, Wolfgang Ecke, Rudolf Mueller *et al.*. A fibre Bragg grating refractometer [J]. *Meas. Sci. & Technol.*, 2001, **12**: 757~764
- 10 S.-M. Lee, M.-Y. Jeong, S. S. Saini. Etched core fiber Bragg grating sensor integrated with microfluidic channel [C]. *SPIE*, 2011, **7753**: 77530G
- 11 F. Baldini, M. Brenci, F. Chiavaioli *et al.*. Flow cell with hybrid LPG and FBG optical fiber sensor for refractometric measurements [C]. *SPIE*, 2011, **7753**: 775392
- 12 M. Monerie. Propagation in doubly clad single-mode fibers [J]. *J. Quantum Electron.*, 1982, **18**(4): 535~542
- 13 T. Erdogan. Cladding-mode resonances in short- and long-period

- fiber grating filters [J]. *Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(8): 1760~1772
- 14 T. Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 15 D. Bredow, P. Jain, A. Wohlfeil *et al.*. Heat and mass transfer characteristics of a horizontal tube absorber in a semi-commercial absorption chiller [J]. *Int. J. Refrigeration*, 2008, **31**(7): 1273~1281
- 16 Zeng Xiangkai, Rao Yunjiang. Theory of Fourier mode coupling for fiber Bragg gratings [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(12): 8597~8606
- 曾祥楷, 饶云江. Bragg 光纤光栅傅里叶模式耦合理论[J]. *物理学报*, 2010, **59**(12): 8597~8606
- 17 Luo Binbin, Zhao Mingfu, Zhou Xiaojun *et al.*. Theoretical model and design of single-end etched fiber Bragg grating in low refractive-index area [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0406004
- 罗彬彬, 赵明富, 周晓军 等. 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[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0406004

栏目编辑: 何卓铭