

文章编号: 1007-2861(2007)04-0415-06

# D 形光纤样品制备及其 Bragg 光栅的实验测量

石志东<sup>1</sup>, 董小鹏<sup>2</sup>, 唐明珏<sup>1</sup>, 李杰<sup>2</sup>(1. 上海大学 通信与信息工程学院, 上海市特种光纤重点实验室, 上海 201800;  
2. 厦门大学 信息科学与技术学院, 厦门 361005)

**摘要:** 采用研磨预制棒的方法, 制备了 D 形光纤样品, 并在此样品上制作了 Bragg 光栅, 介绍了工艺制作和测量中的一些实际经验. 采用深度化学腐蚀技术以增强 Bragg 波长对外界折射率的传感灵敏度, 测量了 D 形少模光纤 Bragg 光栅各模式谐振波长随外界折射率和温度的变化曲线, 为进一步进行折射率传感研究打下了实验基础.

**关键词:** D 形光纤; 布喇格光栅; 折射率测量; 模式耦合

中图分类号: TN 253 文献标识码: A

## Fabrication and Measurement of D-Shape Fiber and Its Few-Mode Bragg Grating

SHI Zhi-dong<sup>1</sup>, DONG Xiao-peng<sup>2</sup>, TANG Ming-jue<sup>1</sup>, LI Jie<sup>2</sup>

(1. Shanghai Key Lab of Specialty Fiber Optics, School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 201800, China; 2. School of Information Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** Samples of D-shape fiber are fabricated using grinding fiber preform, and Bragg gratings are incurred into these samples. Practical aspects in fabrication and measurements are presented. By deep etching into the core, sensitivity of Bragg wavelength to the refractive index is increased. Changes in resonant wavelength of different modes of the D-shape few-mode fiber Bragg grating with respect to surrounding refractive index and temperature, respectively, are measured. The measured data well agree with simulation results, providing a good base for further research on the sensing surrounding refractive index.

**Key words:** D-shape fiber; Bragg grating; refractive index measurement; mode couple

消逝场(evanescent field)结构的光纤传感器与传统的传感器相比,具有远距离分布传感、在线测量、设计简单、体积小和成本低等特点<sup>[1]</sup>,是目前研究和应用的热点.不同的外界环境介质对消逝场特性的影响程度不同,因此可以通过消逝场检测环境介质的折射率、化学浓度和 pH 值等<sup>[2-3]</sup>.改变光纤包层或外部材料的特性可以影响基模消逝场的传输特

性,D形光纤就是一种通过改变普通光纤横截面形状和结构从而改变基模传输特性的特种光纤,可以用来制作多种光纤器件,图1是其一般性的结构示意图.

早期对D形光纤及其器件的研究主要集中在光纤本身的传输特性,以及将其应用于光纤起偏器及传感器的研究上.随着光纤光栅的出现,利用在D

收稿日期:2007-03-14 基金项目:国家自然科学基金资助项目(60177026;60571054);上海市教委资助项目(05AZ41);上海市重点学科建设资助项目(T0102)

通信作者:石志东(1964~),男,副研究员,博士,研究方向为光电子学. E-mail:zdshi@shu.edu.cn

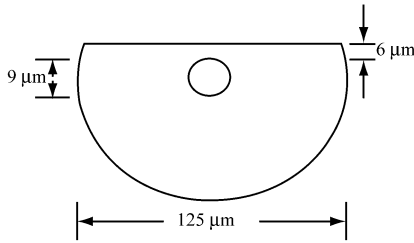


图1 D形光纤结构示意图

Fig. 1 Cross section of D-shape optical fiber

形光纤上制作长周期光栅进行光纤外部折射率的测量也有相关报导<sup>[2]</sup>.长周期光纤光栅传感测量时交叉敏感现象比较严重,且传输谱不稳定,测量精度不高;圆形 Bragg 光纤光栅对外界折射率的敏感度较低,若腐蚀得很细则机械强度又会变得很差,而 D 形少模光纤 Bragg 光栅的折射率测量方案,利用 D 形光纤结构的特殊性,可以在保证一定机械强度的情况下将其深度腐蚀以提高对外界折射率的灵敏度.我们自制了不同横截面尺寸的 D 形光纤,并在 D 形光纤上写入少模工作的 Bragg 光栅,进行了光纤外部折射率传感实验,取得了一些有意义的初步结果.

## 1 基本概念与工作原理

光纤中传输的基模或高阶模的大部分能量集中在纤芯内,但仍会有一部分光从高折射率的纤芯内渗透到低射率的包层和外界环境中去,基于渐变场的光纤传感器就是利用光场被外界材料吸收后引起的传输功率的变化来实现的.当光纤的包层被腐蚀得很薄或研磨成 D 形时,光纤将有更多的能量拖尾到外界环境中,出现较强的渐变场,环境介质的改变将直接影响到光场各参数的变化.按光纤传播的模式数量来分,光纤可分为单模光纤(只能传播单一模式)和多模光纤(能同时传播多种模式),其主要差别是纤芯的尺寸和纤芯包层的折射率差值.通常把由于光源工作波长略低于单模截止波长,而使光纤中可以同时传输基模和少数几个高阶模的光纤称为“少模光纤”,相应地工作于少模区的光纤光栅称作“少模光纤光栅”<sup>[4]</sup>.对于理想的均匀光纤波导,纤芯及包层中存在的各阶次模式相互正交,不存在模式耦合,但在光纤光栅中,产生了栅格周期为  $\Lambda$  的介电扰动,这种沿光纤纵向的周期性调制,使各个模式在纤芯及包层中相互耦合,其相位匹配条件为:  
 $k_1(\beta) - k_2(\beta) = 2\pi/\Lambda$ , 其中  $k_1, k_2$  分别为两耦合模

式的传播常数,其对应的等效模式折射率分别为  
 $n_{e1} = \beta_1/2, n_{e2} = \beta_2/2$ .

FBG 的周期  $\Lambda$  约为几百纳米,主要特性是将某一频段的光反射回去,形成以谐振波长为中心的窄带光学滤波器.从模式耦合机理来看,FBG 是前向传输的基模与后向传输的基模及各阶高次模之间的耦合,由此可得能够在等效折射率分别为  $n_{e1}$  与  $n_{e2}$  的两反向传输模式之间发生耦合的 Bragg 谐振波长为  
 $\lambda_B = 2(n_{e1} + n_{e2})\Lambda$ , 当两个模式相同时有  $\lambda_B = 2n_{e1}\Lambda$ . 上述各式确定了光栅的中心谐振波长  $\lambda_B$  与光栅周期  $\Lambda$  以及模式的等效折射率  $n_e$  之间的关系,为光纤光栅在外界环境作用下中心波长的传感响应提供了理论依据,即任何使  $\Lambda$  和  $n_e$  这两种参量发生改变的过程都将引起光栅中心波长  $\lambda_B$  的移位.由上述 Bragg 光栅方程可推得外界折射率  $n_{ex}$  与光栅中心波长  $\lambda_B$  的变化依赖关系:

$$\lambda_B = \frac{d[(n_{e1} + n_{e2})]}{dn_{ex}} n_{ex} = n_{ex} \left[ \left( \frac{dn_{e1}}{dn_{ex}} + \frac{dn_{e2}}{dn_{ex}} \right) + (n_{e1} + n_{e2}) \frac{d}{dn_{ex}} \right]. \quad (1)$$

若忽略光栅栅隔  $\Lambda$  随外界折射率  $n_{ex}$  的变化,外界环境折射率改变导致的光栅中心波长相对移位为

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = \left( \frac{dn_{e1}}{dn_{ex}} + \frac{dn_{e2}}{dn_{ex}} \right) \frac{n_{ex}}{n_{e1} + n_{e2}}. \quad (2)$$

相对于基模场的分布形式,由于高阶模的场更多地向包层中延伸,可以预期如果少模光纤光栅的外部折射率发生变化,基模与高阶模耦合对应的谐振波长变化值要高于基模之间耦合对应的谐振波长变化值.

对于少模光纤,如果控制输入条件使正向仅有基模传输, Bragg 光栅中导模之间的耦合实际上即为正向传输的基模与反向传输的基模或满足相位匹配条件的高阶模之间的耦合.对于普通圆形光纤,场分量取圆对称的分布形式,只有  $LP_{0n}$  ( $n = 1, 2, \dots$ ) 模才能与  $LP_{01}$  发生耦合. D 形光纤的横截面非圆对称,场分量与角量的依赖关系和截面的积分形式也不再满足正余弦的周期关系,因此,正向传输的  $LP_{01}$  模有可能和任意形式的  $LP_{mn}$  模发生耦合.由模拟计算结果知<sup>[5]</sup>, D 形光纤 Bragg 光栅中正向传输的  $LP_{01}$  模与反向传输  $LP_{11}$  模和  $LP_{02}$  模都能发生耦合,只是由于  $LP_{11}$  模与  $LP_{01}$  模的耦合系数很小, Bragg 波长随外界

折射率改变时几乎看不到  $LP_{11}$  模对应的耦合峰的移动;而  $LP_{02}$  模与  $LP_{01}$  模的耦合系数较大,耦合深度较高,将可以看到较为明显的耦合峰变化.

## 2 D形光纤的样品制作及其化学刻蚀

我们首先采用 MCVD 化学气相沉积装置制作了圆形光纤预制棒,直径为 10.5 mm,然后将此光纤预制棒沿轴向的一侧进行研磨,根据设计的光纤尺寸,按比例磨去一部分包层,约 4.5 mm,直至被研磨的平面接近光纤芯使预制棒的形状呈 D 形,然后进行抛光,图 2 是我们研磨好的 D 形光纤预制棒的照片.



图 2 D形预制棒照片

Fig. 2 Preform of D-shape optical fiber

将磨好的 D 形预制棒放在自行研制的小型拉丝机上进行熔融拉丝,拉丝过程中适当控制温度使其不宜过高,使光纤截面仍保持 D 形.同时高温火焰中的拉丝对 D 平面(即抛光平面)进一步起火焰抛光作用,使 D 平面成为极其光滑的低散射表面.值得指出的是,在 D 形光纤的拉丝过程中,常常会发生一些扭点,这是应该尽量避免的,一种有效的方法是将 D 形光纤预制棒的平面一侧正对着引丝轮的方向,使光纤平面一侧正好贴在绕丝轮上.

D 形光纤的平面一侧距离芯子边界比较近,一般在几到十几微米左右,因此光在波导中传输时,一部分光场将在包层以外的介质中传输,这时 D 形光纤就成为渐变场波导或器件,相应的传输损耗比普通单模光纤大.图 3 是我们拉制出的 D 形光纤在光学显微镜下的端面照片,光纤外周的粗糙表面是由于切割端面造成的,纤芯处的亮斑是出射光波的发散角引起的,其直径显然大于实际的纤芯尺寸.

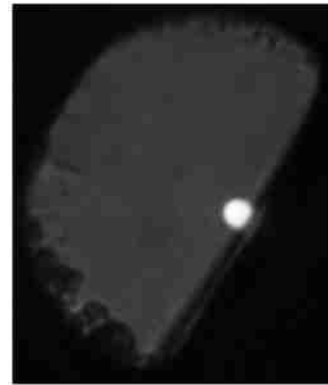


图 3 D形光纤端面显微镜照片

Fig. 3 Optical microscope photo of D-shaped optical fiber

一般来说,光纤包层的厚度越小,传输模式场与外界折射率的相互作用强度越大,当外界折射率变化时,其 Bragg 波长的响应灵敏度也就越高.但是普通圆形光纤包层腐蚀得很薄时,光纤本身变得极细,其机械性能随之降得很低,给具体实验操作带来很大的困难.而 D 形光纤由于其本身的结构特点,即使平面一侧腐蚀得很薄时,另一侧的包层仍然能够保持较大的厚度,光纤仍然具有一定的机械强度,可以进行实验操作.利用这一优点,可以进一步提高基于 D 形光纤的 Bragg 光栅传感器件的波长响应灵敏度.另外,由于研磨过程和拉丝工艺过程较为复杂,研磨和拉丝精度难以精确控制,因此也需要采用后期腐蚀的方法,将尺寸予以修正.

石英玻璃具有良好的耐化学腐蚀性能,除氢氟酸(HF)和热磷酸之外,无论在高温或低温下,对任何浓度的有机酸和无机酸都耐腐蚀,是一种最优良的耐酸材料.实验中首先对光纤进行一些工艺上的预处理,D 形光纤由于其结构的非圆对称性,涂敷保护层不易用常规的机械方法剥除,需用丙酮溶液浸泡 2~3 min 之后使其保护层变软以利于操作.我们配置了 20%浓度的 HF 用以腐蚀光纤,为了精确得出腐蚀后光纤的形状及其包层厚度,我们在不同的时间下,腐蚀了若干根 D 形光纤,用 Philips-xl30 扫描电镜(SEM)分别观测其截面形状,未腐蚀的光纤看不到纤芯的所在位置,而经过腐蚀的光纤(如图 4)可以看到,这是因为纤芯和包层都是二氧化硅材料,而纤芯较高的锗掺杂浓度致使其相应于 HF 的腐蚀速度要大于包层,因此从图 4 中可以看到纤芯周围因为腐蚀而留下的圆晕.



图 4 腐蚀 5 min 后的 D 形光纤截面扫描电镜照片  
Fig. 4 Scanning electron microscope image of the D-shape fiber after etching of 5 minutes

通过观测可以得出图 4 中 D 形光纤的截面尺寸,宽度约为 122  $\mu\text{m}$ ,厚度约为 77  $\mu\text{m}$ ,芯径为 8.31  $\mu\text{m}$ 左右,纤芯到 D 平面的距离约为 9.72  $\mu\text{m}$ ,由此可推出此时纤芯边缘距 D 平面的最近距离  $h$  约为 5.56  $\mu\text{m}$ . 综合不同腐蚀时间下 D 形光纤的腐蚀深度,可以得出时间和深度基本呈线性变化的关系,20% HF 下光纤的腐蚀速度约为 0.6  $\mu\text{m}/\text{min}$ .

### 3 D 形光纤 Bragg 光栅的实验测量

我们制作 D 形光纤的预制棒的单模工作波长是 1 310 nm,其单模截止波长约为 1 200 nm,当我们采用 1 050 nm 附近的宽带光源注入光纤时,就会在光纤中形成少模传输的工作模式,通过红外荧光片可以观察到光纤的出射光斑呈多层花瓣状.我们在此 D 形少模光纤中采用紫外光刻技术写入 1 050 nm 附近的 Bragg 光栅,并通过化学蚀刻的方法将光纤包层腐蚀掉一部分以提高其对外界环境的敏感度.测量采用由 980 nm 波长半导体泵浦激光器、1 050 nm 的 3 dB 耦合器、Yb 掺杂光纤构成的 1 000 ~ 1 100 nm 波长范围 ASE 宽带光源.光谱仪采用 ANDO 公司的 AQ6317B.实验系统框图如图 5 所示,其中端口 1 为光栅传输谱输出端,端口 2 为光栅反射谱输出端. D 形光栅直接腐蚀 16 min,腐蚀掉的光纤厚度约为 9.6  $\mu\text{m}$ .与图 4 中腐蚀 5 min 后 D 形光纤截面的比较可知其已腐蚀到纤芯,腐蚀进入纤芯的深度  $d$  约为 9.6 - 3 - 5.56 = 1.04  $\mu\text{m}$ .

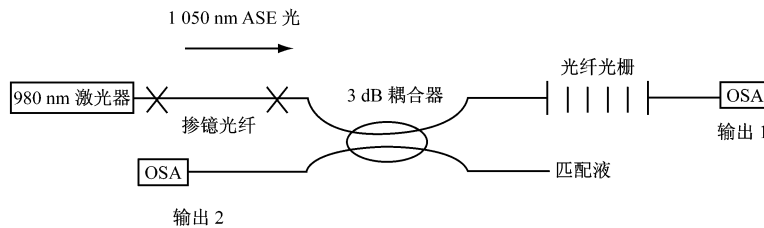


图 5 实验测试系统框图  
Fig. 5 Layout of the measurement setup

我们分别测量了 D 形少模光纤光栅的传输光谱和反射光谱,传输谱线上分别在 1 056、1 055 和 1 053.5 nm 附近出现了 3~4 个反射峰,分别对应为正向传输的  $LP_{01}$  模和反向传输的  $LP_{01}$  模、 $LP_{02}$  模和  $LP_{03}$  模的耦合谐振峰.每个模式的母峰旁边分裂出一个很微弱的子峰,初步估计是由于波导双折射现象引起,反射峰的精细结构可以参见反射光谱图 6 和 7.

利用 D 形少模光纤的 Bragg 光栅,我们分别测量了温度不变时(25 室温)外界折射率分别为 1.0 (空气)、1.33(纯水)和 1.4(50%浓度甘油)的反射谱线,如图 6 所示.

从图 6 可以看出,折射率变大时,Bragg 波长向长波长方向移动,以波长最长的两个反射峰(分别对应的是正向传输的  $LP_{01}$  模和反向传输的  $LP_{01}$  模、 $LP_{02}$

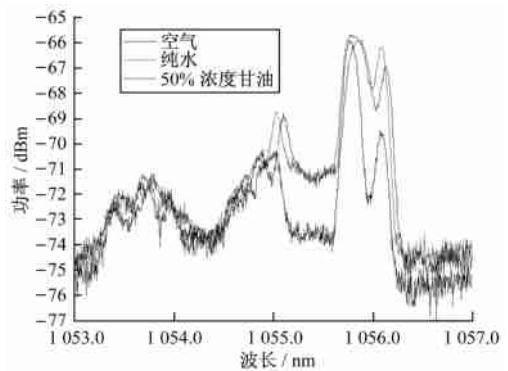


图 6 D 形少模光栅在不同外界折射率下的反射谱线  
Fig. 6 Reflecting spectrum of D-shape fiber few modes grating in different refractive index

模耦合谐振峰)为例,当  $n_{ex}$  从 1.0 变化到 1.33 时,它们分别右移了  $B_1 = 0.015 \text{ nm}$  和  $B_2 = 0.026$

nm,当  $n_{ex}$  从 1.33 变化到 1.4 时,分别右移了  $B_1 = 0.023$  nm 和  $B_2 = 0.059$  nm,两者之间的比值  $B_2/B_1 = 2.56$ .

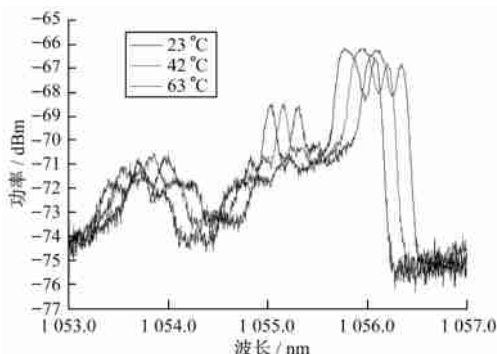


图 7 D 形少模光栅在不同温度下的反射谱线

Fig. 7 Reflecting spectrum of D-shape fiber few modes grating in different temperature

根据 Apollo 光子公司的 APSS 波导分析和设计软件进行的模拟计算结果<sup>[5]</sup>,在外界折射率变化相同的情况下,腐蚀进入纤芯的深度  $d$  越大,Bragg 波长漂移量越大,且  $LP_{02}$  模对应的 Bragg 波长漂移量比  $LP_{01}$  模更大,只是两者之间的比值随着腐蚀深度  $d$  的增大而减小.当腐蚀深度  $d = 0.5 \mu\text{m}$  时, 4.26;  $d = 1.5 \mu\text{m}$  时, 2.47;  $d = 4.5 \mu\text{m}$  时, 1.78.

比较可知,该比值的实验值 2.56 与腐蚀深度为  $1.5 \mu\text{m}$  时的模拟计算值 2.47 较为接近,因此可以估算出 D 形光纤腐蚀深度稍小于  $1.5 \mu\text{m}$ ,与之前参照腐蚀时间估算出来的  $1.04 \mu\text{m}$  腐蚀深度略有偏差.同时考虑到 D 形光纤纤芯尺寸并不完全符合模拟计算时采用的  $9 \mu\text{m}$  的纤芯直径,以及电镜扫描时的操作误差和数据处理时的舍入误差,可以粗略估计出我们实验中所采用的 D 形光纤光栅腐蚀深度应在  $1.0 \sim 1.5 \mu\text{m}$  之间.

利用 D 形少模光纤的 Bragg 光栅,我们又分别测量了外界折射率不变时(纯水)液体的温度分别为 23、42 和 63 时的反射谱线,如图 7 所示.从图 7 可以看出,当温度从 23 变化到 42 时, $LP_{01}$  模和  $LP_{02}$  模 Bragg 波长分别向长波长方向移动了  $B_1 = 0.13$  nm 和  $B_2 = 0.128$  nm,当温度从 42 变化到 63 时, $LP_{01}$  模和  $LP_{02}$  模 Bragg 波长分别右移了  $B_1 = 0.145$  nm 和  $B_2 = 0.150$  nm. $LP_{01}$  模和  $LP_{02}$  模 Bragg 波长随温度的变化率分别约为 7.0 和

6.9 pm/ ,两者的差别基本可忽略不计.

## 4 讨论

当外界折射率变化时,D 形少模光纤 Bragg 光栅的谐振峰中心波长也随之发生移动,而且包层模的阶数越高,对外界环境变化的灵敏度越高,所对应的中心波长移动量也就越大.通过模拟计算和实验测量的方法可以得出在某条件(如光栅周期、包层厚度、环境温度等)下,外界折射率与光栅谐振峰中心波长的对应关系.利用此对应关系,在未知环境中就可以通过观察光栅谐振峰中心波长的移动来确定该环境折射率的改变,达到传感测量的目的.

值得注意的是,D 形光纤深度腐蚀时,纤芯不再是圆对称结构,对于偏振方向不同的入射光将产生较为明显的波导双折射现象,使得平行和垂直于 D 形光纤侧平面的两个偏振方向上的传播常数不同,即有效折射率不同,从而同一个耦合模式就有可能产生两个谐振峰.影响 D 形光纤波导双折射的因素有光纤的腐蚀深度、入射光波长以及外界折射率的变化等,同一个耦合模式由于偏振方向不同分裂出来的两个耦合峰对于外界折射率变化的响应灵敏度也不相同.D 形光纤光栅深度腐蚀时,腐蚀深度越大,Bragg 耦合峰对于外界折射率的灵敏度越高,但同时引入的波导双折射现象更为严重(有效折射率的差越大,分裂双峰的间距越大),光纤之间的连接损耗也更大.因而不能一味追求高响应灵敏度,波导双折射效应和连接损耗也应作为选择合适的腐蚀深度的综合判据.

采用光纤光栅进行传感测量时经常会遇到多参数干扰的问题,Bragg 光栅也不能忽略交叉敏感现象,做折射率测量时也应该同时考虑温度和应力、应变对 Bragg 波长的影响.如何克服温度变化对测量结果的影响是保证测量结果准确性的一个重要问题.从图 7 中的实验结果可知,采用少模光纤光栅进行外部折射率变化测量的方案中,由于  $LP_{01}$  模之间及  $LP_{01}$  与  $LP_{02}$  模之间耦合对应的 Bragg 波长有几乎相同的温度特性,因此,通过计算这两个 Bragg 波长移动量的差值  $B_1 - B_2$ ,就可以消除温度变化对测量结果的影响.

应当指出的是,由于本实验所采用的 D 形光纤的拉丝制作工艺还不够完善,在光纤中还不可避免地存在着一些扭点,导致实验中所看到的传输谱和反射谱不够平滑,双折射引入的分裂峰干扰也较为

严重,这些因素都给实际使用上必需采用的连续动态自动测量带来了很大的不便,解决以上这些问题有待于后续工作来实现.

## 5 结论

我们采用实验室现有的制棒、研磨和拉丝设备,制作了单模截止波长约为 1 200 nm 的 D 形光纤样品,并采用紫外光刻技术,制作了中心波长在 1 050 nm 附近的少模 Bragg 光栅.采用深度化学腐蚀技术增强各模式谐振 Bragg 波长对外界折射率的传感灵敏度,用扫描电镜观测不同腐蚀时间下光纤样品的截面厚度,得出光纤在 20% 浓度 HF 酸中的腐蚀速度约为 0.6  $\mu\text{m}/\text{min}$ .利用深度腐蚀的 D 形少模光纤 Bragg 光栅,我们分别测量了温度不变时外界液体折射率分别为 1.0、1.33 和 1.4 时的反射谱线,发现外界折射率变大时,LP<sub>01</sub> 模和 LP<sub>02</sub> 模的 Bragg 波长均向长波长方向移动,但 LP<sub>02</sub> 模的 Bragg 波长的移动量更大,约为 LP<sub>01</sub> 模 Bragg 波长移动的 2.56 倍.我们又分别测量了外界液体温度分别为 23、42 和 63 时的反射谱线,得出 LP<sub>01</sub> 模和 LP<sub>02</sub> 模 Bragg 波长随温度的

变化率分别约为 7.0 和 6.9 pm/ ,两者随温度的变化量基本相同,据此可以找到一种消除温度变化对测量结果交差影响的有效方法.

## 参考文献:

- [1] KHILWANIA S K, GUPTA B D. Fiber optic evanescent field absorption sensor: effect of fiber parameters and geometry of the probe [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1999, 31: 625-636.
- [2] KERSEY A D, DAVIS M A, PATRICK H J, et al. Fiber grating sensors [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1442-1463.
- [3] 王廷云,陈振宜,沈育青.单模光纤渐逝波传输分析[J].*光电子·激光*, 2003, 14(2): 166-169.
- [4] 董小鹏,李杰,戎华北,等.少模光纤 Bragg 光栅及其在折射率测量中的应用[C]//全国第 12 次光纤通信暨第 13 届集成光学学术会议论文集(OFCIO '2005),广州. 2005: 782-786.
- [5] 李杰.新型 D 形少模光纤 Bragg 光栅的特性及其在折射率测量中的应用[D].厦门:厦门大学,2006: 31-36.

(编辑:赵宇)