

文章编号:1004-4213(2010)01-0037-5

微米光纤耦合型环境折射率传感器^{*}

冯饶慧,余健辉,余卫龙[†]

(中山大学 光电材料与技术国家重点实验室,广州 510275)

摘要:本文展示一种由两根微米光纤构成的耦合型环境折射率传感器.微米光纤表面存在倏逝波,芯外介质折射率微小的改变将引起倏逝场分布变化,从而导致能量在耦合器两臂中的重新分配.本文通过测量耦合器两端出射光功率的比值来对葡萄糖溶液的浓度进行传感,实验结果表明该微米光纤耦合型传感器的浓度传感灵敏度可达 $1.58 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.本文用耦合模理论详细分析了两根相邻微米光纤的耦合效率与芯外介质折射率之间的关系,发现减小耦合区的光纤的直径,增大入射光波长或增大耦合长度,都可以进一步提高这种传感器的灵敏度.

关键词:光纤光学;耦合型环境折射率传感器;微米光纤

中图分类号:TP212.14

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103901.0037

0 引言

光纤传感器是近十年来应用十分广泛的一种新型传感器,它具有常规传感器无法比拟的优点,被认为是传感技术发展的重要方向^[1-3].2003年,童利民^[4]等在 Nature 上报道了一种新的光纤拉制方法.该方法能将一根普通光纤拉至直径为微米乃至纳米量级(称为微纳光纤).微纳光纤的直径小于传输光波长时只支持基模传输^[5],部分光能量转移到光纤表面附近区域,以围绕着光纤的倏逝波形式传播.芯外介质折射率的微小改变将引起倏逝波场分布的显著变化.这种大比例倏逝波传输的特性使微纳光纤可以直接用作传感元件并制成功能型传感器.用微纳光纤制作的传感器,如环形^[6],盘绕形^[7],拉锥光纤^[8-9]等,都具有很高的灵敏度和稳定性.经查阅发现,目前用微纳光纤做的传感器仅限于谐振腔型^[6-7]和单根拉锥光纤^[8-9].

文献[10]的研究结果表明,两根微纳光纤耦合实现最大能量交换所需的最小耦合长度 L 比弱波导耦合系统要短得多.由此可知,微纳光纤耦合器的耦合系数大,对光纤附近的物质的折射率即环境折射率变化非常敏感,用它作为传感器不仅灵敏度高,还可以有效地减小器件尺寸以及减少探测所需分析物的量.基于此,本文提出一种由两根微米光纤耦合构成的耦合型传感器,并以葡萄糖溶液浓度为例研究它的传感特性.这种非谐振腔式传感器不必考虑谐振效果,可以用于气体和液体的测量,适用范围较

为广泛.相比其它类型传感器,它不仅具有灵敏度高的优点,而且制作简单,参量的测量范围广,成本低廉.

1 传感器制作方法

用酒精灯将两根平行放置的剥去涂覆层的标准单模光纤(corning, SMF28)进行拉锥.拉锥过程的速度要适当,使得锥形部分过渡非常缓慢,满足绝热近似条件,从而降低微米光纤的损耗.在加热区域均匀恒定的条件下,束腰部能够形成一段直径均匀的微米光纤.当拉至合适的直径时撤去酒精灯,放松两端夹具.由于分子间范德瓦尔斯力的作用,两根微米光纤紧紧地黏附在一起,形成耦合区,这样就制作成了一个 2×2 定向耦合器.这种方法很容易推广到制作 $n \times n$ 定向耦合器.

2 传感原理

当光波在两根微纳光纤的耦合区传播时,由于一根光纤的倏逝场与另一根光纤的传播模场发生“相互作用”,原来在一根光纤中传输的光波将通过这种“作用”部分或全部隧穿到另一根光纤,从而被另外一根光纤的纤芯“俘获”,这样光就通过耦合区耦合到第二根光纤中,最后在两根光纤输出端形成一定的功率分配.假设光功率全部由第一根光纤的注入,即 $P_1(0) = P_0, P_2(0) = 0$,如图 1.当两根光纤纤芯的直径相同时,根据耦合模理论,通过耦合区后,第一根光纤的输出光强是

$$P_1(L) = P_0 \cos^2(KL) \quad (1)$$

第二根光纤的输出光强是

$$P_2(L) = P_0 \sin^2(KL) \quad (2)$$

^{*} 国家自然科学基金(10874251)资助

[†] Tel:020-84112863 Email:shewl@mail.sysu.edu.cn

收稿日期:2009-01-20

修回日期:2009-04-20

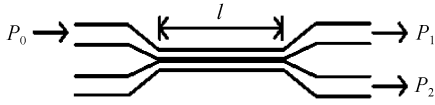


图1 微纳光纤耦合器工作原理示意

Fig.1 Sketch of the principle of microfiber coupler

式中 K 是耦合系数, l 是耦合长度^[11]. K 表示在耦合区域一根光纤的传播模场与另一根光纤的倏逝场相互作用的强弱, 它的大小直接反映耦合器两光纤间传递能量的特性及效果. K 值的大小通常由波导的形状、大小, 传输波长, 传导介质和包层的折射率决定. 两根微纳光纤耦合时 K 如何随芯外介质折射率的变化而变化, 可用耦合模理论^[12] 来处理. 由于微纳光纤是以原包层作为纤芯, 芯外介质作为新包层的波导结构, 芯内外高折射率差的波导已不是弱波导, 而且当两根光纤之间距离很近时, 构成的耦合系统已不属于弱耦合系统, 经典耦合模公式对微纳光纤不再适用. 上个世纪 80 年代, 强耦合模理论得到深入的发展. 很多文献都对经典耦合模公式做出了改进, 提出了适用于强耦合系统的耦合模理论. 其中, Chuang 利用互易定理和变分原理得到的全矢量耦合模公式, 满足能量守恒定理^[13]. 该耦合模公式得到的光纤 2 相对于光纤 1 的耦合系数等于

$$K_{12} = (\bar{K}_{12} - \bar{K}_{22}\bar{c}) / (1 - \bar{c}^2) \quad (3)$$

光纤 1 相对于光纤 2 的耦合系数等于

$$K_{21} = (\bar{K}_{21} - \bar{K}_{11}\bar{c}) / (1 - \bar{c}^2) \quad (4)$$

式中

$$\bar{K}_{ab} = \frac{\omega}{4} \iint \Delta\epsilon^{(b)} (\mathbf{E}_t^{(a)} \cdot \mathbf{E}_t^{(b)} - \frac{\epsilon^{(a)}}{\epsilon} \mathbf{E}_z^{(a)} \mathbf{E}_z^{(b)}) dx dy \quad (5)$$

$$(a, b = 1, 2) \quad (5)$$

$$\bar{c} = (C_{12} + C_{21}) / 2 \quad (6)$$

$$C_{ab} = \frac{1}{2} \iint \mathbf{E}_t^{(b)} \times \mathbf{H}_t^{(a)} \cdot \mathbf{z} dx dy \quad (a, b = 1, 2) \quad (7)$$

在式(5)和(7)中, $\mathbf{E}_t^{(i)}$ 、 $\mathbf{E}_z^{(i)}$ ($i=1, 2$) 表示光纤 i 的横向和纵向电场分量; $\epsilon^{(1)}(x, y)$ 表示只有光纤 1 存在时介电常量的横向空间分布; $\epsilon^{(2)}(x, y)$ 表示只有光纤 2 存在时介电常量的横向空间分布; $\epsilon(x, y)$ 表示两根光纤都存在时介电常量的横向空间分布, $\epsilon(x, y) = \epsilon_0 n^2(x, y)$, $n(x, y)$ 为折射率(包括环境折射率)的横向空间分布;

$$\Delta\epsilon^{(i)}(x, y) = \epsilon(x, y) - \epsilon^{(i)}(x, y), (i=1, 2);$$

ω 表示圆频率; $\mathbf{H}_t^{(i)}$ ($i=1, 2$) 表示光纤 i 的横向磁场分量. 在两根光纤相同的情况下

$$K = K_{12} = K_{21} \quad (8)$$

由此可见, 当微纳光纤的外界条件, 包括温度、应变、压力、折射率等变化时, 都会引起介电常量、电场和磁场空间分布的变化, 这些变化将改变积分 K_{ab} 和 C_{ab} 值, 从而引起耦合系数 K 的变化. 本文提

出的传感器正是基于芯外介质折射率的变化引起 K 值的变化, 从而改变输出端光功率的分配来实现的. 这一原理不但可以做成实时传感器, 而且也可以做成输出功率可调 2×2 分束器.

假设两根粗细均匀、半径为 r 的微米光纤平行放置, 当两圆心之间的距离等于 $2r$ 时, 利用式(3)~(8) 计算得出耦合系数随芯外介质折射率变化的情况如图 2. 其中图 2(a) 给出入射光波长为 980 nm, 半径分别为 700 nm、800 nm、900 nm, 耦合系数 K 随芯外介质折射率的变化曲线. 图 2(b) 对应的光纤半径为 700 nm, 入射光波长分别为 980 nm、800 nm、650 nm, 耦合系数 K 随芯外介质折射率的变化曲线. 由图可以看出, 耦合系数随着芯外介质折射率变大而变大, 光纤半径越小或者入射光波长越长, 耦合系数越大. 这是因为折射率的变化导致 E 、 H 的大小及其在芯内外的能量分布的改变, 芯外介质折射率越大或入射波长与光纤半径的比值越大, 越多的能量分布到微米光纤的周围, 参与两根光纤的能量交换, K 的值也就越大. 图 3 对应图 2 的情况, l 取 2.2 mm 时, 分光比随芯外介质折射率变化曲线. 随着折射率的增大, 半径较小的和入射光波长较长的幅宽较窄, 变化区域更加剧烈. 显然, 若折射率发生相同的变化, 耦合系数大的耦合器较耦合系

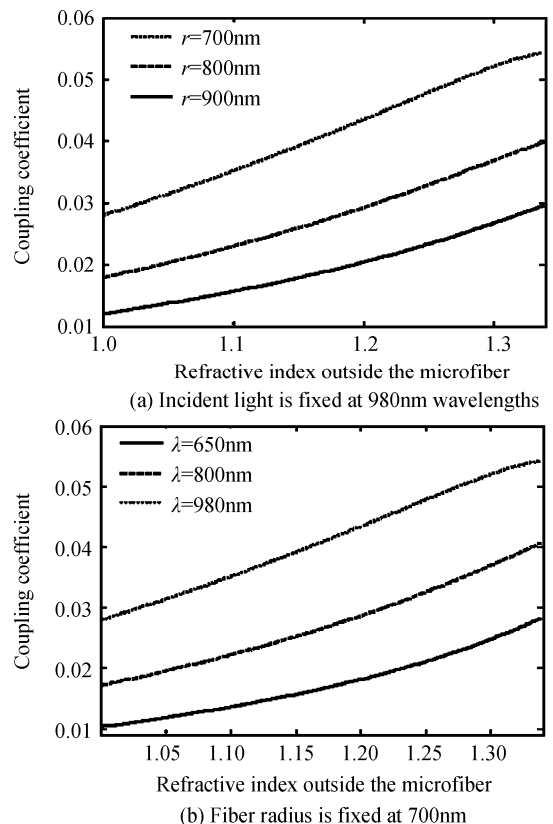


图2 耦合系数变化曲线

Fig.2 Coupling coefficient vs. refractive index outside the microfiber

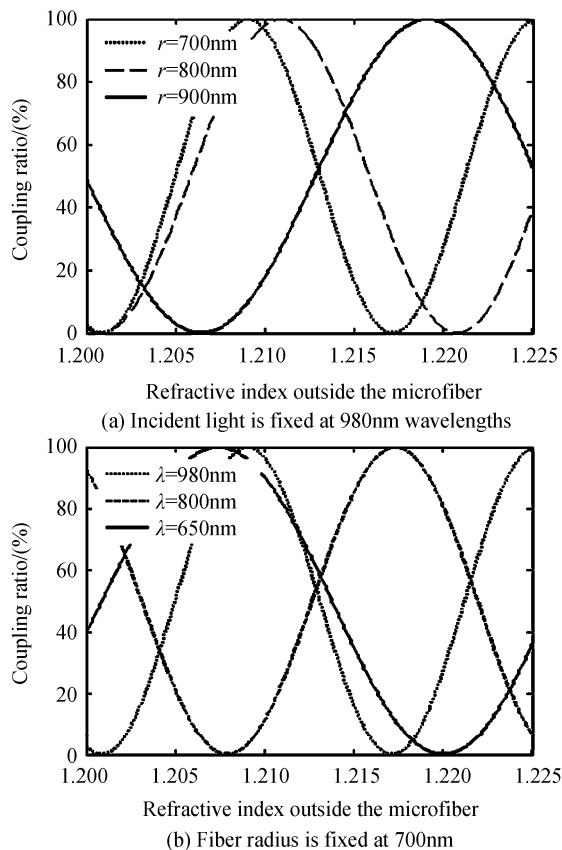


图3 耦合分光比变化曲线

Fig. 3 Coupling ratio vs. refractive index outside the microfiber

数小的耦合器分光比变化更大. 从式(1)也可看出, 增大 l 值也可使幅宽变窄, 变化更加剧烈. 综合以上分析可知, 要获得较高的灵敏度, 可以通过减小耦合区光纤直径或增大工作波长或加大耦合长度来实现. 值得注意的是, 灵敏度的提高还在于合理地设定参量初始值使得输出信号折射率动态范围较大的单调变化.

3 传感实验

本文以葡萄糖溶液作为传感器环境(葡萄糖溶液折射率即是传感器环境折射率), 研究传感器的特性. 浓度是化工、农业生产、医疗检测、医药工程等方面非常重要的参量. 一般情况下, 当某种气体或液体的浓度改变时, 其折射率也发生改变. 葡萄糖溶液的折射率与浓度的关系是

$$n = 1.332\ 305\ 45 + 0.000\ 118\ 89C$$

其中 $C(\text{g/L})$ 是葡萄糖溶液的浓度^[14]. 实验装置图如图4, 首先将耦合器用玻璃器皿封装起来, 玻璃器皿上有小孔, 用于注水. 将 980 nm 波长的光作为入射光, 两个出射光端口接光功率计. 然后把去离子水缓慢注入器皿, 直到浸没耦合区, 再逐次加入葡萄糖溶液, 测量出射光的光功率. 整个实验过程保持室温为 25 °C.

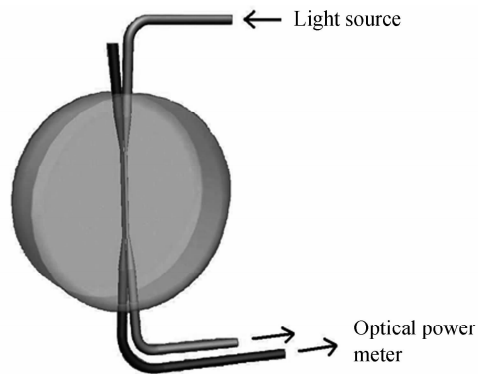


图4 实验装置

Fig. 4 Scheme of experimental setup

实验中, 在每次注入溶液后都对耦合区进行观察, 确定耦合区的结构没有被稀释过程中流动的液体破坏. 如图5, 其中图5(a), (b)和(c)分别是第一次, 中间的一次和最后一次加入溶液后拍摄的显微图, 从图中可以看出溶液在稀释过程中足够缓慢没有破坏耦合区的结构. 图5(d), (e)和(f)对应图5(c)中不同区域两根微米光纤的放大图, 其中图5(d)和(f)在耦合区外. 图中双向箭头表明了这两根光纤的相对位置, 也反映出此处光纤的直径, 约为 $5\ \mu\text{m}$. 图5(e)是耦合区的一部分, 可清楚看见两根粘在一起的光纤, 每根光纤的直径大约为 $1.32\ \mu\text{m}$. 因为两根光纤有效耦合只是发生在中间均匀的最细的部分, 所以我们仅取这部分长度作为耦合长度, 也称为有效耦合长度. 本次实验的有效耦合长度约为 2.2 mm.

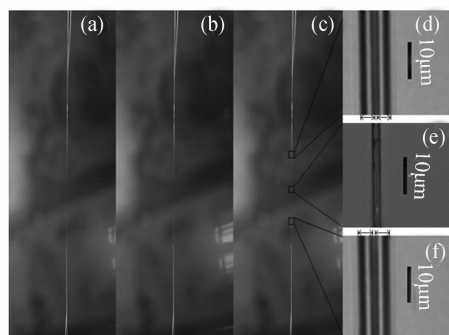


图5 光纤耦合器显微图

Fig. 5 Micrograph of microfiber coupler

实验结果如图6, 星号为实验数据, 实线为理论曲线. 理论曲线是将耦合区光纤直径及有效耦合长度的数值代入式(3)~(8)得到的. 我们采用分光可见度来表示耦合系数随浓度的变化关系^[15]. 分光可见度的定义是 $(P_1 - P_2)/(P_1 + P_2) = \cos(2Kl)$, P_1 和 P_2 的大小见式(1)和(2). 其分子引入输出功率相减的功能, 它可以降低光源功率波动对传感数据测试的影响, 消除与浓度无关因素的影响, 提高了输出信号的信噪比, 从而进一步提高传感灵敏度. 当葡萄糖溶液浓度从 $0.077\ 4\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到

0.309 3 mol · L⁻¹时,耦合的分光可见度由-0.008 升高到 0.358 6,平均变化灵敏度为 1.58 mol · L⁻¹,即 67.09 RIU.由图可以看出实验值与理论值符合得很好.

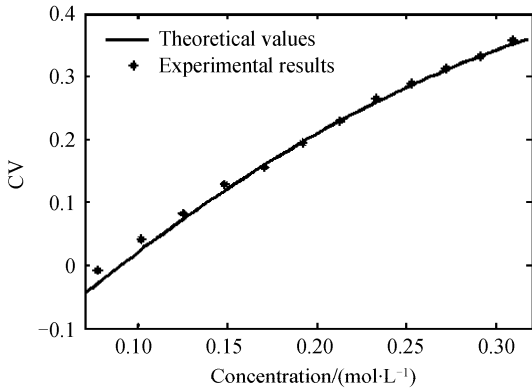


图6 分光可见度与溶液浓度的关系

Fig. 6 Coupler visibility vs. the concentration of glucose solution

4 结论

本文介绍了一种由两根微米光纤做成的耦合器,利用环境折射率随浓度变化而产生的耦合系数微小变化来改变倏逝场乃至两光纤中能量的分布,从而实现传感.用这种耦合器对葡萄糖溶液浓度进行传感,其传感灵敏度可达 1.58 mol · L⁻¹.理论分析表明,这种耦合型传感器还可以通过减小耦合区光纤的直径或增大入射光波长或增大耦合长度来进一步提高灵敏度.这种传感器还可以推广到对气体的浓度,温度,湿度等参量的传感,有望应用于环境、生产过程和产品质量监控、临床疾病监测、DNA 检验等方面.

参考文献

- [1] MA Bin, SUI Qing-mei, XU Jian. Experimental investigation on coupling fiber-optic vibration sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(11): 2310-2315.
马宾,隋青美,徐健.耦合型光纤振动传感器实验研究[J].光子学报, 2008, **37**(11): 2310-2315.
- [2] YANG Shu-lian. Development of a new type of optical fiber pressure transducer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 838-841.
杨淑连.一种新型光纤压力传感器的设计[J].光子学报, 2007, **36**(5): 838-841.
- [3] SU Hui, HUANG Xu-guang, WU Yi-ting. Design and study of fiber refractive index sensor based on intensity modulation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(11): 713-716.
苏辉,黄旭光,邬怡婷.强度调制型光纤折射率传感器的设计与研究[J].光子学报, 2008, **37**(11): 713-716.
- [4] TONG L M, GATTASS R R, ASHCOM J B, et al. Subwavelength-diameter silica wires for low-loss optical wave guiding [J]. *Nature*, 2003, **426**(7): 816-819.
- [5] TONG L M, LOU J Y, MAZUR E. Single-mode guiding properties of subwavelength-diameter silica and silicon wire [J]. *Optics Express*, 2004, **12**(6): 1025-1035.
- [6] GUO X, TONG L M. Supported microfiber loops for optical sensing [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(19): 14429-14434.
- [7] XU F, HORAK P, BRAMBILLA G. Optical microfiber coil resonator refractometric sensor [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(12): 7888-7893.
- [8] PAVEL P, ALEXANDER P, PEYGHAMBARIAN N, et al. Evanescent field-based optical fiber sensing device for measuring the refractive index of liquids in microfluidic channels [J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(11): 1273-1275.
- [9] SUMETSKY M, WINDELER R S, DULASHKO Y, et al. Optical liquid ring resonator sensor [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(22): 14376-14381.
- [10] HUANG K J, YANG S Y, TONG L M. Modeling of evanescent coupling between two parallel optical nanowires [J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(9): 1429-1434.
- [11] CHUANG S L. Application of the strongly coupled-mode theory to integrated optical devices [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1987, **QE-23**(5): 499-509.
- [12] LIANG Hua-wei, SHI Shun-xiang, MA Lin, et al. Study on coupling in a multi-waveguides array [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4): 644-647.
梁华伟,石顺祥,马琳,等.多波导阵列耦合研究[J].光子学报, 2008, **37**(4): 644-647.
- [13] CHUANG S L. A coupled mode formulation by reciprocity and a variation principle [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1987, **LT-5**(1): 5-15.
- [14] YEH Y L. Real-time measurement of glucose concentration and average refractive index using a laser interferometer [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, **46**: 666-670.
- [15] BAO Hua-yu, WANG Ting-yun. An enhanced fiber-optic temperature sensor for coupler visibility monitoring [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2005, **16**(12): 1413-1416.
包华育,王廷云.基于耦合分光可见度的光纤温度传感器[J].光电子·激光, 2005, **16**(12): 1413-1416.

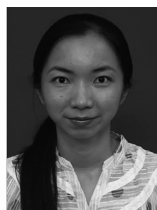
Environment Refractive Index Sensor Based on Microfiber Coupler

FENG Rao-hui, YU Jian-hui, SHE Wei-long

(State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: An environment refractive index sensor composed of two identical coupling microfiber was demonstrated. Due to the presence of evanescent-wave at the surface of microfiber, the slight variation of the environment refractive index outside the microfiber will result in the change of the evanescent-wave and therefore results in the redistribution of energy in two arm of the coupler. In the experiment, the concentration of the glucose solution was sensed by measuring the ratio of output powers at two ends of the coupler. The experiment result shows that the sensitivity of this sensor is as high as $1.58 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. The relationship between coupling efficiency and the environment refractive index is analyzed in detail based on a coupled mode theory. It is found that the sensitivity of this sensor can be further enhanced by decreasing the diameter of microfiber, or by increasing the wavelength of the incident light, or by increasing the length of coupling region.

Key words: Fiber optics; Coupler for environment refractive index sensing; Microfiber



FENG Rao-hui was born in 1981. She is pursuing her M. S. degree in the State key Laboratory of optoelectronic Materials and Technologies, Sun Yat-sen University. Her research interests focus on optical fiber communication and optical fiber sensor.



SHE Wei-long was born in 1952. He received the Ph. D. degree from State Key Laboratory of Ultrafast Laser Spectroscopy, Sun Yat-sen University. He is a professor and Ph. D. Supervisor in 1998. His research interests focus on high-speed optical fiber communication (all-optical switch, new type optical modulator), nonlinear optics (electro-optic effect, optical spatial solitons), and theory on the nature of light.