

# 基于游标效应的高灵敏度光纤耦合器折射率传感器

郝晋青, 韩丙辰\*

太原师范学院物理系, 山西 太原 030619

**摘要** 为解决传统光纤折射率传感器灵敏度较低的问题, 提出一种基于游标效应增强的拉锥光纤耦合器折射率传感器。利用拉锥光纤耦合器的双折射效应, 在耦合器中形成  $x$  偏振态和  $y$  偏振态两路模式(奇模与偶模)干涉, 两路略有差别的干涉通过叠加, 形成游标效应。通过理论分析和数值计算, 发现当拉锥耦合器的宽度为  $1.6\sim 3.2\ \mu\text{m}$  时, 奇模与偶模的群双折射系数差值会出现零点, 折射率传感器的灵敏度会得到显著增强。在理论分析和数值仿真的基础上, 实验研究了宽度为  $1.6\ \mu\text{m}$  的光纤耦合器的折射率传感性能, 并在折射率  $1.333$  附近获得了  $30020.0\ \text{nm/RIU}$  和  $-34402.5\ \text{nm/RIU}$  的超高灵敏度。该传感器制作简单、结构紧凑且成本较低, 在高灵敏度生物医学检测和分析化学领域具有重要应用前景。

**关键词** 光纤光学; 光纤传感器; 折射率传感器; 光纤耦合器; 游标效应

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0206002

## Ultrasensitive Refractive Index Sensor Based on Optical Fiber Couplers Assisted with Vernier Effect

Hao Jinqing, Han Bingchen\*

Department of Physics, Taiyuan Normal University, Taiyuan, Shanxi 030619, China

**Abstract** In this study, we propose an ultrasensitive refractive index sensor based on tapered optical fiber couplers and assisted with the vernier effect to overcome the problem of low sensitivity of the conventional optical fiber refractive index sensors. Two passes of mode interferences between the even and odd modes, can be achieved in both  $x$ -polarization and  $y$ -polarization by utilizing the birefringence effect of the tapered optical fiber couplers, and the superposition of these two interferences results in the vernier effect. Based on theoretical analysis and numerical calculations, the difference in the group birefringence coefficient between the even and odd modes is observed to denote zero points when the width of the tapered optical fiber coupler is  $1.6\sim 3.2\ \mu\text{m}$ , significantly enhancing the sensitivity of the refractive index sensor. Further, we experimentally demonstrate our theoretical results using a tapered optical fiber coupler with a width of  $1.6\ \mu\text{m}$ , achieving ultrahigh sensitivities of  $30020.0\ \text{nm/RIU}$  and  $-34402.5\ \text{nm/RIU}$  near the refractive index of  $1.333$ . Our sensor is easy to fabricate, compact in structure, and cost effective, and it exhibits significant application prospects in the fields of ultrasensitive biomedical detection and analytical chemistry.

**Key words** fiber optics; optical fiber sensor; refractive index sensor; optical fiber coupler; vernier effect

**OCIS codes** 060.2310; 060.2370; 060.1810

## 1 引 言

光纤折射率传感器是一类重要的光纤传感器件, 在生化分析、环境监测、食品安全等领域具有广泛的应用前景。光纤折射率传感器具有体积小、灵敏度高、抗电磁干扰、可远程监测和成本低等优点, 相比传统体积较大的光学仪器更易于实现小型化、便携化。因此, 近年来科研人员围绕光纤折射率传

感器开展了广泛而细致的研究。

这些工作集中在新型光纤器件的研发上, 光纤折射率传感器从传统的锥形光纤传感器<sup>[1]</sup>逐渐发展为各式各样的新型传感器件, 包括光纤光栅传感器<sup>[2]</sup>、光纤耦合器传感器<sup>[3]</sup>、光子晶体光纤传感器<sup>[4]</sup>, 以及光纤等离子体共振传感器<sup>[5]</sup>等。此外, 很多研究工作集中在对已有传感器件的增敏研究上, 通过在光纤表面引入具有特殊光学性质的纳米材料

收稿日期: 2019-06-10; 修回日期: 2019-07-31; 录用日期: 2019-09-09

基金项目: 山西省科技攻关项目(2015031002-1)

\* E-mail: han\_bchen@126.com

实现传感性能的提升。例如,在光纤表面修饰金/银纳米球<sup>[6]</sup>、纳米棒<sup>[7]</sup>、纳米片<sup>[8]</sup>等具有局域表面等离子体共振增强特性的纳米材料,或者加入石墨烯<sup>[9]</sup>、二硫化钼<sup>[10]</sup>等具有优异光电性能的二维材料来提高表面的电磁场强度,从而提高传感器的灵敏度。这些研究对光纤折射率传感器的发展起到了重要的推动作用。然而,受光纤本身材料特性和传输特性的限制,这些传感器往往在外界折射率接近光纤本身折射率(约为 1.44)时才能达到较高灵敏度,主要原因在于只有当周围折射率接近光纤本身折射率时才能获得较高的倏逝场功率占有率,从而增强光与周围待测物质的相互作用强度。然而,在实际应用中,光纤折射率传感器主要工作在水溶液( $n \approx 1.33$ )环境中,由于工作环境与光纤本身具有较大的折射率差值,因此倏逝场能量占有率以及传感器的灵敏度受到限制,并进一步制约了光纤折射率传感器的应用。因此,如何提高光纤折射率传感器在 1.33 处的灵敏度成为当前亟待解决的瓶颈问题。

针对该问题,研究人员提出采用游标效应来提高折射率传感器的灵敏度,通过引入两路周期有细微差别的干涉并进行叠加,即可实现对原有信号的放大增强,将灵敏度提高一个数量级。Quan 等<sup>[11]</sup>通过在光纤端面制作腔长接近的级联法布里-珀罗谐振腔结构,引入游标效应,实现了对空气折射率的超高灵敏度探测,灵敏度达到 30899 nm/RIU。Xu 等<sup>[12]</sup>通过级联两个直径相近的微纳光纤谐振环,实现了游标效应增强,在折射率 1.33 处灵敏度达到了 6523 nm/RIU。此外,Shu 等<sup>[13]</sup>首次提出了具有色散拐点的长周期光纤光栅传感器,通过合理设计光栅的周期,使光纤中基模与高阶包层模式之间出现色散拐点,进而在折射率 1.33 附近实现了超高灵敏度折射率探测。Luo 等<sup>[14]</sup>在锥形光

纤中发现了模间干涉的色散拐点,并利用拐点将 1.33 附近的折射率灵敏度提升了一个数量级,达到  $10^4$  nm/RIU。Li 等<sup>[15]</sup>在微纳光纤耦合器中发现了奇模与偶模之间干涉的模间色散拐点,并从实验上实现了 1.33 附近的高灵敏度折射率传感。这些开创性的研究作为进一步提升光纤折射率传感器性能提供了可推而广之的思路。

本文提出一种基于游标效应增强的拉锥光纤耦合器传感器,与之前报道的基于级联结构的游标效应的不同之处在于:所提传感器基于单个光纤耦合器器件,通过两个正交偏振态的干涉叠加,实现游标效应。通过理论分析和数值计算,发现通过合理设计耦合器的直径参数,可实现折射率 1.33 附近的超高灵敏度传感;在此基础上,通过实验研究,验证了理论分析与数值计算的结果,并在实验上实现了折射率 1.33 附近的超高灵敏度传感,灵敏度达到了  $3 \times 10^5$  nm/RIU 量级。所提传感器具有结构简单、集成度高的特点,在生化传感领域具有重要的应用价值。

## 2 基本原理

### 2.1 理论分析

典型的拉锥光纤耦合器结构如图 1 所示,包括由两根平行排列的微纳光纤形成的耦合区域,两个输入端口和两个输出端口。其中,耦合区域可以看作具有一定双折射的光波导,当  $x/y$  偏振态的入射光从端口 1 导入,通过锥形渐变区会被激励起偶模和奇模,偶模和奇模同时在耦合区域前向传播并发生干涉,从而在输出端 3 和 4 得到互补的干涉光谱。当输入光源为  $x$  偏振和  $y$  偏振叠加时,由于耦合区域具有一定的双折射效应,因此会在输出端得到两列干涉周期略有不同的不同偏振的干涉谱的叠加,从而形成游标效应。

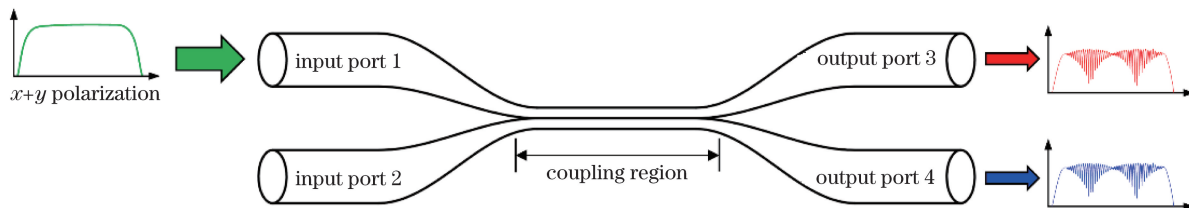


图 1 拉锥光纤耦合器结构示意图及游标效应原理图

Fig. 1 Schematic of tapered optical fiber coupler and basic principle of vernier effect

假设入射光中  $x$  偏振和  $y$  偏振所占光功率分别为  $P_{1x}$  和  $P_{1y}$ ,那么在输出端口 3 可获得的输出功率为<sup>[16]</sup>

$$P_3 = P_{1x} \cos^2\left(\frac{1}{2}\phi_x\right) + P_{1y} \cos^2\left(\frac{1}{2}\phi_y\right), \quad (1)$$

式中: $P_{1x}$ 和 $P_{1y}$ 分别为入射光中的  $x$  偏振态和  $y$  偏

振态功率;  $\phi_x$  和  $\phi_y$  分别为  $x$  偏振态和  $y$  偏振态的偶模和奇模在耦合区域所积累的相位差。假设耦合区域的等效长度为  $L$ , 偶模和奇模  $x$  偏振态的有效折射率(ERI)分别为  $n_{\text{even}_x}$ 、 $n_{\text{odd}_x}$ ,  $y$  偏振态的有效折射率分别为  $n_{\text{even}_y}$ 、 $n_{\text{odd}_y}$ , 入射光波长为  $\lambda$ , 那么, 同一偏振态的偶模和奇模的相位差可以表示为

$$\phi_x = \frac{2\pi L(n_{\text{even}_x} - n_{\text{odd}_x})}{\lambda}, \quad (2)$$

$$\phi_y = \frac{2\pi L(n_{\text{even}_y} - n_{\text{odd}_y})}{\lambda}. \quad (3)$$

假设入射光中的  $x$  偏振态和  $y$  偏振态功率相等, 即  $P_{1x} = P_{1y} = P_1/2$ , 则有

$$P_3 = \frac{P_1}{2} \left[ 1 + \cos\left(\frac{\phi_x - \phi_y}{2}\right) \cos\left(\frac{\phi_x + \phi_y}{2}\right) \right]. \quad (4)$$

将  $\cos\left(\frac{\phi_x - \phi_y}{2}\right) \cos\left(\frac{\phi_x + \phi_y}{2}\right)$  看作连续载波信号, 那么通过希尔伯特变换可求得信号的下包络为

$$F_c = \frac{P_1}{2} \left( 1 - \left| \cos\left(\frac{\phi_x - \phi_y}{2}\right) \right| \right) = \frac{P_1}{2} \left[ 1 - \left| \cos\left(\frac{\pi L(\Delta n_{\text{eff}_x} - \Delta n_{\text{eff}_y})}{\lambda}\right) \right| \right], \quad (5)$$

式中:  $\Delta n_{\text{eff}_x}$ 、 $\Delta n_{\text{eff}_y}$  分别为奇模和偶模在  $x$  偏振、 $y$  偏振下的折射率差。下包络曲线中的波谷满足

$$\cos\left[\frac{\pi L(\Delta n_{\text{eff}_x} - \Delta n_{\text{eff}_y})}{\lambda_N}\right] = \cos\left[\frac{\pi L(B_{\text{even}} - B_{\text{odd}})}{\lambda_N}\right] = \pm 1, \quad (6)$$

式中:  $B_{\text{even}} = n_{\text{even}_x} - n_{\text{even}_y}$ , 表示波导中偶模的双折射系数;  $B_{\text{odd}} = n_{\text{odd}_x} - n_{\text{odd}_y}$ , 表示波导中奇模的双折射系数;  $N$  表示任意正整数。由(6)式可得

$$\frac{\pi L(B_{\text{even}} - B_{\text{odd}})}{\lambda_N} = N\pi, \quad (7)$$

将(7)式等号两边分别针对折射率  $n$  取偏导数并通过整理可得到基于游标效应拉锥光纤耦合器对折射率的灵敏度公式, 可表示为

$$S_v = \frac{\partial \lambda_N}{\partial n} = \frac{\lambda_N}{G_{\text{B}}^{\text{even}} - G_{\text{B}}^{\text{odd}}} \frac{\partial(B_{\text{even}} - B_{\text{odd}})}{\partial n}, \quad (8)$$

式中:  $G_{\text{B}}^i = B_i - \lambda_N \partial B_i / \partial \lambda$  代表奇模/偶模的群双折射系数, 其中  $i$  代表奇模或者偶模。根据(8)式, 即可求得传感器的折射率灵敏度, 并对传感器的参数进行优化。特殊情况下, 例如当满足条件  $G_{\text{B}}^{\text{even}} - G_{\text{B}}^{\text{odd}} = 0$  时, 折射率灵敏度会趋向于无穷大。由于耦合器耦合区域横截面较为复杂, 很难采用解析法求解出其模式的有效折射率, 因而, 下面将采用数值计

算的方法对拉锥光纤耦合器中模式的有效折射率进行求解, 进而计算出传感器的灵敏度, 并对传感器的传感特性进行研究。

## 2.2 数值计算

采用有限时域差分法(FDTD)求解不同宽度的耦合器中稳定传输的偶模和奇模的有效折射率, 根据有效折射率分别计算出偶模/奇模的双折射系数及群双折射系数, 并进一步通过(8)式计算出传感器的折射率灵敏度。这里研究的拉锥光纤耦合器的耦合区域宽度范围为  $1.6 \sim 3.2 \mu\text{m}$ , 波长范围为  $600 \sim 1850 \text{ nm}$ 。

典型的偶模和奇模模场分布如图 2(a)所示, 相比之下,  $x$  偏振态与  $y$  偏振态的奇模模场差别较大, 相应地, 奇模的双折射系数会比较大;  $x$  偏振态与  $y$  偏振态的偶模模场差别较小, 相应地, 偶模的双折射系数会比较小。图 2(b)和 2(c)分别为不同宽度的耦合器的偶模和奇模在  $x/y$  偏振态下的有效折射率, 基于有效折射率得到耦合器的偶模和奇模双折射系数, 结果见图 2(d), 显然对于不同宽度的耦合器, 其奇模的双折射系数均大于偶模的双折射系数。图中  $w$  为束腰直径。

通过数值计算, 进一步求出群双折射系数的差值  $\Delta G_{\text{B}}$ , 如图 3(a)所示, 对于不同宽度的耦合器, 随着波长的增加,  $\Delta G_{\text{B}}$  均从负值逐渐增大为正值, 再逐步减小, 直至奇模截止。宽度为  $1.6 \sim 3.2 \mu\text{m}$  的耦合器均存在合适波长, 满足  $\Delta G_{\text{B}} = 0$  (称之为零点), 从而使传感器的折射率灵敏度得到显著增强。进一步通过计算求得耦合器的折射率灵敏度曲线, 结果如图 3(b)所示, 不同宽度的耦合器均在各自对应零点波长附近出现折射率灵敏度的显著增强。在零点的左边, 随着波长靠近零点, 灵敏度迅速增大; 而在零点的右边, 灵敏度为负值, 并随着波长靠近零点而迅速减小。

为了进一步研究基于游标效应的耦合器的折射率传感增强特性, 根据求得的双折射系数, 通过(4)式计算出宽度为  $1.6 \mu\text{m}$ 、长度为  $6.01 \text{ mm}$  的耦合器的透射光谱, 通过(6)式计算出透射光谱的下包络曲线, 并研究了传感器的输出光谱对外界折射率的响应传感性能, 结果如图 3(c)所示。在不同外界折射率下, 输出光谱均显示出明显的包络, 当外界折射率从  $1.3330$  逐步增加至  $1.3345$  时, 初始位置位于  $675 \text{ nm}$  和  $925 \text{ nm}$  的包络曲线波谷分别迅速向长波长方向和短波长方向移动, 并逐渐融合成一个波谷, 波谷位置约为  $800 \text{ nm}$ , 这与前面计算得出的零点位置相一致。

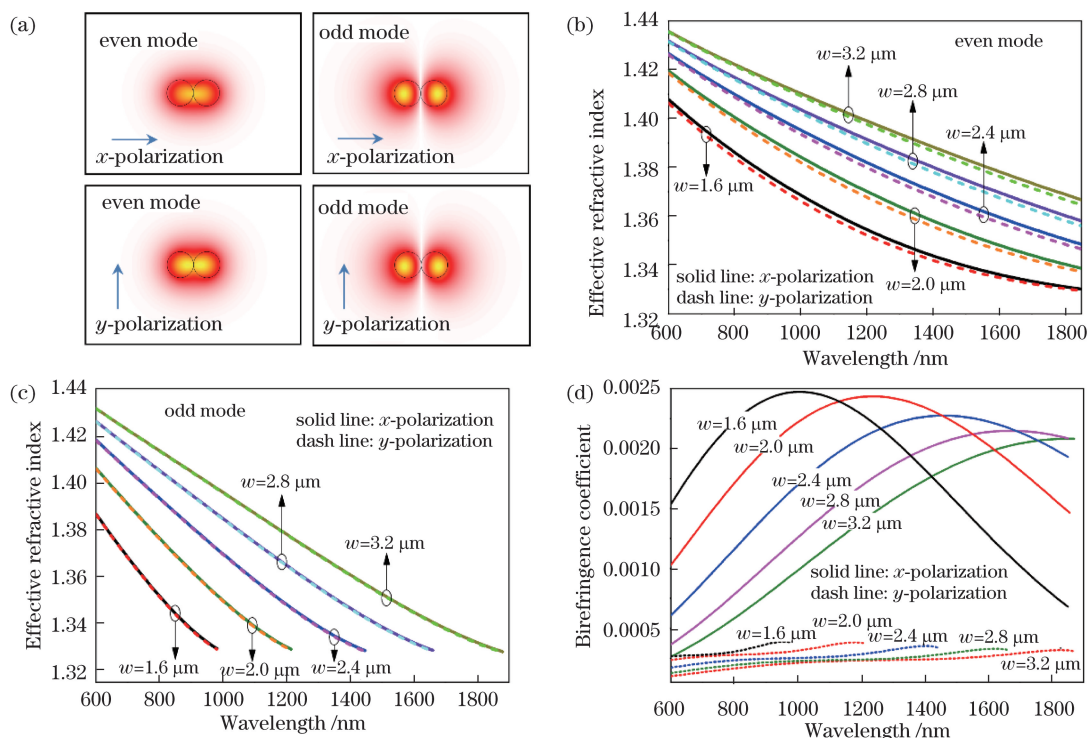


图 2 耦合器中模式特性的计算结果。(a)  $x$  偏振和  $y$  偏振的偶模和奇模的模场分布( $\lambda = 1000 \text{ nm}$ ,  $w = 2.0 \mu\text{m}$ );(b)不同宽度的耦合器中偶模的有效折射率;(c)不同宽度的耦合器中奇模的有效折射率;(d)不同宽度的耦合器中偶模和奇模的双折射系数

Fig. 2 Calculated results of mode properties of optical fiber coupler. (a) Modal-field distributions of odd mode and even mode in both  $x$ -polarization and  $y$ -polarization ( $\lambda = 1000 \text{ nm}$ ,  $w = 2.0 \mu\text{m}$ ); (b) effective refractive index of even mode in optical fiber couplers with different widths; (c) effective refractive index of odd mode in optical fiber couplers with different widths; (d) birefringence coefficients of even and odd modes in optical fiber couplers with different widths

### 3 实验研究与讨论

基于以上理论分析和数值计算结果,进一步通过实验来验证游标效应对传感器折射率灵敏度的增强效应。拉锥光纤耦合器采用氢氧焰熔融拉锥的方式制备<sup>[17-18]</sup>,图 4(a)为光纤拉锥装置的示意图,主要由电动位移平台(Motorized stage),光纤夹具(Clamp)和火焰头(Torch)组成。将两段去除塑料涂覆层的单模光纤(Corning, SMF-28)并排靠拢放置于拉锥装置上,并用光纤夹具固定,氢氧焰火焰头固定于可往复运动的电动平台上,沿光纤轴向对光纤进行加热,两侧电动平台以恒定速度向外拉伸,即可制作出拉锥光纤耦合器,耦合器宽度可通过控制拉锥速度和拉锥时间实现精确调控,耦合区域长度可以通过调节火焰扫描距离来控制。本研究中采用的火焰头宽度约为  $4 \text{ mm}$ ,火焰扫描距离为  $2 \text{ mm}$ ,扫描速度为  $20 \text{ mm/min}$ ,两侧电动平台拉锥速度为  $0.1 \text{ mm/min}$ ,拉锥时间为  $7 \text{ min}$ 。所制作

出的耦合器如图 4(b)所示,均匀锥腰长度约为  $6 \text{ cm}$ ,锥腰宽度约为  $1.6 \mu\text{m}$ 。将制作好的耦合器固定于制作的液体流通池即可用于折射率传感和生化传感实验。

本实验所用到的测量实验装置如图 4(c)所示,主要包括宽带光源(BBS)和光谱仪(OSA)两部分,其中光源为安扬激光公司生产的 SC-5 超连续谱光源(波长范围:  $470 \sim 2400 \text{ nm}$ ),光谱仪为 Yokogawa 公司的 AQ6370D 光谱仪(波长范围:  $600 \sim 1700 \text{ nm}$ ,分辨率:  $0.02 \text{ nm}$ )。将耦合器的一个输入端与超连续谱光源相连,耦合器的一个输出端接入光谱分析仪,即可实现对耦合器透射光谱的测量和传感实验。

首先对耦合器的输出光谱进行测试,如图 5(a)为宽度为  $1.6 \mu\text{m}$ 的耦合器在  $x$  偏振或  $y$  偏振单独输入时的透射光谱,虽然表现出明显的干涉现象,但是并没有出现由游标效应引起的包络调制。图 5(b)为该耦合器在  $x$  和  $y$  双偏振状态下的输出

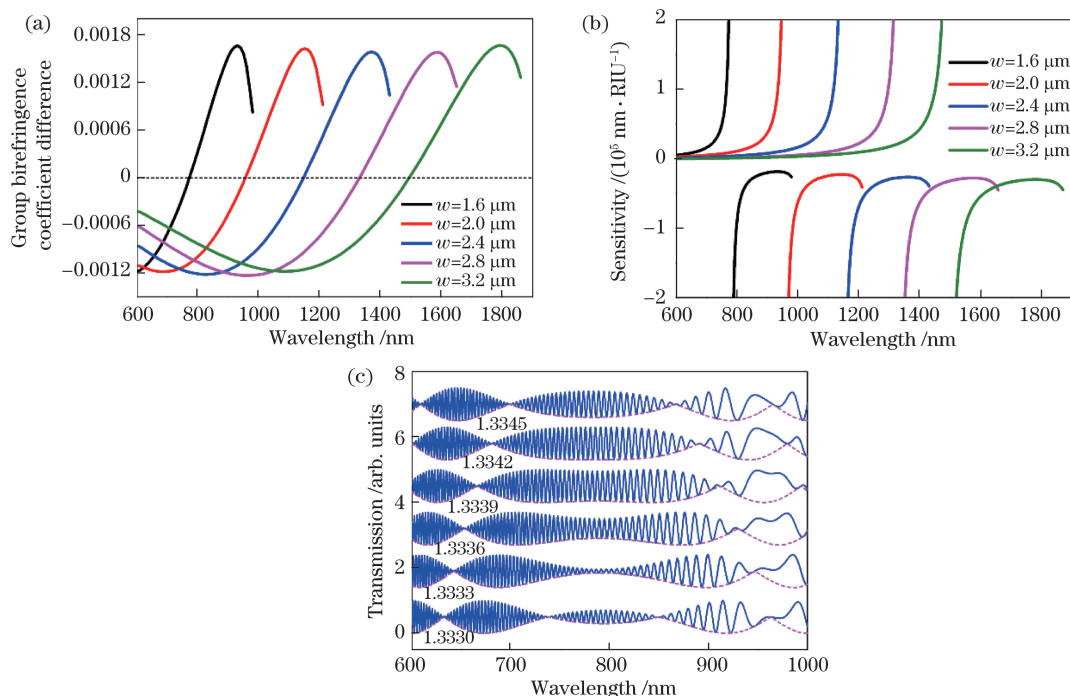


图 3 耦合器传感特性计算结果。(a)不同宽度的耦合器中偶模和奇模的群双折射系数差值;(b)不同宽度的耦合器在 1.333 处的折射率灵敏度计算值;(c)耦合器的透光光谱随外界折射率响应的模拟结果(耦合区宽度和长度分别为 1.6  $\mu\text{m}$  和 6.01 mm)

Fig. 3 Calculated results of sensing properties of optical fiber coupler. (a) Difference in group birefringence coefficient between even and odd modes for optical fiber couplers with different widths; (b) calculated refractive index sensitivities of optical fiber couplers with different widths at refractive index of 1.333; (c) simulated transmission-spectral response of optical fiber coupler varying with refractive index (width and length of coupling region are 1.6  $\mu\text{m}$  and 6.01 mm, respectively)

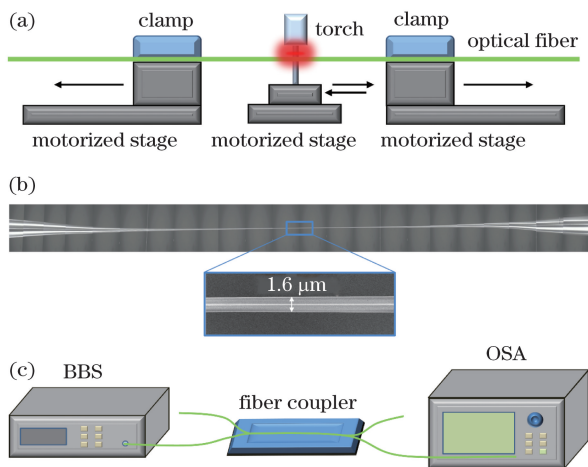


图 4 耦合器的制作及测试。(a)光纤拉锥装置图;(b)拉锥光纤耦合器光学显微镜照片和束腰区域扫描电镜照片;(c)实验测量装置图

Fig. 4 Fabrication and testing of optical fiber coupler. (a) Schematic of optical fiber tapering setup; (b) optical micrograph of tapered optical fiber coupler and scanning electron microscope image of waist region; (c) experimental setup for measurement

光谱图,光谱干涉条纹仍然较为密集,但明显可见有双偏振干涉叠加形成的包络,且与数值模拟的光谱较为接近。

采用氯化钠水溶液配制折射率溶液,对宽度为 1.6  $\mu\text{m}$  的耦合器的传感特性进行系统研究,输出光谱随折射率的变化如图 5(c) 所示。可见,当光纤周围液体的折射率从 1.33300 以微小间隔逐步增加至 1.33458 时,光谱下包络曲线的波谷 A 和 A' 分别向长波长和短波长发生显著移动,并在折射率为 1.33458 时合并为一个较宽的波谷,拐点位置大约在 800 nm。传感器的折射率响应趋势与数值模拟所得结论相一致。通过统计不同外界折射率对应的波谷波长位置,可得到波谷 A 和 A' 的灵敏度分别为 30020.0 nm/RIU 和 -34402.5 nm/RIU,比传统的光纤折射率传感器的灵敏度高出将近一个数量级<sup>[3]</sup>。由于大多数生物化学样品的折射率范围在 1.333 左右,因此基于游标效应的光纤耦合器折射率传感器非常适合应用于高灵敏度的生物医学检测和化学分析领域。

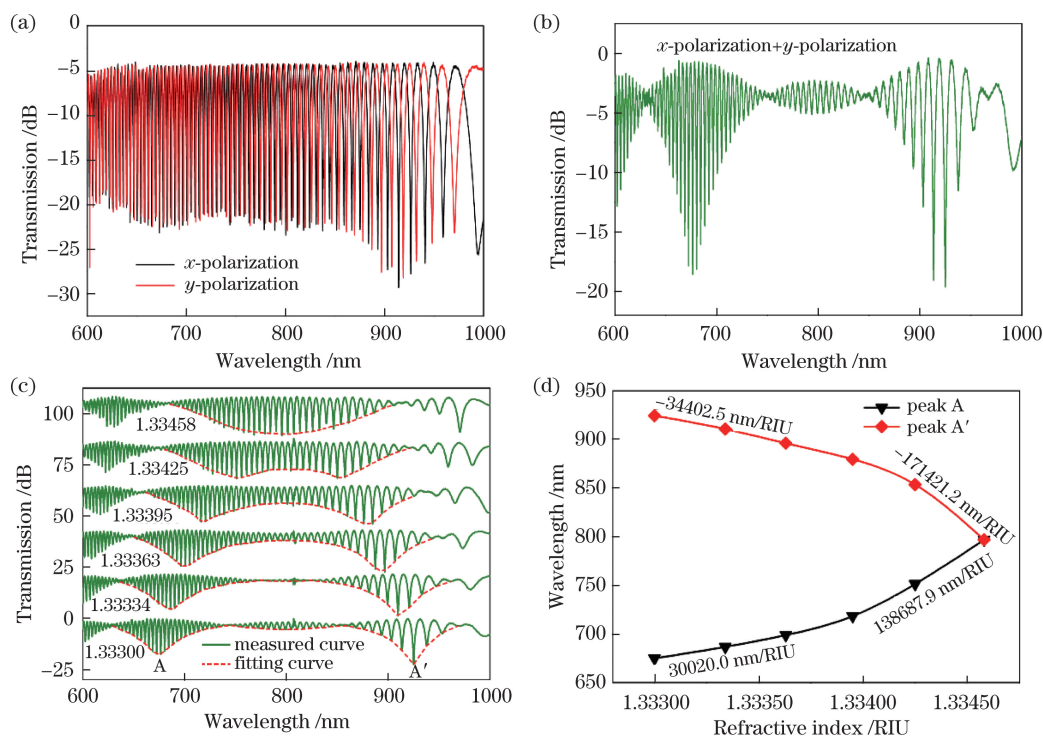


图 5 实验结果。(a) $x$  偏振和  $y$  偏振的透射光谱;(b)引入游标效应的透射光谱;(c)基于游标效应的耦合器对外界折射率的响应实验结果;(d)传感器的折射率灵敏度

Fig. 5 Experimental results. (a) Transmission spectra of optical fiber coupler in  $x$ -polarization and  $y$ -polarization; (b) transmission spectrum of optical fiber coupler with vernier effect; (c) experimental results of optical fiber coupler assisted with vernier effect varying with surrounding refractive index; (d) calculated refractive index sensitivities of sensor

## 4 结 论

本研究立足于传统的拉锥光纤耦合器,通过耦合器的双折射效应引入游标效应,实现了折射率传感性能的提升。首先从理论上推导出基于游标效应的耦合器折射率传感器的灵敏度公式,然后与数值计算方法相结合,系统研究了宽度为 $1.6\sim 3.2\ \mu\text{m}$ 的拉锥光纤耦合器的折射率传感性能。研究表明,在特定波长下,耦合器内的偶模与奇模的群双折射系数相等,即差值为零,可显著提高传感器的灵敏度,并且该特定波长的左侧灵敏度为正值,右侧灵敏度为负值。在此基础上,进一步对传感器的特性进行了实验研究,采用一根直径约为 $1.6\ \mu\text{m}$ 、长度约为 $6\ \text{mm}$ 的耦合器实现了在折射率 $1.333$ 附近的超高灵敏度折射率测量,灵敏度达到了 $30020.0\ \text{nm/RIU}$ 和 $-34402.5\ \text{nm/RIU}$ ,比传统的光纤折射率传感器的灵敏度高出将近一个数量级。该传感器具有结构紧凑、制作简单、成本低廉的优点,可用于高灵敏度的生物分子探测和化学物质分析,本课题下一步研究计划是将传感器进

行阵列化,并针对生物传感等实际应用场景进行测试研究。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang T, Liu Y G, Liu X, et al. Preparation of micro-nano optical fiber and study on its optical property[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2018, 40(5): 704-708.  
张庭, 刘颖刚, 刘鑫, 等. 微纳光纤的制备及其光学特性研究[J]. *压电与声光*, 2018, 40(5): 704-708.
- [2] Peng X L, Li B, Li Y L. Research progress of refractive index and concentration sensors based on micro-nanofiber Bragg grating[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(12): 120010.  
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): 120010.
- [3] Tazawa H, Kanie T, Katayama M. Fiber-optic coupler based refractive index sensor and its application to biosensing[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(11): 113901
- [4] Jha R, Villatoro J, Badenes G, et al. Refractometry based on a photonic crystal fiber interferometer[J].

- Optics Letters, 2009, 34(5): 617-619.
- [5] Zhang Y, Zhu X S, Shi Y W. Hollow optical fiber surface plasmon resonance sensor based on light intensity detection[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(6): 0606001.  
张琦, 朱晓松, 石艺尉. 光强检测型空芯光纤表面等离子体共振传感器[J]. 光学学报, 2017, 37(6): 0606001.
- [6] Mitsui K, Handa Y, Kajikawa K. Optical fiber affinity biosensor based on localized surface plasmon resonance[J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(18): 4231-4233.
- [7] Cao J, Tu M H, Sun T, et al. Wavelength-based localized surface plasmon resonance optical fiber biosensor[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2013, 181: 611-619.
- [8] Khaleque A, Mironov E G, Osório J H, et al. Integration of bow-tie plasmonic nano-antennas on tapered fibers[J]. Optics Express, 2017, 25(8): 8986-8996.
- [9] Dash J N, Jha R. Graphene-based birefringent photonic crystal fiber sensor using surface plasmon resonance[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(11): 1092-1095.
- [10] Li D, Lu H, Qiu W, et al. Molybdenum disulfide nanosheets deposited on polished optical fiber for humidity sensing and human breath monitoring[J]. Optics Express, 2017, 25(23): 28407-28416.
- [11] Quan M R, Tian J J, Yao Y. Ultra-high sensitivity Fabry-Perot interferometer gas refractive index fiber sensor based on photonic crystal fiber and Vernier effect[J]. Optics Letters, 2015, 40(21): 4891-4894.
- [12] Xu Z L, Sun Q Z, Li B R, et al. Highly sensitive refractive index sensor based on cascaded microfiber knots with Vernier effect[J]. Optics Express, 2015, 23(5): 6662-6672.
- [13] Shu X W, Zhang L, Bennion I. Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings[J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 20(2): 255-266.
- [14] Luo H P, Sun Q Z, Li X L, et al. Refractive index sensitivity characteristics near the dispersion turning point of the multimode microfiber-based Mach-Zehnder interferometer[J]. Optics Letters, 2015, 40(21): 5042-5045.
- [15] Li K W, Zhang T, Liu G G, et al. Ultrasensitive optical microfiber coupler based sensors operating near the turning point of effective group index difference[J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(10): 101101.
- [16] Yang S W, Wu T L, Wu C W, et al. Numerical modeling of weakly fused fiber-optic polarization beamsplitters—part II: the three-dimensional electromagnetic model[J]. Journal of Lightwave Technology, 1998, 16(4): 691-696.
- [17] Bilodeau F, Hill K O, Faucher S, et al. Low-loss highly overcoupled fused couplers: fabrication and sensitivity to external pressure[J]. Journal of Lightwave Technology, 1988, 6(10): 1476-1482.
- [18] Yu Y, Bian Q, Zhang X L, et al. All-optical intensity modulation characteristics of optical microfiber coupler based on light induced thermal effect[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6): 0606003.  
于洋, 卞强, 张学亮, 等. 微纳光纤耦合器光致热引起的全光强度调控特性[J]. 中国激光, 2018, 45(6): 0606003.