

非绝热结构模式干涉高灵敏度光纤传感器

黄如霞^{1,2}, 王越^{1**}, 周文超¹, 吴一辉^{1*}¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 133033;²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为解决干涉型锥形微纳光纤传感器结构尺寸长、加工重复性低的问题,设计了一种非绝热锥形微纳光纤传感结构。首先基于光纤模式理论研究了干涉型锥形微纳光纤传感器的传感灵敏度对腰部直径的依赖关系及其不同部位的传感特性,并研究了非绝热条件下在光纤拉锥过程中进行模式控制的方法。在此基础上设计并制作了腰部直径为 3.1 μm 、锥腰长度为 1.1 cm 的锥形微纳光纤传感结构,其低折射率检测灵敏度高达 90250 nm/RIU。该结构具有尺寸短、加工重复性好的特点,为实现传感器的小型化、集成化提供了基础,有望用于生物医疗、环境监测等领域。

关键词 光纤光学; 锥形光纤; 模式干涉; 色散转折点

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2306001

High-Sensitivity Interferometric Fiber Sensor with Non-Adiabatic Structure Mode

Huang Ruxia^{1,2}, Wang Yue^{1**}, Zhou Wenchao¹, Wu Yihui^{1*}¹ State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Given the large structure size and low processing reproducibility of the interferometric tapered micro/nano fiber sensor, this paper proposed a non-adiabatic tapered micro/nano fiber sensing structure. First, the dependence of the sensing sensitivity of the interferometric tapered micro/nano fiber sensor on the waist diameter and the sensing characteristics of different parts was investigated according to the fiber mode theory. Then, mode control in the tapering process of the fiber under the non-adiabatic condition was studied. On this basis, a tapered micro/nano fiber sensor structure was designed and fabricated with a waist diameter of 3.1 μm and a taper waist length of 1.1 cm. Its detection sensitivity of low refractive indexes reached 90250 nm/RIU. This structure, with small size and high processing reproducibility, lays a foundation for miniaturization and integration of sensors and is expected to be used in fields such as biomedicine and environmental monitoring.

Key words fiber optics; tapered fiber; mode interference; dispersion turning point

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 060.2400

1 引言

光纤传感器体积小、成本低、抗电磁干扰能力

强,具有结构简单、检测时间短、灵敏度较高等优点^[1-2],当前已经成为科研界的研究热点之一^[3],不仅在工程领域如环境监测、国防安全等方面得到了

收稿日期: 2021-05-18; 修回日期: 2021-05-28; 录用日期: 2021-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(61974143,61805241)、中科院青促会项目(2020223)、应用光学国家重点实验室开放基金(SKLAO2020001A16)

通信作者: *yihuiwu@ciomp.ac.cn; **wangyue@ciomp.ac.cn

广泛应用,也越来越在生物医学领域发挥了举足轻重的作用^[4-7]。按结构的不同,微纳光纤传感器主要有干涉型微纳光纤传感器、谐振腔型微纳光纤传感器、光栅型微纳光纤传感器、表面等离子体共振 (SPR) 微纳光纤传感器与光子晶体光纤传感器这几种^[8-12]。而干涉型锥形微纳光纤传感器以其高灵敏度获得了世界各地科研工作者的广泛关注^[13-17]。

干涉型锥形微纳光纤传感器的本质是基于模式的干涉,输入光经过一侧锥部激发起高阶模,当传输至另一侧锥部的高阶模与基模发生干涉,干涉光谱随环境折射率(RI)的改变发生光谱移动的现象。目前对于干涉型锥形微纳光纤传感器,光纤中两个模式在色散转折点(群有效折射率差等于零时)处的灵敏度趋于无穷大,为实现超高灵敏的检测提供了基础。Li 等^[18]制作的色散转折点附近的锥形微纳光纤耦合器在 1.3334 折射率下达到 39541.7 nm/RIU 的传感灵敏度。Luo 等^[19]制作了色散转折点附近基于 Mach-Zehnder 干涉的多模超细纤维折射率传感器,在 1.3334 附近折射率下实现了 10777.8 nm/RIU 的高灵敏度传感。Zhang 等^[20]提出一种折射率为 1.0 附近的高灵敏度气体折射仪,其在色散转折点附近的灵敏度高达 69984.3 nm/RIU。要实现具有色散转折点的干涉型锥形光纤高灵敏度传感,需激发一个与基模具有相同对称性的 HE₁₂ 模,同时需避免其他高阶模的干扰,因此需要对传感器制作过程的精确模式控制。Ravets 等^[21]基于氢氧焰热拉伸法研究了锥形微纳光纤加工过程的模式变化关系。Xu 等^[22]通过观察锥形光纤加工过程中的模式转化实现了对腰部直径的实时监测。锥形微纳光纤通常采用氢氧焰扫火的加工方式,导致传感器结构很长,通常可达 2 cm^[18],不便于与微流控系统的集成。因此,为解决此类传感器结构尺寸长、加工重复性低的问题,本文基于模式干涉理论研究了干涉型锥形微纳光纤传感灵敏度对腰部直径的依赖关系及其不同部位的传感特性,并研究了非绝热条件下光纤拉锥过程中模式控制的方法。在此基础上设计并制作出腰部直径为 3.1 μm、锥腰长度为 1.1 cm 的锥形微纳光纤传感结构。针对折射率与水相近的 NaCl 溶液,采用该结构对其折射率检测灵敏度进行了确认,获得的灵敏度可高达 90250 nm/RIU,这为小型化、集成化生物传感的实现和应用提供了一种有效的技术方案。

2 理论分析与计算

单根锥形微纳光纤的结构如图 1(a)所示,主要

包括总长为 L_0 的锥部、长度为 l_0 的腰部两部分。干涉型传感的本质是 HE₁₁、HE₁₂ 模式相位差的改变。设入射波长为 λ ,环境折射率为 n ,光纤芯层折射率为 n_1 ,则模式干涉的光强为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\varphi, \quad (1)$$

相位差为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_{\text{eff}2} l_0 = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{\text{eff}1} - n_{\text{eff}2}) l_0, \quad (2)$$

式中: $n_{\text{eff}1} = n_1 \sin \theta_1$, $n_{\text{eff}2} = n_1 \sin \theta_2$, 其中 θ_1 、 θ_2 为两模式的全反射角, I_1 、 I_2 分别为两种模式的光强。 $n_{\text{eff}1}$ 、 $n_{\text{eff}2}$ 分别为 HE₁₁、HE₁₂ 模式的有效折射率, $\Delta n_{\text{eff}2}$ 为两种模式的有效折射率差。

如图 1(b)所示,当锥形光纤结构确定后,工作波长、环境折射率的改变会引起 HE₁₁、HE₁₂ 模式有效折射率差的改变,即有效折射率差可以看作波长与环境折射率的函数 $n_{\text{eff}}(\lambda, n)$ 。当环境折射率变化到 $n + \delta n$ 时,对于干涉光谱的等相位点,其波长变为 $\lambda + \delta\lambda$,干涉谱发生平移。将波长变化量 $\delta\lambda$ 与环境折射率变化量 δn 的比称为灵敏度,可表示为

$$S = \frac{\delta\lambda}{\delta n}, \quad (3)$$

当相位差的变化为零,则有

$$d(\Delta\varphi) = 0. \quad (4)$$

将(2)式对 λ 、 n 求全微分并联立(3)、(4)式可得

$$S = \frac{\lambda \frac{\partial \Delta n_{\text{eff}2}}{\partial n}}{\Delta n_{\text{eff}2} - \lambda \frac{\partial \Delta n_{\text{eff}2}}{\partial \lambda}}, \quad (5)$$

式中: $G = \Delta n_{\text{eff}2} - \lambda \frac{\partial \Delta n_{\text{eff}2}}{\partial \lambda}$ 为群有效折射率差,分母 $G=0$ 时的波长为色散转折点,此时灵敏度 S 趋于无穷大。

考虑到工作波长越小则微纳光纤直径越细,因此为提高光纤机械结构稳定性,在宽光谱范围(1150~1550 nm)内进行传感灵敏度计算,得到了传感灵敏度随腰部直径的变化曲线。如图 1(c)所示,每条虚线都表明该腰部直径下锥形微纳光纤对应的波长为色散转折点,灵敏度趋于无穷大,附近的灵敏度高达几万甚至十几万 nm/RIU。以 1350 nm 波长色散转折点对应的光纤为例,记中间虚线与不同波长灵敏度曲线的交点为 A、B、C、D,可以看出小于 1350 nm 波长对应的灵敏度为正值,且波长越小灵敏度越小 ($S_A > S_B$); 大于 1350 nm 波长的灵敏度为负值,波长越大灵敏度绝

对值越小 ($|S_c| > |S_D|$), 直至 HE_{12} 模式截止。为了更直观地观察干涉光谱的平移情况, 根据(1)、(2)式分析出不同腰部直径下的环境折射率-光谱响应。具有色散转折点的光谱响应如图 1(d)所示, 其中 P_a 、 P_b 与 P_c 点为色散转折点。由图可知, 随着环

境折射率的增加, 波长较色散转折点小的干涉光谱向长波长移动、波长较色散转折点大的干涉光谱向短波长移动, 距离色散转折点越远处灵敏度越小。另外, 还可以看出, 随着腰部直径的减小, 色散转折点、 HE_{12} 模式截止波长都向短波长方向移动。

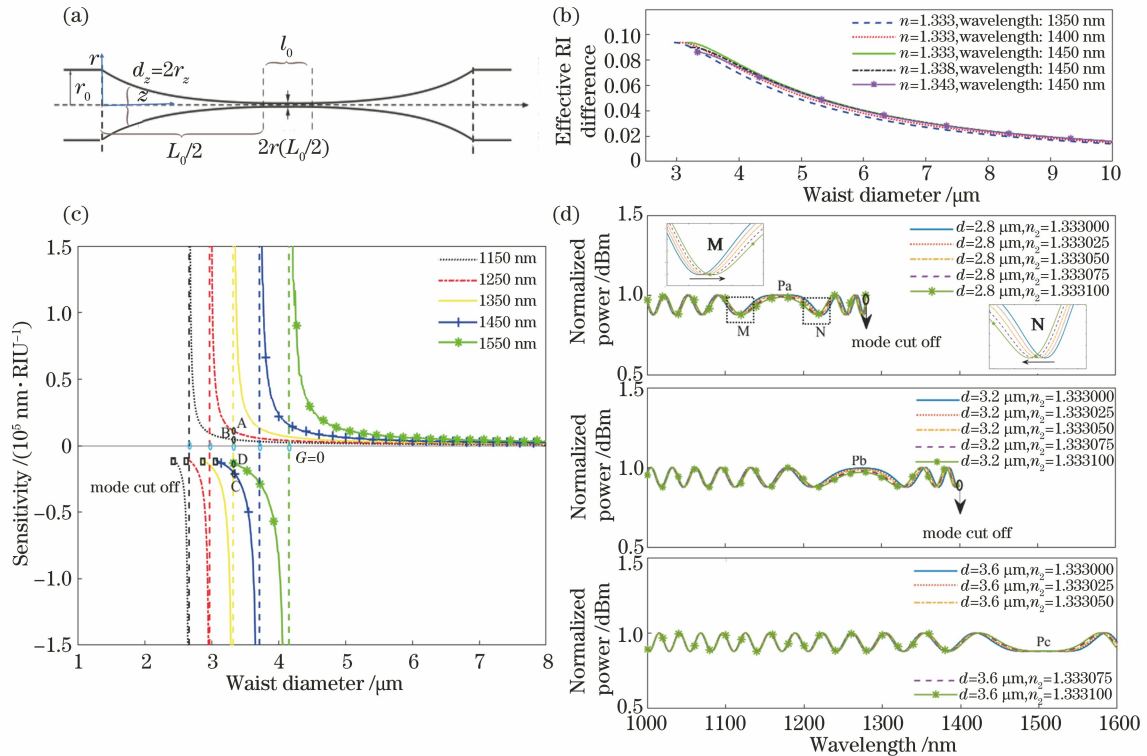


图 1 环境折射率、锥形微纳光纤直径与干涉灵敏度的关系曲线。(a)锥形微纳光纤结构示意图;(b)不同波长、环境折射率下的有效折射率差变化曲线;(c)环境折射率为 1.333 时不同波长下的灵敏度变化曲线;(d)不同腰部直径锥形微纳光纤的干涉曲线

Fig. 1 Relationship among ambient refractive index, diameter of tapered micro/nano fiber, and its interference sensitivity. (a) Structural diagram of tapered micro/nano fiber; (b) variation of effective refractive index difference under different wavelength and environmental refractive index; (c) sensitivity at different wavelengths for ambient refractive index of 1.333; (d) interference curves of tapered micro/nano fibers with different waist diameters

3 实验研究与讨论

3.1 液滴扫描传感研究

由于锥形微纳光纤的结构锥长远大于腰长, 在实际的传感过程中 HE_{11} 、 HE_{12} 模式干涉受腰部、锥部与待测物共同作用的影响。为实现传感结构小型化的目标, 首先探讨锥部、腰部不同部位的传感特性。假定光纤锥部符合恒定热区模型^[23], 热区长度约等于腰部长度 l_0 , 则锥部初始半径为 r_0 的光纤的锥部半径 r 满足

$$r = r_0 \exp\left(-\frac{z}{l_0}\right). \quad (6)$$

若入射波长确定, 可知锥部半径 r 处的有效折射率差为 $\Delta n_{\text{eff}2}(r)$, 结合(6)式可得单侧锥部累积

相位差为

$$\Delta\varphi = k \int_{r(L_0/2)}^{r_0} \Delta n_{\text{eff}2}(r) \frac{l_0}{r} dr = k \Delta P, \quad (7)$$

式中: $k = 2\pi/\lambda$; ΔP 为光程差; $r(L_0/2)$ 为腰部半径。

根据(7)式, 距离腰部越近, 相同长度累积的相位差越大, 如图 2(a)所示。设 c 点为锥部的某一点, 该点将锥部光程差分成下锥部 ΔP_1 、上锥部 ΔP_2 。在 1350 nm 波长下, 当锥部半径 $r_c = 5 \mu\text{m}$ 时, $\Delta P_2 = 0.00136 \text{ mm}$, 约为 $\Delta P_1 = 0.0186 \text{ mm}$ 的 1/10。故上锥部 ($r > 5 \mu\text{m}$) 累积光程差可以忽略, 另外相对于腰部累积光程差 0.1128 mm, 下锥部 ($r < 5 \mu\text{m}$) 有微弱累积光程差的能力。因此, 光纤的锥区仅下锥部有微弱的传感能力, 其主要传感部位为腰部。为了证明以上结论, 采用 $l_0 = 1.3 \text{ mm}$ 热源加工

锥形光纤并配制折射率为 1.33304、直径为 1 mm 的氯化钠液滴进行扫描锥形微纳光纤实验,如图 2(b)所示。设置位移平台以 1.17 mm/s 的速度带动液滴

沿轴向移动,使其顺序经过光纤锥部-腰部-锥部,并通过光谱仪采集锥形光纤不同部位在 1300~1600 nm 波长范围的光谱信号,共采集 50 次。

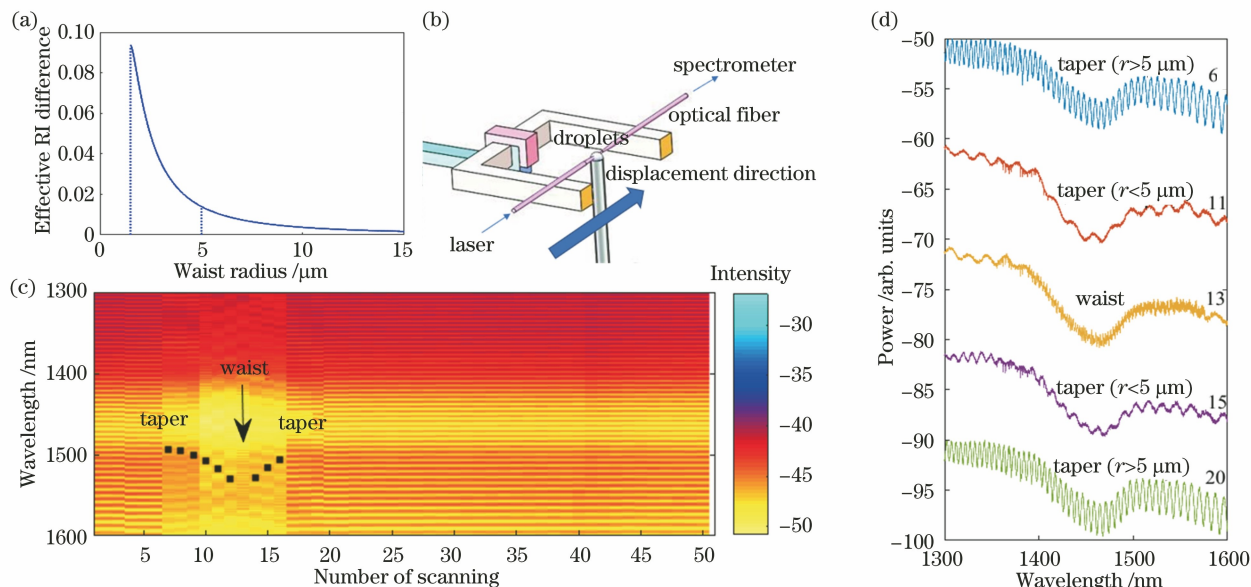


图 2 扫描过程中的干涉光谱变化。(a)不同半径下有效折射率差的变化曲线;(b)锥形微纳光纤的液滴扫描实验装置示意图;(c) 50 次光谱扫描相对光强的变化;(d)扫描过程中的干涉光谱

Fig. 2 Interference spectrum changes during scanning. (a) Variation curve of effective refractive index difference for different radius; (b) schematic diagram of droplet scanning experimental device of tapered micro/nano fiber; (c) change of relative light intensity for 50 spectral scans; (d) interference spectra in scanning process

将每次扫描输出光谱的光强记录下来,如图 2(c)所示,其中扫描光谱明暗变化代表输出光强的相对强弱,例如图 2(c)中第 6 次扫描的明暗条纹变化对应图 2(d)中输出光谱的峰谷变化。结合图 2(c)、(d),发现在这 10 次扫描的过程中液滴共向前移动了 3.51 mm,小于显微测量的腰部与下锥部($r < 5 \mu\text{m}$)长度之和(4.6 mm)。其中第 7~12 次扫描即扫描下锥部时,干涉光谱周期增大,而且输出波形随着锥部直径变小且向长波长移动;第 13 次扫描即扫描到腰部时,HE₁₂ 模式截止导致 1400~1600 nm 波长范围的干涉现象消失;第 14~16 次扫描即扫描到另一侧下锥部时,同样干涉光谱周期较大,而且输出波形随着锥部直径的增大向短波长移动。另外还可以看出第 1~6 次与 17~50 次扫描的干涉光谱基本不发生改变,因此可知上锥部($r > 5 \mu\text{m}$)基本不具有传感能力。结合实验与计算结果可知,对于锥形微纳光纤在折射率为 1.333 附近的传感检测,下锥部($r < 5 \mu\text{m}$)同样也具有传感能力,但其传感灵敏度相比腰部受到的影响较小,而且决定传感灵敏度的部式。根据恒定热区模型关系式[(8)式]和拉伸长度

位仍是腰部。因此可通过适量缩短锥长并控制腰部直径的方式制作小型化高灵敏度锥形微纳光纤传感器。

3.2 锥形微纳光纤的制作

为了减小锥区长度,利用模式转换制作非绝热锥形光纤[$r/\tan \Omega \leq \lambda/(n_{\text{eff}1} - n_{\text{eff}2})$,其中 Ω 为锥角],并保证光纤内具有色散转折点模式的有效激发,采用小直径氢氧焰熔融拉伸进行锥形微纳光纤的加工,加工装置示意图如图 3(a)所示。氢气发生器电解生成氢气,然后将其经数字流量控制器定量输出至火焰头。固定在位移平台两端的光纤在计算机程序的控制下以特定的速度向两边拉伸。同时为了分析锥形光纤的模式变化,选择 1550 nm 的激光器并通过探测器进行锥形光纤输出光强的实时监测及傅里叶分析。

由于锥部结构对称性较好的光纤仅激发与基模对称的模式(如 HE₁₂ 模),而结构不对称的光纤另外还会激发不与基模对称的模式(如 LP₁₁ 等)^[21]。实验发现锥长较短(锥角较大)的光纤在加工过程中不易保证其对称性并容易激发与基模不对称的模 $z = vt$,增大拉伸速度 v 或缩短热区长度 l_0 都会缩

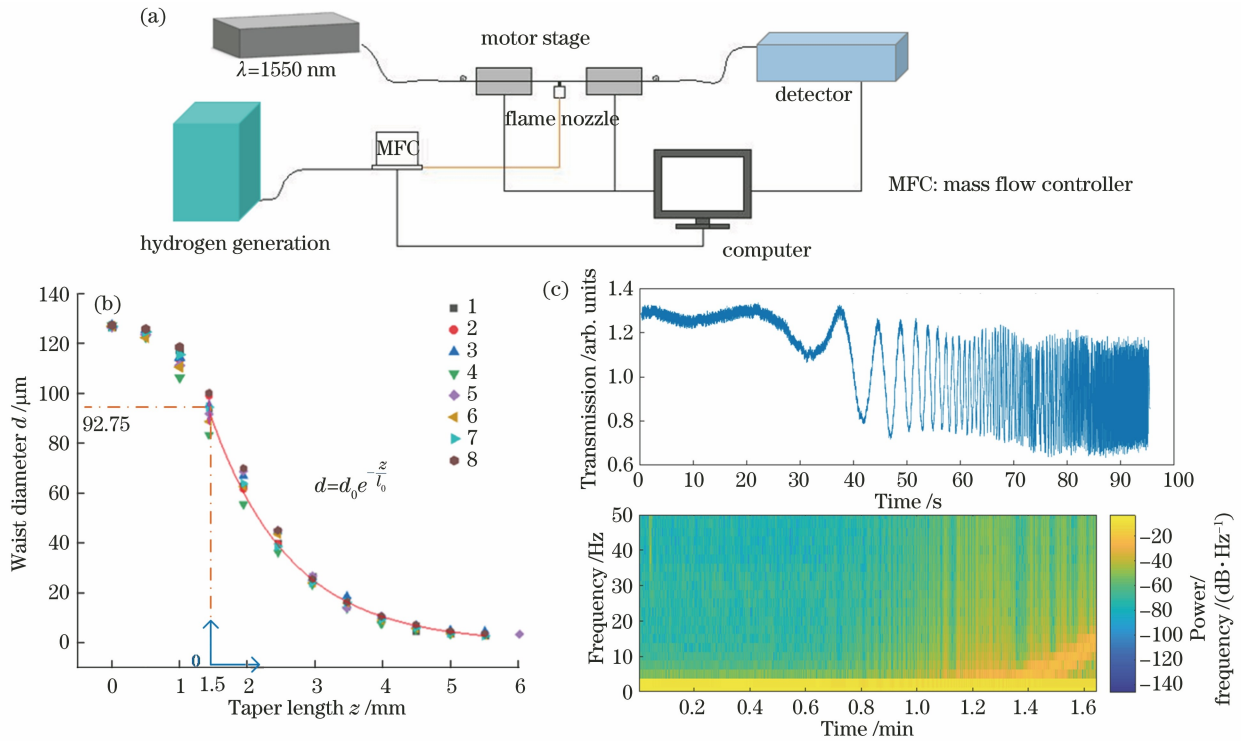


图 3 锥形微纳光纤加工过程中结构及模式变化。(a)实验装置示意图;(b)锥形微纳光纤的锥部直径变化;(c)锥形微纳光纤加工过程中光强透射率谱及其频谱图

Fig. 3 Structure and mode changes of tapered micro nano/fiber during processing. (a) Schematic diagram of experimental device; (b) taper diameter of tapered micro/nano fiber; (c) light intensity transmittance and spectrum during tapered micro/nano fiber processing

短锥长(增大锥角),其加工过程容易激发多个高阶模。因此,实验上采取适当减小热区长度、增大拉伸速度的方式;选取拉伸速度为 0.04 mm/s、热区长度约为 1.2 mm 的加工条件。图 3(b)所示为 8 组锥形光纤锥部($d < 90 \mu\text{m}$)直径变化拟合曲线(图中 d_0 为拟合的初始直径, $d_0 = 92.75 \mu\text{m}$),其符合恒定热区模型的指数分布:

$$d = 92.75 \exp\left(-\frac{z}{1.16}\right) = 92.75 \exp\left(-\frac{vt}{1.16}\right). \quad (8)$$

通过对比频谱中的拍频曲线及显微检测模式截止时刻腰部直径^[21-22],可以推断该锥形光纤加工过程主要激发 HE_{12} 模。如图 3(c)所示,可以看出光纤加工过程中由于基模、 HE_{12} 模的干涉产生了光强透射率谱的振荡现象,根据其傅里叶变换频谱可以明显看出该结构仅出现这两个模式的干涉现象。因此该结构主要激发 HE_{12} 模,可以有效避免其他高阶模的激发。

实验中制备的锥形光纤锥部直径变化稳定,加工重复性较高。其中,拟合腰部长度 $l_0 = 1.16 \text{ mm}$,与实际腰部检测直径 1.2 mm 基本符合,

且测量的锥部与腰部总长较短,约为 11 mm,在短锥部长度(大锥角)光纤结构的基础上充分保证了对称性并实现了主要激发 HE_{12} 模式的目标。

3.3 锥形微纳光纤传感研究

由图 1 可知,针对折射率 1.333 附近的折射率传感检测,腰部直径为 2.8~3.6 μm 的锥形微纳光纤色散转折点在 1000~1600nm 波长范围内,因此选择腰部直径为 3.1 μm 的光纤进行折射率传感验证。试剂选用折射率梯度大小为 0.00004 的 NaCl 溶液,并采用与文献[20]相同的传感实验装置,采集其干涉谱进行对比分析并计算不同干涉峰处的灵敏度大小。

根据图 1,腰部直径为 3.1 μm 的光纤色散转折点在波长 1200~1350 nm 之间。由图 4(a)中可以看出随着 NaCl 溶液折射率的增大,光纤的输出光谱出现向长波长移动的现象,但没有出现图 1 中的色散转折点及向短波长移动的干涉区间。色散转折点左右两侧临近的干涉峰(谷)波长的覆盖范围通常大于一侧干涉峰(谷)波长间隔,由于实验中干涉峰(谷)间隔较大,色散转折点附近覆盖的波长范围更大,并且色散转折点右侧的干涉谱截止较快,另外在

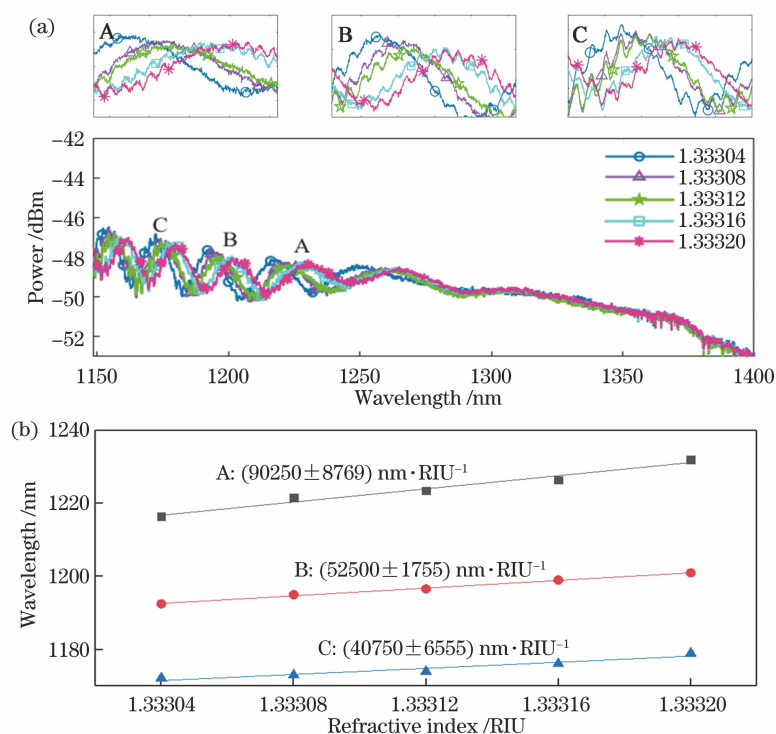


图 4 传感过程的干涉谱线及干涉峰灵敏度计算曲线。(a)锥形微纳光纤干涉谱;(b)波长-折射率拟合曲线

Fig. 4 Interference spectra and interference peak sensitivity calculation curves of sensing process. (a) Interference spectra of tapered micro/nano fiber; (b) fitting curves of wavelength-refractive index

1200~1500 nm 波长范围氯化钠溶液的吸收逐渐增强^[24],因此光谱在 1250~1400 nm 波段整体逐渐下移并且几乎无干涉现象。由图 4(b)所示,由于干涉区间内的波长越小越远离色散转折点,对比干涉峰 A、B、C 处的灵敏度大小,可以看出其灵敏度随波长的减小而逐渐减小。根据 A、B、C 处灵敏度逐渐递减的规律,选择色散转折点较近的 A 点并计算得到其灵敏度高达 90250 nm/RIU,这表明该结构光纤传感器在 1.33300~1.33320 折射率范围具有较强的折射率传感能力。

该实验对所设计结构的折射率进行传感验证,结果表明在与水相近的折射率试剂传感检测中,该结构具有很高的传感灵敏度,为小型化、集成化高灵敏度传感的实现和应用提供了一种有效的技术方案。

4 结 论

基于模式干涉理论研究了锥形微纳光纤的折射率传感特性,设计并制作了腰部直径为 $3.1 \mu\text{m}$ 附近的锥形微纳光纤传感结构,锥腰长度短至 1.1 cm。给出了非绝热条件下光纤拉锥过程中模式控制的方法,并对其低溶液折射率传感特性进行了分析,测得折射率检测灵敏度最高可达

90250 nm/RIU。该传感结构具有制作重复性好、实用化潜力大等优良特性,有望用于生物医疗、环境监测等领域。

参 考 文 献

- [1] Xu Y P, Lu P, Chen L, et al. Recent developments in micro-structured fiber optic sensors [J]. *Fibers*, 2017, 5(1): 3.
- [2] Tong L M. Micro/nanofibre optical sensors: challenges and prospects [J]. *Sensors*, 2018, 18(3): 903.
- [3] 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(6968): 816-819.
- [4] Dai F, Li K W, Zhou W C, et al. Highly sensitive optical nano fiber bio-chemical sensor based on magnetic nanoparticles amplification [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1206003.
代方, 李凯伟, 周文超, 等. 基于纳米磁珠放大的高灵敏度纳米光纤生化传感器 [J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1206003.
- [5] Li M, Li K W, Dai F, et al. Highly sensitive optical nanofiber sensor based on gold nanorod amplification [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 1206001.
李明, 李凯伟, 代方, 等. 基于金纳米棒放大的高灵

- 敏度纳米光纤生化传感器[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1206001.
- [6] Lee B, Roh S, Park J. Current status of micro- and nano-structured optical fiber sensors [J]. *Optical Fiber Technology*, 2009, 15(3): 209-221.
- [7] Kieu K Q, Mansuripur M. Biconical fiber taper sensors [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(21): 2239-2241.
- [8] Shen C Y, Wang Y Q, Chu J L, et al. Optical fiber axial micro-displacement sensor based on Mach-Zehnder interferometer [J]. *Optics Express*, 2014, 22(26): 31984-31992.
- [9] Wu X Q, Tong L M. Optical microfibers and nanofibers[J]. *Nanophotonics*, 2013, 2(5/6): 407-428.
- [10] Tyagi D, Mishra S K, Zou B, et al. Nano-functionalized long-period fiber grating probe for disease-specific protein detection [J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2018, 6(3): 386-392.
- [11] Li K W, Zhou W C, Zeng S W. Optical micro/nanofiber-based localized surface plasmon resonance biosensors: fiber diameter dependence [J]. *Sensors*, 2018, 18(10): 3295.
- [12] Rifat A A, Ahmed R, Yetisen A K, et al. Photonic crystal fiber based plasmonic sensors[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 243: 311-325.
- [13] Zibai M I, Kazemi A, Latifi H, et al. Measuring bacterial growth by refractive index tapered fiber optic biosensor [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2010, 101(3): 313-320.
- [14] Ji W B, Liu H H, Tjin S C, et al. Ultrahigh sensitivity refractive index sensor based on optical microfiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(20): 1872-1874.
- [15] Nagai R, Aoki T. Ultra-low-loss tapered optical fibers with minimal lengths [J]. *Optics Express*, 2014, 22(23): 28427-28436.
- [16] Zhou T M, Zhang Y N, Han B, et al. Low cost non-adiabatic tapered fiber for high-sensitive temperature sensing[J]. *Optical Fiber Technology*, 2018, 45: 53-57.
- [17] Riahi A, Vahedi M, Khalilzadeh J, et al. Investigation of the effect of the taper geometry on the sensitivity of tapered-fibre gas sensors [J]. *Journal of Modern Optics*, 2020, 67(14): 1259-1266.
- [18] 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.
- [19] Luo H, Sun Q, Li X, 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.
- [20] Zhang N M Y, Li K W, Zhang N, et al. Highly sensitive gas refractometers based on optical microfiber modal interferometers operating at dispersion turning point [J]. *Optics Express*, 2018, 26(22): 29148-29158.
- [21] Ravets S, Hoffman J E, Kordell P R, et al. Intermodal energy transfer in a tapered optical fiber: optimizing transmission [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2013, 30(11): 2361-2371.
- [22] Xu Y X, Fang W, Tong L M. Real-time control of micro/nanofiber waist diameter with ultrahigh accuracy and precision[J]. *Optics Express*, 2017, 25(9): 10434-10440.
- [23] Birks T A, Li Y W. The shape of fiber tapers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1992, 10(4): 432-438.
- [24] Li X C, Liu L H, Zhao J M, et al. Optical properties of sodium chloride solution within the spectral range from 300 to 2500 nm at room temperature [J]. *Applied Spectroscopy*, 2015, 69(5): 635-640.