

# 倏逝波在锥形光纤折射率计中的传感作用

蔡露, 赵勇, 王琦, 胡海峰

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 对锥形光纤模间干涉结构产生的倏逝波与模式有效折射率间的关系进行了理论计算与研究, 并仿真得出随着外界折射率变化而移动的干涉光谱, 以此在理论方面证明倏逝波的产生对提高波长解调型的锥形模间干涉折射率传感器的灵敏度起着至关重要的作用. 基于倏逝波的吸收光谱法计算了锥形区域在不同轮廓线、不同锥区长度以及不同锥径时的倏逝波强度, 对优化锥区形状提高折射率测量的灵敏度有所帮助. 最后以拉锥的模间干涉光纤传感结构测量折射率的实验验证了理论计算的正确性.

**关 键 词:** 模式干涉仪; 倏逝波; 模式有效折射率; 折射率测量; 光纤锥

中图分类号: TP 212.2

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2016)03-0305-05

## Sensory Effect of Evanescent Wave in the Tapered Optical Fiber RI Sensor

CAI Lu, ZHAO Yong, WANG Qi, HU Hai-feng

(School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHAO Yong, E-mail: zhaoyong@ise.neu.edu.cn)

**Abstract:** The internal mechanism about the effect of evanescent wave in tapered modal interferometer was investigated theoretically. The relationships between the power of evanescent wave and the effective RI of cladding modes were calculated, and the simulated interference spectrum shifted with external RI was obtained. It can be theoretically proofed that the generation of evanescent wave provides a vital role in improving the sensing sensitivity of tapered optical fiber RI sensor. In addition, effects of the taper shape, such as outline, waist radius and taper length, on the power of evanescent wave attenuated in taper region were investigated based on the evanescent wave absorption spectroscopy, which is helpful to optimize the taper shape and improve the sensitivity of RI measurement. Finally, the experiment of RI measurement by tapered modal interferometer has been carried out to verify the accuracy of the theory.

**Key words:** modal interferometer; evanescent wave; modal effective refractive index; refractive index measurement; optical fiber

近年来,随着光纤传感器的广泛研究与应用,模间干涉型的新型光纤传感器越来越受到各国学者们的关注. 基于拉锥结构的模间干涉折射率传感器是其中的一个研究重点. 许多波长解调的锥形模间干涉传感器可以利用简单的结构达到较高的折射率测量灵敏度<sup>[1-2]</sup>. 其原理是通过锥形区域产生的较强倏逝波感知外界折射率的变化,从而改变光纤内传播的模式有效折射率. 模式有效折射率的变化引起干涉相位差的改变,表现在光

谱上即为波长移动,因此可以通过检测光谱仪上的波长移动来解调折射率变化. 目前文献中大多以实验为主,并未研究外界折射率变化引起倏逝波能量变化与模式有效折射率变化之间的影响机理. 本文旨在通过理论计算、仿真与实验相结合的方法证明倏逝波对提高折射率测量的灵敏度起着至关重要的作用,明确了倏逝波强度与模式折射率之间的关系. 另外,文中基于吸收光谱法模型<sup>[3-4]</sup>和光线理论<sup>[5]</sup>计算了不同锥区长度以及不

同锥径时的倏逝波强度,为优化锥区形状以提高折射率测量的灵敏度提供方向.

# 倏逝波对折射率传感的作用原理

## 1.1 倏逝波与模式有效折射率间的关系

为了解释倏逝波是如何影响锥形模间干涉传感器的折射率测量的,首先要知道倏逝波强度与光纤内模式有效折射率的关系.

如图 1 所示,光源发出的光在纤芯中传输,通过传感结构的锥形区域时,在纤芯-包层界面发生全反射.但事实上仍有部分以指数衰减的能量渗透到包层中,这部分能量就是倏逝波.将光纤看成中心对称的特殊波导,因此有<sup>[6]</sup>

$$\frac{2\pi d}{\lambda}\sqrt{n_{co}^2-N^2}-2\arctan\left[\sqrt{\frac{N^2-n_{cl}^2}{n_{co}^2-N^2}}\left(\frac{n_{co}}{n_{cl}}\right)^{2p}\right]-m\pi=0.$$

(1)

式中: $d$  为纤芯的直径; $\lambda$  为入射光波长; $n_{co}$  和  $n_{cl}$  分别为光纤的纤芯和包层折射率; $N$  为包层模式的有效折射率; $m$  是正整数,代表包层模式的阶数; $p$  在 TE 模式时为 0,在 TM 模式时为 1.

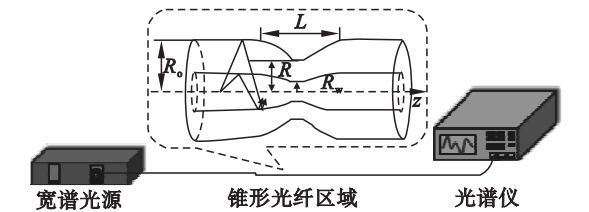


图 1 锥形模间干涉折射率传感系统结构框图  
Fig. 1 Structure schematic of tapered RI sensor based on modal interference

当光在锥形区域传播时,由于纤芯逐渐变细,对基模的束缚能力逐渐变弱,当锥区足够细使  $V=2\pi a\sqrt{(n_{co}^2-n_{cl}^2)}/\lambda$  的值小于截止值 0.84<sup>[7]</sup> 时,纤芯-包层-外界介质三层结构可以简化为包层-外界介质两层结构<sup>[8]</sup>. 由于这种结构的  $V$  值陡然增大,基模向多个包层模式耦合,因此在光纤中同时存在多个模式同时传输,有效折射率  $n_{ex}<N<n_{cl}$ ,且锥径越细这种简化越近似,如图 2 所示. 此时式(1)中的包层和纤芯折射率分别为外界介质和原来包层的折射率. 本文中单模光纤取 Crning 公司 SMF-28 的参数进行仿真计算,  $n_{co}=1.468\ 1$ ,  $n_{cl}=1.462\ 8$ , 周围介质折射率  $n_{ex}=1.33$ , 则包层模式渗透到周围介质的能量分

$$E=\frac{Q_{ex}}{T+2Q_{ex}}\frac{X}{\alpha_{ex}}.$$

(2)

式中:  $Q_{ex}=\left[\frac{1-\alpha_{ex}}{1-X(2-\alpha_{ex})}\right]^p/\sqrt{\alpha_{ex}-X};$   
 $\alpha_{cl}=1-(n_{ex}/n_{cl})^2; X=1-(N/n_{cl})^2.$

由此可以得到光纤内模式的有效折射率与倏逝波的关系,如图 3 所示. 图中给出 1,3,5,7,9 阶 5 个模式有效折射率与渗透到周围介质中倏逝波能量的关系. 当光经过锥形光纤区域时,倏逝波增强,同时光纤内模式的有效折射率减小. 这是模间干涉折射率传感器的内在传感机理. 对比各个模式的曲线可知,低阶模式产生的倏逝波强度更大,但是高阶模式的曲线变化率更高,也就是说,当锥形区域产生的倏逝波能量增大相同幅度时,引起高阶模式有效折射率的改变更大,因而可以获得更高的折射率灵敏度.

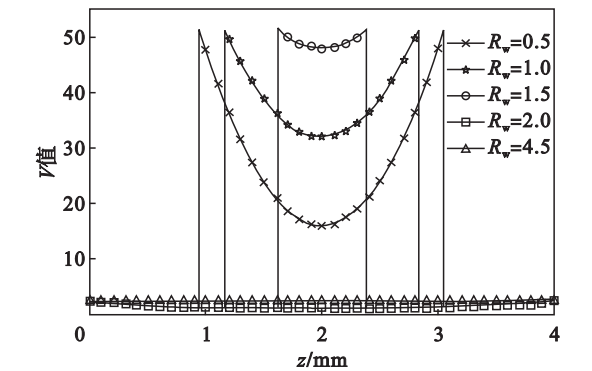


图 2 不同半径的锥形光纤  $V$  值在  $z$  方向上的分布  
Fig. 2  $V$  number distribution along  $z$  direction for different taper radius

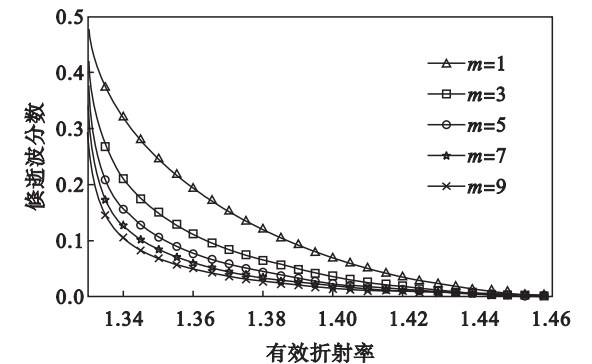


图 3 各包层模式有效折射率与渗透到包层中倏逝波的关系  
Fig. 3 Relationship between effective RI of cladding modes and fraction of evanescent wave

## 1.2 仿真随外界折射率变化而移动的干涉光谱

在前文中已经证明了倏逝波强度与光纤内模式有效折射率是成正相关. 而模式有效折射率与相位的关系为  $\varphi=kNL_{in}=2\pi NL_{in}/\lambda$ , 其中  $L_{in}$  是干涉长度,  $k$  是波数. 因此模式有效折射率的变化

将直接影响各模式的干涉相位,因而使干涉谱发生漂移.有效折射率变化量越大,漂移量越大,折射率测量灵敏度也就越高.基于Turan Erdogan的三层介质光纤模型<sup>[9]</sup>,对占有绝大部分能量的前10个模式间的干涉进行计算,将包层外径 $R_0 = 125 \mu\text{m}$ 的单模光纤拉制成 $R = 65 \mu\text{m}$ 的锥形,得到的干涉谱如图4a所示.

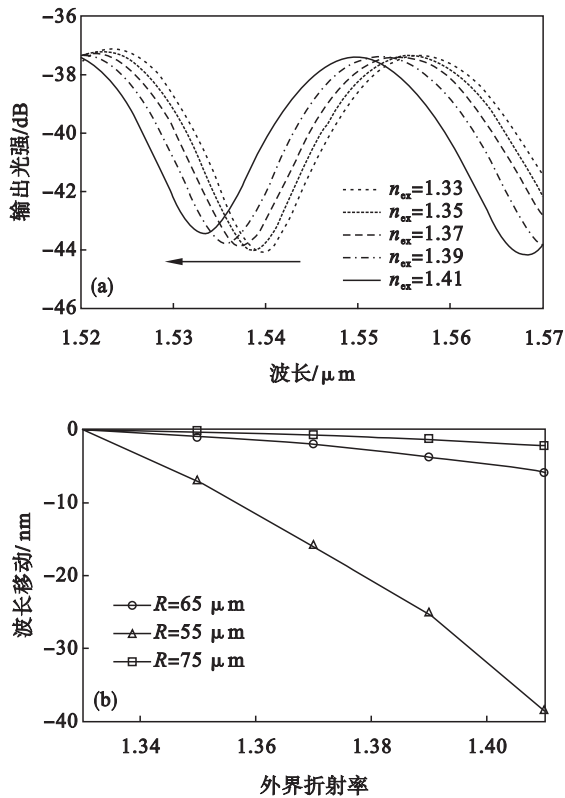


图4 锥形模间干涉折射率传感器的折射率响应  
Fig. 4 Response of external RI for tapered modal interference sensor

(a)一包层半径 $R = 65 \mu\text{m}$ 时透射光谱随折射率变化移动;  
(b)一不同 $R$ 值对应的波长移动量曲线.

图4a中干涉谱随着外界折射率从1.33变化到1.41而蓝移.图4b给出不同直径的锥形光纤传感灵敏度.可以知道,通过改变锥形直径来增强倏逝波,可以获得更高的折射率传感灵敏度.通过优化锥区的轮廓、长度和锥径等参数,增强倏逝波的能量,可以进一步达到提高折射率测量灵敏度的效果,这部分研究将在第二节中介绍.

## 2 优化锥区形态

目前对锥形模间干涉传感器的研究,如文献[1-2],为了增强倏逝波强度,实验中都将锥形拉制成细且长的形态,下面利用吸收光谱法和光线理论进行仿真计算验证这种做法的合理性.基

于光线理论,假设一道射线入射到锥形光纤的一个横截面上,那么可以用光线与光纤轴的夹角 $\theta$ 和光线在这个横截面上的投影与在入射点处的切线的夹角 $\varphi$ 来描述这道光线,而且由文献[3-4]有 $\theta_1 < \theta < \theta_2$ ,  $\varphi_1 < \varphi < \varphi_2$ .式中: $\theta_1 = \arcsin[R_r \sin(\theta_c)]$ ,  $\theta_2 = \arcsin[R_r \sin(\theta_c)]$ ,  $\varphi_1 = \arcsin(R_r \sin\theta_c / \sin\theta)$ ,  $\varphi_2 = \arcsin(R_r \sin\theta_c / \sin\theta)$ .其中 $\theta_c = \arccos(n_{cl}/n_{co})$ ,  $\theta_c = \arccos(n_{ex}/n_{co})$ .

当考虑到光纤轴 $z$ 方向上的变化时,有

$$\theta_1(z) = \arcsin[R_0 \sin(\theta_1)/r],$$

$$\theta_2(z) = \arcsin[R_0 \sin(\theta_2)/r],$$

$$\varphi_1(z) = \arcsin(R_r R_0 \sin\theta_c / r \sin\theta),$$

$$\varphi_2(z) = \arcsin(R_r R_0 \sin\theta_c / r \sin\theta).$$

式中, $R_r = R/R_0$ ,那么根据倏逝波的光谱吸收理论,这条光线的倏逝波能量为

$$\eta = \frac{\lambda n_{cl} \tan\theta \sin\theta}{2\pi m_{co}^2 \sin^2\theta_c \sqrt{\sin^2\theta_c - \sin^2\theta \sin^2\varphi}}. \quad (3)$$

对式(3)进行积分,可以得到各角度光线的倏逝波能量总和 $\eta_s$ :

$$\eta_s = \frac{\int_{\theta_1(z)}^{\theta_2(z)} \int_{\varphi_1(z)}^{\varphi_2(z)} \eta \sin\theta \cos\theta \sin^2\varphi d\theta d\varphi}{\int_0^{\theta_2(z)} \int_0^{\varphi_2(z)} \sin\theta \cos\theta \sin^2\varphi d\theta d\varphi}. \quad (4)$$

对不同锥径、不同锥区长度和不同锥区轮廓的拉锥光纤计算沿 $z$ 方向的倏逝波能量分布,结果如图5所示.从图5a中可以看出,在长度和轮廓(二次拟合)相同时,中心区直径越细,倏逝波能量的波峰越高,而且带宽越窄;而当中心区直径固定为 $10 \mu\text{m}$ ,锥区长度不同时,则得到如图5b的一系列曲线,它们的峰值高度相同,带宽随着锥区长度增加而变宽;当锥区长度和中心直径都相同时,不同的锥区轮廓产生不同的倏逝波分布,见图5c,可以看出不同的锥区轮廓(指数函数、线性函数、二次函数1-开口相反、二次函数2-开口相对)影响倏逝波能量的带宽.

将 $\eta_s$ 在 $0 \sim L$ 区间内对 $z$ 进行积分,可以得到锥形区域产生的倏逝波能量百分数:

$$E = C \int_0^L \eta_s dz. \quad (5)$$

对图5a和5b中曲线分别积分得到的结果如图6和图7所示.当锥区长度相同时,中心锥径越细,倏逝波能量越高,变化率随着锥径变细而升高,见图6.当中心锥径相同时,锥区长度越长,倏逝波能量随之线性增强,如图7所示.

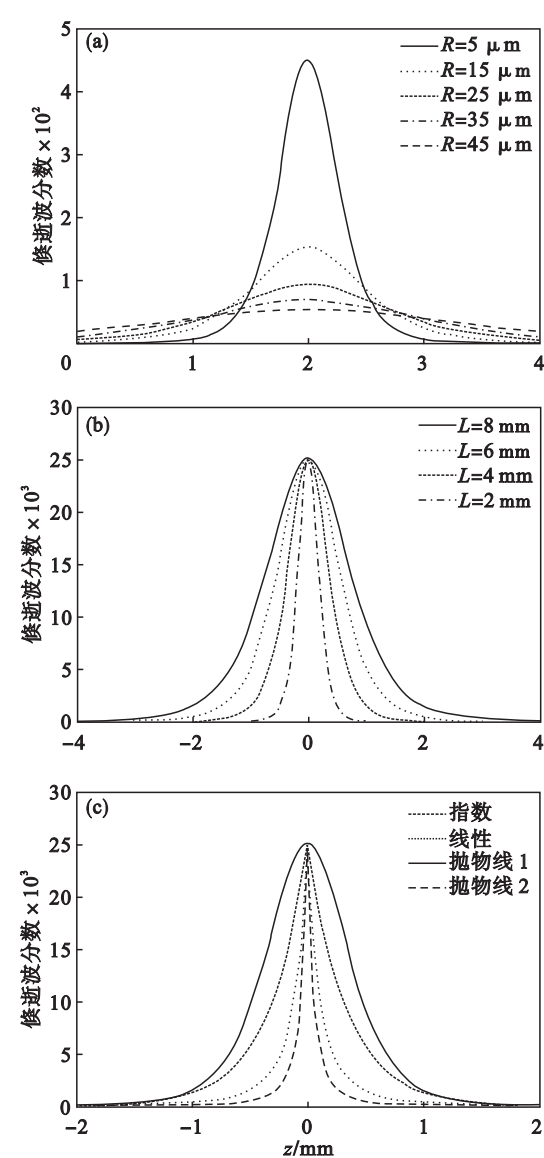


图 5 不同形态的锥区在  $z$  方向上的倏逝波能量分布  
Fig. 5 Power distribution of evanescent wave along  $z$  direction  
(a)—不同半径; (b)—不同长度; (c)—不同轮廓.

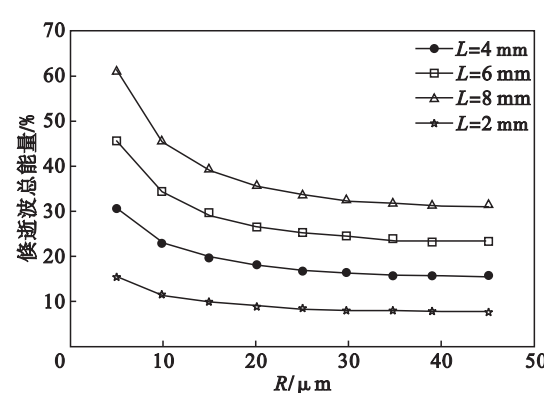


图 6 不同长度锥区产生倏逝波的能量随半径  $R$  变化  
Fig. 6 Evanescence wave power change with  $R$  variation for different taper length

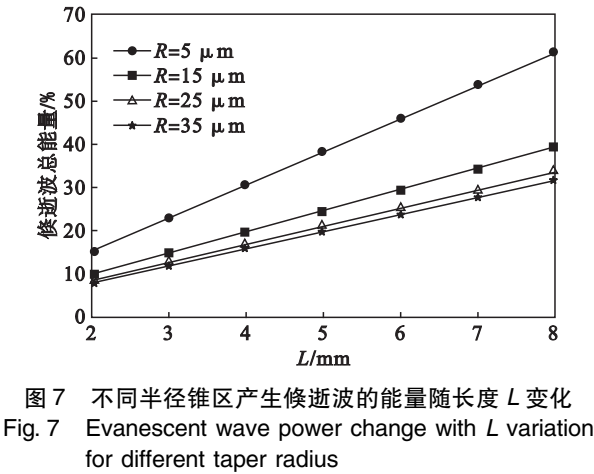


图 7 不同半径锥区产生倏逝波的能量随长度  $L$  变化  
Fig. 7 Evanescence wave power change with  $L$  variation for different taper radius

3 模间干涉结构折射率测量实验

下面利用普通熔接机控制锥形光纤来进行模间干涉结构折射率测量实验. 对单模光纤芯模与包层模式干涉的传感结构用熔接机控制直径为  $100\text{ }\mu\text{m}$  左右的锥区, 将其浸入折射率变化范围为  $1.33 \sim 1.3757$  的氯化钠盐溶液中, 干涉光谱随折射率变化如图 8 所示. 可以看出, 随着折射率增加, 光谱蓝移, 这与图 4a 中的仿真结果相符. 随后制作锥区直径为  $80\text{ }\mu\text{m}$  左右的光纤传感结构所得波长移动量随折射率变化拟合曲线与  $100\text{ }\mu\text{m}$  时对比如图 8 中右下角插图. 可看出锥区直径变细确实使灵敏度有所提高, 这也与前文的理论分析相符合.

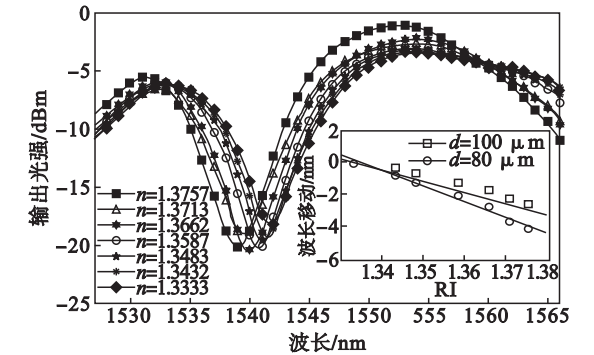


图 8 模间干涉拉锥结构的透射光谱随折射率移动 (插图为锥区直径为  $100\text{ }\mu\text{m}$  和  $80\text{ }\mu\text{m}$  的折射率测量灵敏度拟合曲线)  
Fig. 8 Response of surrounding RI for the tapered modal interferometer (inset are the fitting lines of different taper diameters)

4 结 论

理论计算出了锥形模间干涉结构产生的倏逝 (下转第 332 页)