

基于包层模谐振的三包层石英特种光纤温度传感特性

付兴虎 谢海洋 杨传庆 张顺杨 付广伟 毕卫红

Research on the temperature sensing characteristics of triple cladding quartz specialty fiber based on cladding mode resonance

Fu Xing-Hu Xie Hai-Yang Yang Chuan-Qing Zhang Shun-Yang Fu Guang-Wei Bi Wei-Hong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 024211 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.024211

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024211>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于色散补偿光纤的高速光纤光栅解调方法

A demodulation method of high-speed fiber Bragg grating based on dispersion-compensating fiber

物理学报.2015, 64(23): 234207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.234207>

具有四模式的低串扰及大群时延多芯微结构光纤的设计

Analysis of a novel four-mode micro-structured fiber with low-level crosstalk and high mode differential group delay

物理学报.2015, 64(23): 234206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.234206>

掺Bi石英光纤的 γ 射线辐照和温度影响特性

Irradiation and temperature influence on the Bi-doped silica fiber

物理学报.2015, 64(22): 224220 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.224220>

基于表面等离子体共振和定向耦合的D形光子晶体光纤折射率和温度传感器

D-shaped photonic crystal fiber refractive index and temperature sensor based on surface plasmon resonance and directional coupling

物理学报.2015, 64(22): 224221 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.224221>

低差分模式时延少模光纤的有限元分析及设计

Finite element analysis and design of few mode fiber with low differential mode delay

物理学报.2015, 64(6): 064212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064212>

基于包层模谐振的三包层石英特种光纤 温度传感特性*

付兴虎[†] 谢海洋 杨传庆 张顺杨 付广伟 毕卫红

(燕山大学信息科学与工程学院, 河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 秦皇岛 066004)

(2015年6月6日收到; 2015年9月28日收到修改稿)

提出了一种基于包层模谐振的光纤温度传感器. 它是通过将三包层石英特种光纤(TCQSF)两端分别与普通单模光纤(SMF)电弧熔接构成的SMF-TCQSF-SMF结构. 根据耦合模理论, 首先将TCQSF等效为三个同轴波导, 按各波导模场的分布特点标量计算其传输模式的色散曲线, 并深入研究其耦合长度与传输谱线之间的关系; 其次根据光纤的热光效应及热膨胀效应, 分析计算该传感器的温度灵敏度; 最后选取耦合长度为一个拍长时的传感器进行温度传感实验. 实验结果表明, 在35—95 °C的温度变化范围内, 其温度灵敏度为73.74 pm/°C, 与理论计算结果一致. 因此, 该传感器具有结构简单、制备容易、灵敏度高、包层模激发可控等优点, 可用于工业生产、生物医学等温度传感领域.

关键词: 包层模谐振, 温度传感器, 三包层石英特种光纤, 耦合模理论

PACS: 42.81.-i, 42.81.Pa, 07.07.Df

DOI: 10.7498/aps.65.024211

1 引言

近年来, 以光纤小尺寸结构为基础的用于检测外界不同参量的新型特种光纤传感器^[1-4]已成为传感技术领域的一个重要方向, 极大地促进了光纤传感器在工业生产^[5]、生物医学^[6]、航空航天等^[7]方面的应用. 其中, 模式耦合干涉型光纤传感器, 通过监测不同模式之间相位差的变化, 可实现待测物理量高灵敏的检测. 目前, 该类型传感器主要分为两类: 结构改变型和级联型. 结构改变型主要采用激光诱导、空气孔填充、锥形处理等微加工方式, 使得光纤内外部结构参数发生改变, 以实现模式间的耦合, 如Lu等^[8]结合二氧化碳激光烧蚀与相位掩膜两种方法, 分别在单模光纤上刻写长周期光纤光栅(LPG)与布拉格光纤光栅(FBG), 从而实现折射率与温度的双参数测量; Luo等^[9]采用选

择性填充技术向微结构光纤的空气孔中填充液体, 从而形成双光束谐振现象, 该结构传感器在温度、折射率、应力及微应变测量方面均具有较好的应用; Felipe等^[10]对夹熔于两段单模光纤中的渐变型多模光纤进行熔融拉锥处理以构成折射率传感器. 光纤级联型则是通过特种光纤与单模光纤之间模场的不匹配实现以实现多个模式的激发与耦合, 如Han等^[11]提出了一种单模光纤与偏芯多孔光纤级联的等离子共振传感器, 实现了折射率的高灵敏检测; Villatoro等^[12]将光子晶体光纤(PCF)与单模光纤熔接, 通过环形器监测其反射谱线的变化, 能够较好地实现弯曲的测量及其方向的判定. 上述传感器均具有各自的优点, 但是还存在光栅写入技术复杂、腐蚀或拉锥处理后的光纤比较脆弱、填充工艺控制难度高、模式激发不可控、各参量间交叉敏感等问题. 因此, 研究一种集制备简单、成本低廉、

* 国家自然科学基金(批准号: 61205068, 61475133)、河北省自然科学基金(批准号: F2015203270)、河北省高等学校青年拔尖人才计划项目(批准号: BJ2014057)、燕山大学“新锐工程”人才支持计划和燕山大学信息学院优秀青年基金(批准号: 2014201)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: fuxinghu@ysu.edu.cn

性能优良于一体的传感器已成为该领域共同奋斗的目标。

包层模谐振技术是利用某些特殊的多包层光波导自身结构特性,将光纤纤芯中符合一定条件的光能量耦合至包层中传输^[13]。因此,无须复杂的二次加工技术,仅通过光纤包层对于外界物理量变化更加敏感的特点,便能实现待测参数的高灵敏测量^[14];此外,利用光纤多个包层的隔绝作用还能有效排除不同参数间的交叉敏感问题^[15]。因此,基于包层模谐振的特种光纤传感器具有结构简单、模式激发可控、灵敏度高、能有效排除参数间交叉敏感问题等优点,从而围绕其特性开展相关的理论和实验研究具有重要意义。

本文提出了一种基于包层模谐振的特种光纤温度传感器,它是通过在一段长为10 mm的三包层石英特种光纤(triple cladding quartz specialty fiber, TCQSF)两端分别熔接普通单模光纤(Corning, SMF-28e)制备而成,结构示意图如图1所示。

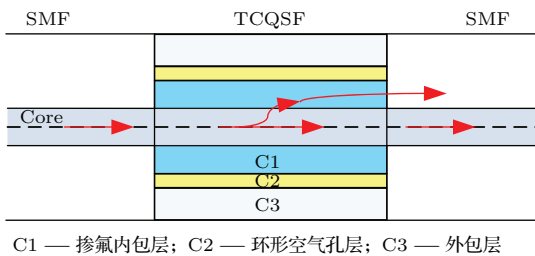


图1 传感器结构示意图

Fig. 1. The schematic diagram of the sensor.

本文首先深入分析了包层模谐振的形成机理,通过传输波导的等效模型及其特征方程的求解,获得等效波导中多个模式的色散曲线,进而分析讨论了传感器长度与传输谱线的关系;然后根据光纤的热光效应与热膨胀效应,讨论分析了谐振波长与温

度的关系;最后建立实验系统对理论计算结果进行验证。

2 包层模谐振理论模型

TCQSF截面图及其折射率分布如图2所示。其中,纤芯半径 $a = 4.27 \mu\text{m}$,折射率 $n_1 = 1.458$,掺氟内包层外半径 $b = 13.20 \mu\text{m}$,折射率 $n_2 = 1.454$,环形空气孔层外半径 $c = 22.80 \mu\text{m}$,折射率 $n_3 = 1.442$,外包层外半径 $d = 62.50 \mu\text{m}$,折射率 $n_4 = 1.458$, n_5 为外界环境折射率。

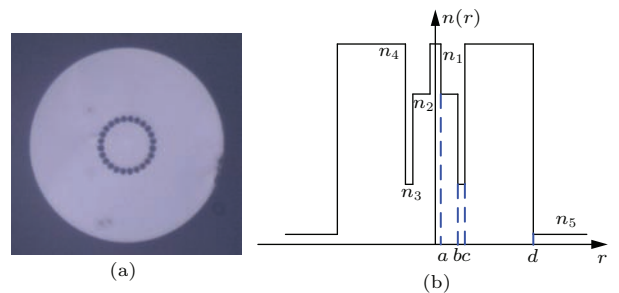


图2 (a) 光纤横截面图; (b) 折射率分布示意图

Fig. 2. (a) Section of the TCQSF; (b) refractive index distribution.

根据耦合模理论和TCQSF折射率的分布特点,将TCQSF等效为三个同轴圆对称波导——芯波导、环芯波导I和环芯波导II^[15],如图3所示。

图3中,芯波导与环芯波导I折射率差值小且间距很小,符合弱耦合条件,因此传输于二者之间且符合相位匹配条件的某些固定模式能发生渐逝波的耦合,进行能量的周期性往返振荡,从而实现包层模谐振现象。当TCQSF的接入长度一定时,纤芯中某一波长附近的光将全部从纤芯中转移至掺氟内包层区域,从而获得一呈带阻特性的传输光谱。这一波长称之为谐振波长,此时接入的TCQSF

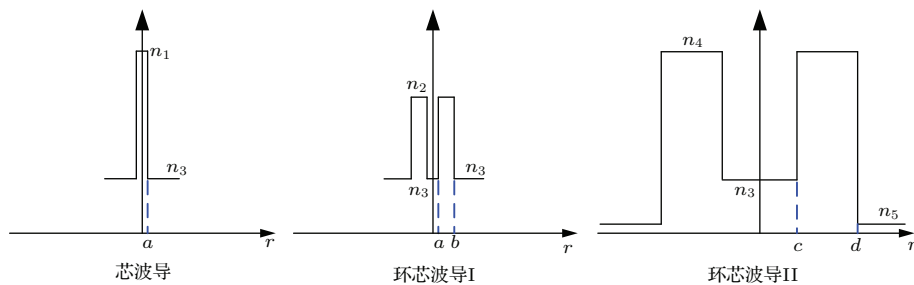


图3 等效波导模型

Fig. 3. The equivalent waveguides model.

的长度称为一个拍长. 为更好地说明该传感器的包层模谐振特性, 本小节详细论述三个等效波导的模场分布及其传输模式的色散曲线.

在等效波导模型中, 芯波导折射率分布与单模光纤类似, 纤芯半径仅为 $4.27 \mu\text{m}$, 其归一化频率 $V < 2.405$, 满足单模截止条件. 因此, 可看作单模光纤来处理, 即其只传输纤芯基模. 根据均匀二层圆波导, 其模场分布及特征方程可以直接给出 [16]

$$E_y(r, \varphi) = \begin{cases} A_1 J_m\left(\frac{U_1}{a}r\right) e^{im\varphi}, & r < a, \\ B_1 K_m\left(\frac{W_1}{a}r\right) e^{im\varphi}, & r > a, \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{J_{m-1}(U_1)}{U_1 J_m(U_1)} = \frac{K_{m-1}(W_1)}{W_1 K_m(W_1)}, \quad (2)$$

式中 A_1, B_1 为常系数; J_m, K_m 分布表示 m 阶的第一类贝塞尔函数和第二类修正贝塞尔函数; $U_1 = a\sqrt{n_1^2 k_0^2 - \beta^2}$, $W_1 = a\sqrt{\beta^2 - n_3^2 k_0^2}$; k_0 为真空波数.

环芯波导 I 和环芯波导 II 结构一致, 仅参数不同, 因此其模场分布规律基本相同. 由麦克斯韦方程组可推导出环芯波导 I 的模场分布表达式 [17] 为

$$E_y(r, \varphi) = \begin{cases} A_2 I_m\left(\frac{W_2}{a}r\right) e^{im\varphi}, & r < a, \\ \left[B_{21} J_m\left(\frac{U_2}{a}r\right) + B_{22} Y_m\left(\frac{U_2}{a}r\right) \right] e^{im\varphi}, & a < r < b, \\ C_2 K_m\left(\frac{W_3}{a}r\right) e^{im\varphi}, & r > b, \end{cases} \quad (3)$$

式中 A_2, B_{21}, B_{22}, C_2 为常系数; Y_m, I_m 分布表示 m 阶的第一类修正贝塞尔函数和第二类贝塞尔函数; $U_2 = a\sqrt{n_2^2 k_0^2 - \beta^2}$, $W_2 = a\sqrt{\beta^2 - n_3^2 k_0^2}$, $U_3 = b\sqrt{n_2^2 k_0^2 - \beta^2}$, $W_3 = b\sqrt{\beta^2 - n_3^2 k_0^2}$. 根据 E_y 与 E_z 的相互转换关系以及二者在 $r = a, r = b$ 两边界处的连续条件, 可获得环芯波导 I 的特征方程

$$= \frac{J_m(U_2) \cdot \left(\frac{J_{m-1}(U_2)}{U_2 J_m(U_2)} + \frac{I_{m-1}(W_2)}{W_2 I_m(W_2)} \right)}{Y_m(U_2) \cdot \left(\frac{Y_{m-1}(U_2)}{U_2 Y_m(U_2)} + \frac{I_{m-1}(W_2)}{W_2 I_m(W_2)} \right)} \cdot \frac{J_m(U_3) \cdot \left(\frac{J_{m-1}(U_3)}{U_3 J_m(U_3)} - \frac{K_{m-1}(W_3)}{W_3 K_m(W_3)} \right)}{Y_m(U_3) \cdot \left(\frac{Y_{m-1}(U_3)}{U_3 Y_m(U_3)} - \frac{K_{m-1}(W_3)}{W_3 K_m(W_3)} \right)}. \quad (4)$$

通过求解 (2) 和 (4) 式两个特征方程便可获得芯波导、环芯波导 I、环芯波导 II 的模式色散曲线如图 4 所示.

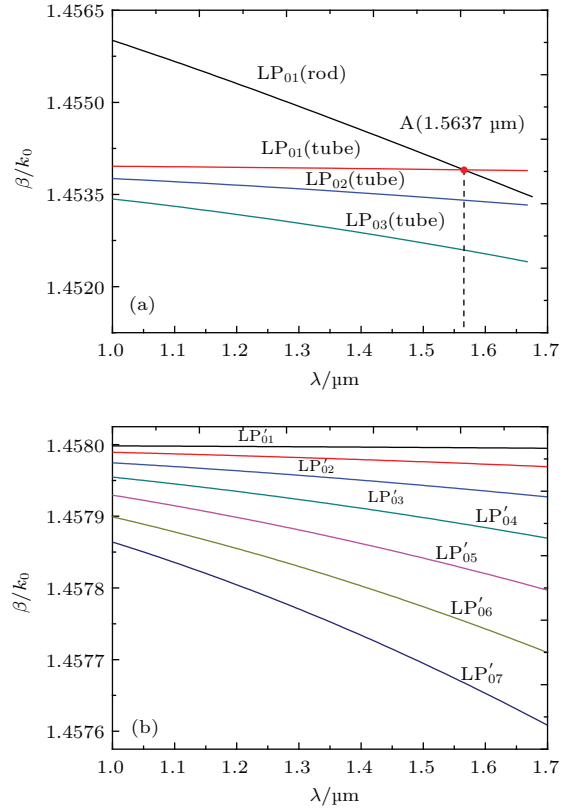


图 4 各等效波导模式色散曲线 (a) 芯波导与环芯波导 I; (b) 环芯波导 II
Fig. 4. Dispersion curves of the equivalent waveguides: (a) Rod waveguide and tube waveguide I; (b) tube waveguide II.

如图 4(a) 所示, 芯波导中的 $LP_{01}(\text{rod})$ 模式与环芯波导 I 中的 $LP_{01}(\text{tube})$ 模式的色散曲线相交于点 A, 即该点满足相位匹配条件, 对应的波长 $\lambda = 1.5637 \mu\text{m}$ 为谐振波长. 当接入的 TCQSF 的长度为一个拍长时, 该波长段的光将由纤芯全部耦合至掺氟内包层中, 产生包层模谐振现象.

与普通多模光纤类似, 两环芯波导也具有多个模式的传输能力, 引用归一化频率 V 的本方程 [18] 为

$$J_{m-1}(V) Y_{m-1}\left(\frac{V \cdot r_2}{r_1}\right) = J_{m-1}\left(\frac{V \cdot r_2}{r_1}\right) Y_{m-1}(V), \quad (5)$$

式中 r_1, r_2 分别为环芯波导的内外半径; n_{\max}, n_{\min} 分别为环芯波导折射率最大值与最小值; 归一化频率

$$V = k_0 c \sqrt{n_{\max}^2 - n_{\min}^2} = \frac{2\pi c}{\lambda} \sqrt{n_{\max}^2 - n_{\min}^2}.$$

通过求解(5)式的实数解个数便能求得对应的环芯波导中传输模式数量的理论值. 很显然, 图4(a)中的芯波导与图4(b)中的环芯波导II中所传输模式的色散曲线不存在交点, 即不可能由二者引起谐振现象.

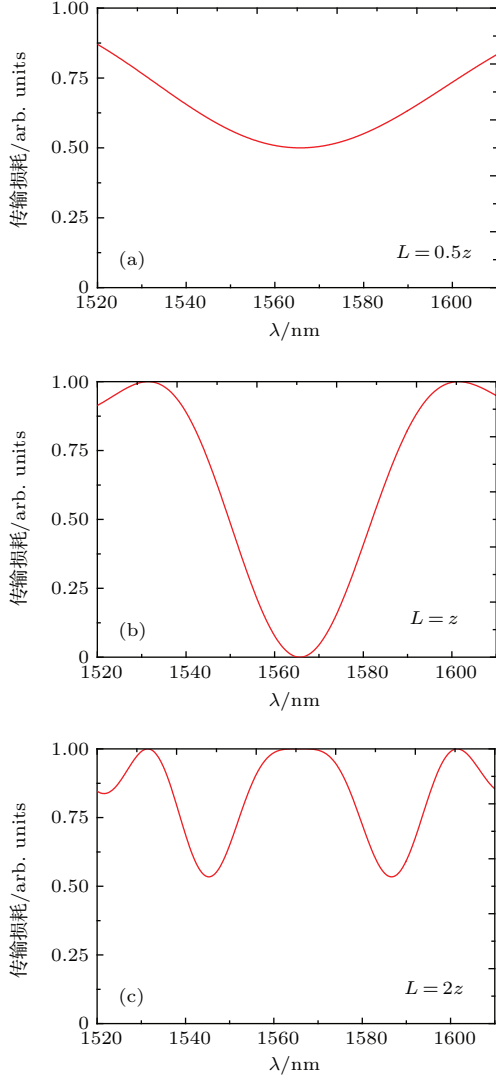


图5 不同耦合长度时传感器的传输光谱 (a) $L = 0.5z$; (b) $L = z$; (c) $L = 2z$

Fig. 5. Transmission spectrum of sensors with different length: (a) $L = 0.5z$; (b) $L = z$; (c) $L = 2z$.

为更直观地分析纤芯与掺氟内包层之间能量交换的规律与TCQSF接入长度 L 之间的关系, 可通过引入模式耦合方程求取芯波导和环芯波导的能量分布. 令TCQSF、纤芯和掺氟内包层中的能量分别为 P 、 P_{co} 和 P_{cl} , 忽略光纤的传输损耗及外包层所激发的能量, 由光波导的能量守恒定律可知, $P = P_{co} + P_{cl}$, 由此可分别求得纤芯和掺氟内包层中传输能量的表达式^[19]为

$$P_{co} = P \left(1 - \frac{\sin^2 \left(\kappa L \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta\beta}{\kappa} \right)^2} \right)}{1 + \left(\frac{\Delta\beta}{\kappa} \right)^2} \right), \quad (6)$$

式中

$$\Delta\beta = \frac{|\beta_{co} - \beta_{cl}|}{2} = \frac{|k_0(n_{co} - n_{cl})|}{2} = \frac{|k_0\Delta n_{eff}|}{2};$$

n_{co} , n_{cl} 和 Δn_{eff} 分别为纤芯模和包层模的有效折射率及二者的差值; L 为TCQSF的实际接入长度, 即耦合长度; κ 为耦合系数, z 为谐振拍长, 二者满足关系式 $\kappa z = \frac{\pi}{2}$. 由此, 可以计算得到不同耦合长度 L 所对应的传感器在理想状况下的传输光谱如图5所示.

如图5所示, 不同的耦合长度对应拍长的不同倍数, 决定了芯、包层之间在谐振波长处能量交换的次数. 当 $L < z$ 时, 谐振波长处能量未完全耦合入掺氟内包层中, 因此在光谱上反映出一个峰值不大损耗峰; 当 $L = z$ 时, 正好为一个拍长, 纤芯中的能量将通过渐逝波全部耦合到包层中传输, 能在谐振波长处产生最大的损耗峰. 当 $L > z$ 时, 纤芯与掺氟内包层在耦合区内将发生多次能量交换, 光谱中会呈现出多个损耗峰, 且谐振波长处损耗峰的出现与否与耦合长度有关.

3 温度传感特性分析

选取耦合长度为一个拍长时的传感器并应用于温度传感的仿真计算, 温度变化范围为35—95 °C. 由于热光效应与热膨胀效应, 随着温度的升高, 芯波导与环芯波导中模式在各波长处的有效折射率会发生变化, 对应的谐振点的位置必然发生改变. 由简单的几何关系可知, 当两条曲线的改变量完全一致时, 谐振波长不变. 然而, TCQSF中各层制备材料不同, 所以其热光系数及热膨胀系数的取值也不同. 纯石英纤芯的热光系数和热膨胀系数^[20]分别为 $6.50 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $5.50 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$; 掺氟内包层的热光系数和热膨胀系数的取值与氟的掺入量有关, 由于纯氟的热光系数为负值, 因此, 可近似认为该包层的两个系数^[21]分别为 5.89×10^{-6} 和 $5.20 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$. 因此, 当温度增加时, 掺氟内包层中的模式有效折射率增加速率较纤芯中慢, 从而引起谐振点朝长波方向的漂移. 如图6所示.

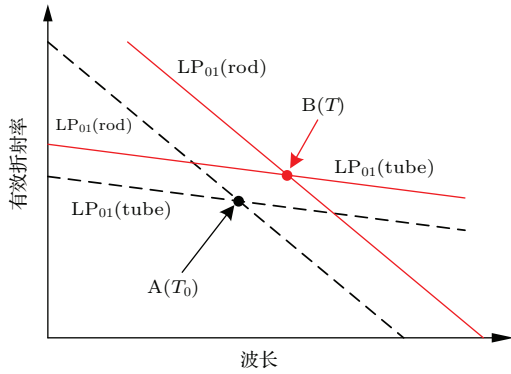


图6 谐振点位置与温度之间的关系

Fig. 6. The relationship between the resonance point and temperature.

如图6所示, A, B分别为升温前后谐振点的位置; T_0, T 分别为升温前后的温度; 根据热光效应, 各层折射率与与温度之间的关系^[22]可表示为

$$\begin{aligned} n'_1 &= n_1(1 + \xi_{co}\Delta T), \\ n'_2 &= n_2(1 + \xi_{cl}\Delta T), \end{aligned} \quad (7)$$

式中 ξ_{co}, ξ_{cl} 分别为纤芯和掺氟内包层的热光系数; $\Delta T = T - T_0$ 为温度的改变量.

由第2小节分析中可知, 环形空气孔层与外包层半径的变化量不影响芯波导与环芯波导中模式色散曲线, 即不影响该传感器温度灵敏度, 因此可以忽略环形空气孔层与外包层半径的变化量. 根据热光效应, 在光纤热光系数始终为常数的温度变化范围内, 纤芯半径随温度变化的表达式^[22]为

$$a' = a(1 + \alpha_{co}\Delta T). \quad (8)$$

由于掺氟内包层为环状结构, 因此升温后其外半径的改变量实际应为内半径至外半径区域的改变量加上纤芯区域半径的改变量

$$b' = b(1 + \alpha_{cl}\Delta T) + a(\alpha_{co}\Delta T - \alpha_{cl}\Delta T), \quad (9)$$

式中 ΔT 为温度的改变量; α_{co}, α_{cl} 分别为纤芯与掺氟内包层的热膨胀系数; a', b' 分别为升温 ΔT 后纤芯与掺氟内包层的半径值. 结合(7)—(9)式, 计算出纤芯与掺氟内包层的折射率、半径在各温度时的取值如表1所列.

由表1可知, 随着温度的上升, TCQSF的纤芯和掺氟内包层的折射率逐渐增多, 且二者的尺寸在径向具有整体扩张趋势. 将表1中各参数代入(2)和(5)式中, 可计算得到芯波导的 $LP_{01}(\text{rod})$ 模式与环芯波导I中的 $LP_{01}(\text{tube})$ 模式在各温度下的色散曲线, 如图7所示.

表1 TCQSF 结构参数与温度之间的关系

Table 1. Relationship between structural parameters of the TCQSF and temperature.

温度/ $^{\circ}\text{C}$	纤芯		掺氟内包层	
	$a/\mu\text{m}$	n_1	$b/\mu\text{m}$	n_2
35	4.2700000	1.4580000	13.2000000	1.4540000
45	4.2700230	1.4580940	13.2000700	1.4540855
55	4.2700470	1.4581810	13.2001400	1.4541713
65	4.2700700	1.4582820	13.2002090	1.4542569
75	4.2700940	1.4583760	13.2002800	1.4543426
85	4.2701170	1.4584700	13.2003490	1.4544282
95	4.2701410	1.4585640	13.2004200	1.4545138

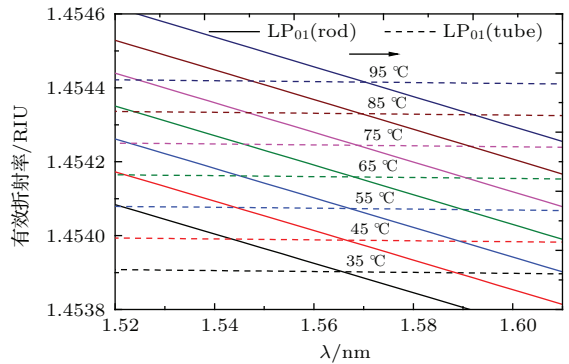


图7 不同温度时 $LP_{01}(\text{rod})$ 与 $LP_{01}(\text{tube})$ 的色散曲线
Fig. 7. Dispersion curve of $LP_{01}(\text{rod})$ and $LP_{01}(\text{tube})$ with different temperature.

图7中实线与虚线分布代表 $LP_{01}(\text{rod})$ 和 $LP_{01}(\text{tube})$ 在各温度下的色散曲线. 显然, 随着温度的增加, 谐振点有明显的红移现象. 将图7中各温度下这两个模式在1520—1610 nm波长范围内的有效折射率代入(6)式, 所获得的各温度下对应的基于TCQSF传感器的传输光谱如图8(a)所示.

为更直观地观察谐振光谱随温度变化的漂移规律, 对图8(a)中谐振波长进行数据拟合, 如图8(b)所示, 可见该传感器的温度灵敏度为 $70.76 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$, 且具有较好的线性度.

在上述计算中, 将环形空气孔中的气体看作纯空气, 因此可以认为由大量环形空气孔、少量纯石英和掺氟石英组成的环形空气孔层的折射率不随温度的变化而变化, 始终按1.442计算. 此外, 由于空气是主要成分, 因此该层的热光系数取值应介于空气与固体热光系数之间, 且应远低于纯固体的热

光系数, 而石英光纤的热光系数数量级为 $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 故该包层的热光系数应介于 $0-10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 之间. 根据临界值法, 该传感器的温度灵敏度应该介于用两个不同的热光系数所求得温度灵敏度之间. 当环形空气孔层热光系数为 $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 时, 利用上述的分析过程, 通过计算引起谐振现象的两模式的在各温度的色散曲线及对应的各温度下传输光谱, 可以得到传感器的温度灵敏度为 $97.36 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$.

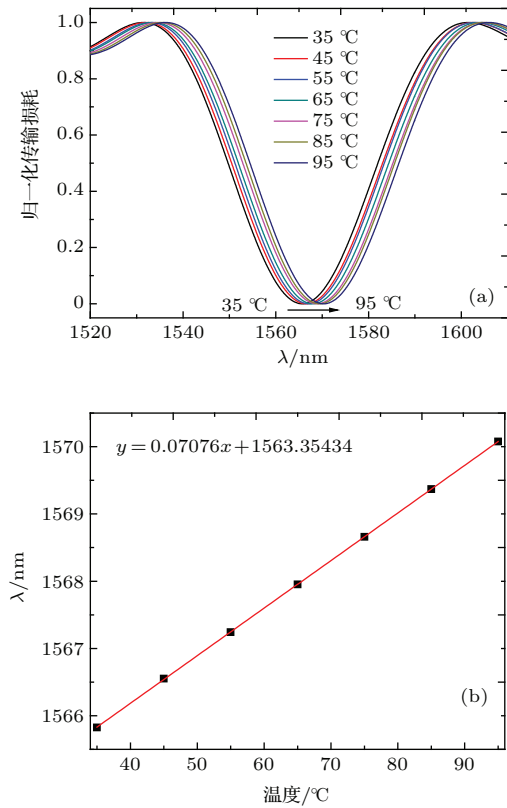


图8 (网刊彩色) $L = z$ 时传输光谱与温度之间关系
 Fig. 8. (color online) The relationship between the transmission spectrum and temperature as $L = z$.

由于热膨胀效应, 基于TCQSF的温度传感器在轴向上也会发生相应变化, 即耦合长度 L 随温度的增加而变大, 从而引起传输谱线的变化. 然而, 耦合长度 L 的变化量十分微小, 导致的传输谱线基本不变, 因此可以忽略不计. 换言之, 由温度升高所引起的传感器长度的改变不影响该传感器的温度灵敏度.

综上所述, 通过分析升温过程中由热光效应引起的不同传输介质折射率的变化及由热膨胀效应引起的光纤在径向及轴向尺寸的变化可知, 基于TCQSF的温度传感器在谐振波长处的温度灵敏度的取值范围为 $70.76-97.36 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$.

4 实验验证

分别制备耦合长度为 5 mm , 10 mm 和 20 mm 的基于TCQSF的温度传感器. 将上述传感器两端分别连接宽带光源和光谱仪, 获得的各传感器的传输光谱如图9所示. 实验中, 所使用的光纤熔接机为古河公司生产的S178型电弧熔接机; 光源为上海飞秒光电技术有限公司生产的ASE3700型宽带光源, 波长范围为 $1520-1610 \text{ nm}$; 光谱仪 (Optical Spectrum Analyzer, OSA) 是由日本横河YOKOGAWA生产的AQ6375型光谱仪.

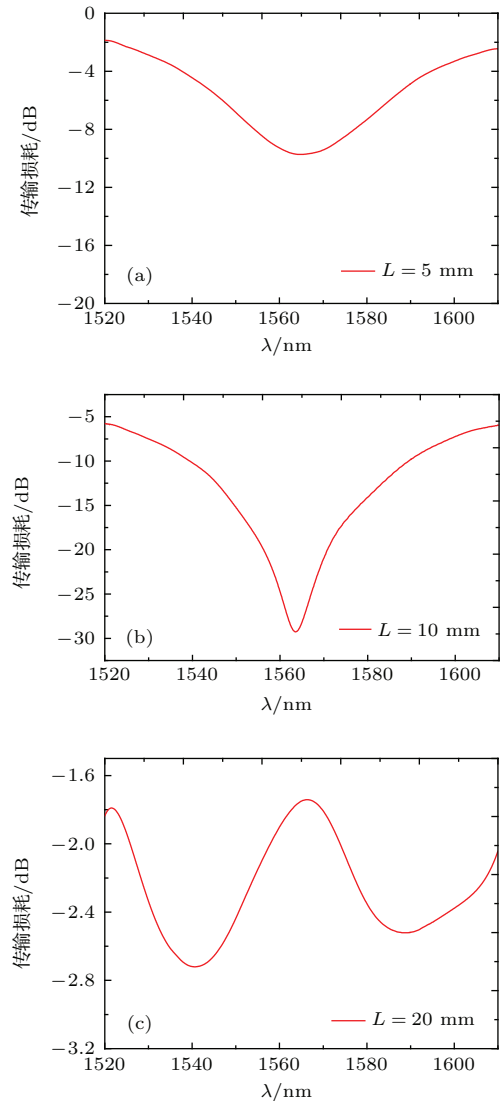


图9 不同耦合长度 L 所对应的传输光谱 (a) $L = 5 \text{ mm}$; (b) $L = 10 \text{ mm}$; (c) $L = 20 \text{ mm}$
 Fig. 9. Transmission spectrum of sensors with different length: (a) $L = 5 \text{ mm}$; (b) $L = 10 \text{ mm}$; (c) $L = 20 \text{ mm}$.

如图9所示, $L = 10 \text{ mm}$ 时, 在谐振波长处所形成的损耗峰最大, 约为 20 dB , 且随着TCQSF长

度的增加,光能量在这两个波导结构中的能量交换次数越频繁,耦合产生的谐振峰的个数也越多,各耦合长度的传感器的传输谱线基本与理论计算符合,因此,可以认定 $L = 10\text{ mm}$ 即为一个拍长.

为了不影晌多包层谐振光纤的温度传感性能,又能保证良好的温度传感分辨率和重复性,选择传输光在 TCQSF 内只发生一次完全能量转换的情况,即耦合长度为一个拍长的传感器进行温度传感实验.搭建如图 10 所示的温度实验系统.

实验初始,将传感器置于温度控制箱中,传感器部分呈笔直状态且被固定于载物片上,以排除实验过程中弯曲的交叉敏感问题.实验过程中,调节温度控制箱使传感器的受热温度从 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 匀速上升到 $95\text{ }^{\circ}\text{C}$,每 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 调节一次.温度控制箱内温度达到预设温度时,维持该温度 30 min ,待箱内温度稳定后,记录传输光谱,以减小实验的误差.多次反复实验后,获得传输光谱与温度的变化关系如图 11 所示.

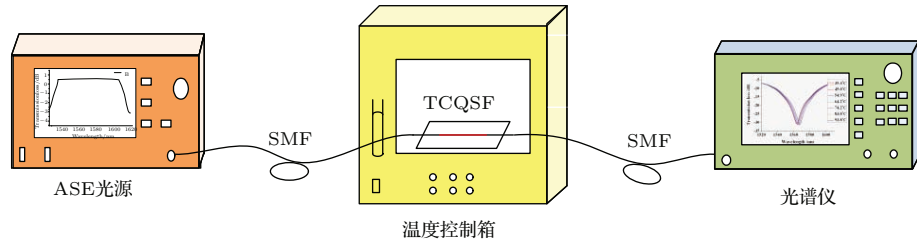


图 10 温度实验系统装置图

Fig. 10. Temperature experimental setup.

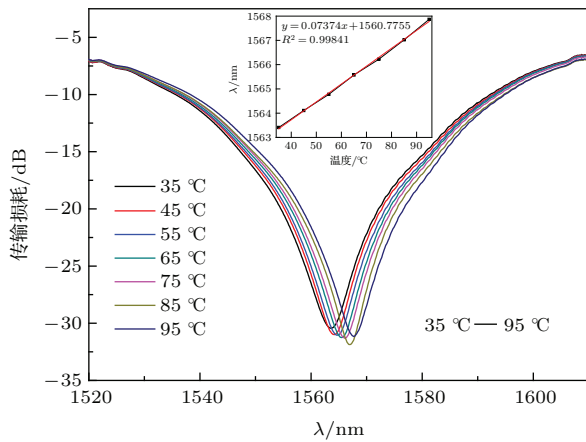


图 11 (网刊彩色) $L = z$ 时传输谱线与温度之间的关系
Fig. 11. (color online) The relationship between the transmission spectrum and temperature as $L = z$.

如图 11 所示,随着温度的升高,该传感器的传输谱线有较好的线性变化.在 $35\text{--}95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度变化范围内,谐振波长的总漂移量约为 4.46 nm .经拟合分析可得其温度灵敏度为 $73.74\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$,与理论计算的温度灵敏度的取值范围完全一致,具有较好的温度传感特性.将该传感器分别与 FBG、单模-空芯光子晶体-单模、单模-多模-单模、单模-细芯-单模、单模-无芯-单模等传统结构传感器的温度灵敏度进行比较,其结果如表 2 所列.

由表 2 可知,基于包层模谐振的 TCQSF 温度传感器的温度灵敏度最高,约为 FBG 的 7 倍,且制

备更为简单,高温环境下结构更为稳定;与单模-多模-单模结构传感器相比,其模式激发数目少,更便于控制与分析;与其他结构传感器相比,其尺寸更小、传输损耗更低,且谐振波峰数量少,更有利于解调;除此之外,通过向 TCQSF 空气孔层填充不同材料,能够实现谐振波长的有效控制.因此,该传感器具有结构紧凑、制备简单、模式激发可控、灵敏度高等诸多优点,能够较好地应用于温度的传感领域.

表 2 不同结构类型传感器的温度灵敏度

Table 2. Temperature sensitivity of sensors with different structures.

传感器结构	温度灵敏度/ $\text{pm}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$
单模-TCQSF-单模	73.74
FBG [23]	10.04
单模-空芯光子晶体-单模 [24]	3.70
单模-阶跃多模-单模 [25]	25.27
单模-渐变多模-单模 [26]	58.50
单模-细芯-单模 [27]	46.50
单模-无芯-单模 [28]	38.70

5 结 论

提出并验证了一种基于包层模谐振的 TCQSF 温度传感器,根据耦合模理论,深入分析了其传感

原理、耦合长度与传输谱线之间的关系、传感器温度的传感特性. 理论分析结果表明, 在传感器各层热光系数与热膨胀系数为一常数的温度变化范围内, 且耦合长度为一个拍长时, 该温度传感器的温度灵敏度的取值范围为 70.76—97.36 pm/°C. 温度传感实验结果表明, 在 35—95 °C 的温度变化范围内, 其温度灵敏度为 73.74 pm/°C, 与理论计算完全符合. 该传感器具有结构简单、易于制造、灵敏度高、包层模激发可控等优点, 能应用于工业生产、生物医学等温度检测领域.

参考文献

- [1] Gui X, Hu C C, Xie Y, Li Z Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 050704 (in Chinese) [桂鑫, 胡陈晨, 谢莹, 李政颖 2015 物理学报 **64** 050704]
- [2] Chen Y F, Han Q, Liu T G 2015 *Chin. Phys. B* **24** 014214
- [3] Zhang Z F, Zhang Y L 2015 *Opt. Laser Technol.* **74** 16
- [4] Mas S, Marti J, Palaci J 2015 *Opt. Laser Eng.* **74** 109
- [5] Ohira S I, Miki Y, Matsuzaki T, Nakamura N, Sato Y K, Hirose Y, Toda K 2015 *Anal. Chim. Acta* **886** 188
- [6] Qin W, Li S G, Xue J R, Xin X J, Zhang L 2013 *Chin. Phys. B* **22** 074213
- [7] Shrestha P, Kim J H, Park Y, Kim C G 2015 *Compos. Struct.* **125** 159
- [8] Lu Y F, Shen C Y, Zhong C, Chen D B, Dong X Y, Cai J H 2014 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **26** 1124
- [9] Luo M M, Liu Y G, Wang Z, Han T T, Wu Z F, Guo J Q, Huang W 2013 *Opt. Express* **21** 30911
- [10] Felipe B M, Claudcir R B, Cristiano M B C 2014 *Opt. Express* **22** 30432
- [11] Han Y, Xia L, Liu D M 2014 *Chin. Phys. B* **23** 104219
- [12] Villatoro J, Minkovich V P, Zubia J 2015 *Opt. Lett.* **40** 3113
- [13] Pang F F, Xiang W C, Guo H R, Chen N, Zeng X L, Chen Z Y, Wang T Y 2008 *Opt. Express* **16** 12967
- [14] Liu H H, Pang F F, Guo H R, Cao W X, Liu Y Q, Chen N, Chen Z Y, Wang T Y 2010 *Opt. Express* **18** 13072
- [15] Fu X H, Xie H Y, Zeng X L, Fu G W, Bi W H 2015 *Opt. Express* **23** 2320
- [16] Li L J, Lai Y Z, Cao M Y, Liu C, Yuan X M, Zhang X, Guan J P, Shi J, Li J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 140201 (in Chinese) [李丽君, 来永政, 曹茂永, 刘超, 袁雪梅, 张旭, 管金鹏, 史静, 李晶 2013 物理学报 **62** 140201]
- [17] Tsao C Y H, Payne D N, Gambling W A 1989 *J. Opt. Soc. Am. A* **6** 555
- [18] Xu Z N, Liu Z J 2010 *Acta Photon. Sin.* **39** 1857
- [19] Attridge J W, Cozens J R, Leaver K D, Webster N L 1985 *J. Lightwave Technol.* **3** 1084
- [20] Fu X H, Xie H Y, Zhu H B, Fu G W, Bi W H 2015 *Acta Opt. Sin.* **35** 0506002 (in Chinese) [付兴虎, 谢海洋, 朱洪彬, 付广伟, 毕卫红 2015 光学学报 **35** 0506002]
- [21] Koike A, Sugimoto N 2006 *Proc. SPIE* **6616** 61160Y
- [22] Coviello G, Finazzi V, Villatoro J, Pruneri V 2009 *Opt. Express* **24** 21551
- [23] Jin J, Lin S, Song N F 2012 *Chin. Phys. B* **21** 064221
- [24] Gong H P, Song H F, Zhang S L, Jin Y X, Dong X Y 2014 *IEEE Sens. J.* **14** 777
- [25] Tripathi S M, Kumar A, Varshney R K, Kumar Y B P, Marin E, Meunier J P 2009 *J. Lightwave Technol.* **27** 2348
- [26] Liu Y, Wei L 2007 *Appl. Optics* **46** 2516
- [27] Fu H W, Yan X, Li H D, Shao M, Zhao N, Liu Q P, Gao H, Jia Z A, Qiao X G 2014 *Acta Opt. Sin.* **34** 1106001 (in Chinese) [傅海威, 闫旭, 李辉栋, 邵敏, 赵娜, 刘钦朋, 高宏, 贾振安, 乔学光 2014 光学学报 **34** 1106001]
- [28] Ma L, Kang Z X, Qi Y H, Jian S S 2015 *Optik* **126** 1044

Research on the temperature sensing characteristics of triple cladding quartz specialty fiber based on cladding mode resonance*

Fu Xing-Hu[†] Xie Hai-Yang Yang Chuan-Qing Zhang Shun-Yang
Fu Guang-Wei Bi Wei-Hong

(Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

(Received 6 June 2015; revised manuscript received 28 September 2015)

Abstract

A triple-cladding quartz specialty fiber (TCQSF) temperature sensor based on cladding mode resonance is made. The sensor is fabricated by just splicing a short, few-centimeter-long segment of TCQSF between two standard single-mode fibers (SMFs), so the sensor structure is simple. In order to explain its sensing principle in detail, we assume that the TCQSF is equivalent to three coaxial waveguides based on coupling mode theory. Utilizing the scalar method and the relationship between Bessel function and mode field distribution of step-index circular symmetry waveguide, the mode field distribution of these waveguides and their characteristic equation can be easily obtained. Then the dispersion curves of each mode which is transmitted in the three waveguides can be calculated. The intersection between the fundamental core mode $LP_{01}(\text{rod})$ in the rod waveguide and the cladding mode $LP_{01}(\text{tube})$ in the tube waveguide I indicates that the two modes have the same propagation constant, and satisfy the phase-matching condition when the wavelength is 1563.7 nm which is known the resonant wavelength. And only when the sensor length is equal to the beatlength, can the light be coupled completely from the core to the fluorine-doped silica cladding. Thus, the cladding mode resonance phenomenon occurs and a band-stop filter spectrum will be obtained. Then the sensor is applied to the simulation calculation of the temperature sensing characteristics. With increasing temperature, both the refractive index of each layer and the sizes of the axial and radial fibers will change, which will finally lead to a big difference on the dispersion curves of $LP_{01}(\text{rod})$ and $LP_{01}(\text{tube})$. Therefore, the resonant wavelength shift of the sensor can be obtained by just calculating the dispersion curves of these two modes at different temperatures, and the scope of curvature sensitivity is 70.76–97.36 pm/°C. Finally, a straight forward experiment is performed to prove the temperature sensing properties. Experimental results show that the sensor has a sensitivity in temperature of 73.74 pm/°C at 35 °C–95 °C, which is completely consistent with the theoretically calculated results. Thus, the proposed sensor has the advantages of simple structure, easy fabrication, highly sensitivity, controlled cladding mode excitation, and so on. It can be used in industrial production, biomedical and other temperature sensing areas.

Keywords: cladding mode resonance, temperature sensor, triple cladding quartz specialty fiber, coupling mode theory

PACS: 42.81.-i, 42.81.Pa, 07.07.Df

DOI: 10.7498/aps.65.024211

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61205068, 61475133), the Hebei Provincial Natural Science Foundation, China (Grant No. F2015203270), the College Youth Talent Project of Hebei Province, China (Grant No. BJ2014057), the “Xin Rui Gong Cheng” Talent Project, and the Excellent Youth Funds for School of Information Science and Engineering, Yanshan University, China (Grant No. 2014201).

† Corresponding author. E-mail: fuxinghu@ysu.edu.cn