

基于椭球封闭空气腔的光纤复合法布里-珀罗结构折射率传感特性研究

王婷婷 葛益娴 常建华 柯炜 王鸣

Refractive index sensing characteristic of a hybrid-Fabry-Perot interferometer based on an in-fiber ellipsoidal cavity

Wang Ting-Ting Ge Yi-Xian Chang Jian-Hua Ke Wei Wang Ming

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **63**, 240701 (2014) DOI: 10.7498/aps.63.240701

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.240701>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2014/V63/I24>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于 Voronoi 图盲区的无线传感器网络覆盖控制部署策略

A deployment strategy for coverage control in wireless sensor networks based on the blind-zone of Voronoi diagram

物理学报.2014, 63(22): 220701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.220701>

星载激光多普勒测风雷达鉴频系统仿真 (I): 基于 Fizeau 干涉仪的 Mie 通道大气风速反演研究

Simulation of frequency discrimination for spaceborne Doppler wind lidar (I): Study on the retrieval of atmospheric wind speed for Mie channel based on Fizeau interferometer

物理学报.2014, 63(14): 140702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.140702>

星载激光多普勒测风雷达鉴频系统仿真 (II): 基于 Fabry-Perot 标准具的 Rayleigh 通道大气风速反演研究

Simulation of frequency discrimination for spaceborne Doppler wind lidar (II): Study on the retrieval of atmospheric wind speed for Rayleigh channel based on Fabry-Perot interferometer

物理学报.2014, 63(14): 140703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.140703>

激光器特性在痕量气体检测中的影响

Laser characteristic effect on the trace gas detection

物理学报.2014, 63(14): 140701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.140701>

全三维电离粒子有源像素探测器优化仿真

Full three-dimensional simulations of optimized active pixel detector for ionizing particle detection

物理学报.2014, 63(10): 100702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.100702>

基于椭球封闭空气腔的光纤复合法布里-珀罗结构 折射率传感特性研究*

王婷婷^{1)†} 葛益娴¹⁾ 常建华¹⁾ 柯炜²⁾ 王鸣²⁾

1)(南京信息工程大学, 江苏省气象探测与信息处理重点实验室, 南京 210044)

2)(南京师范大学, 江苏省光电技术重点实验室, 南京 210023)

(2014年7月17日收到; 2014年8月19日收到修改稿)

提出了基于微椭球型空气腔的在线型光纤复合法布里-珀罗干涉结构, 并对其折射率传感特性进行了研究. 椭球型空气微腔是利用光纤熔接机对实芯光子晶体光纤和单模光纤以特定的熔接参数熔接形成. 用高斯光束模型和 $ABCD$ 法则分析了椭球型空气腔的腔内损耗, 建立了电磁场在复合法布里-珀罗干涉结构中传播的物理模型. 根据腔长比值的不同, 环境折射率对干涉条纹的影响有对比度调制和波长调制, 主要研究了一种波长调制型复合法布里-珀罗结构折射率传感器. 仿真结果表明该折射率传感器在 1—1.6 范围内不出现折射率转折点; 实验结果表明在 1.333—1.466 范围内, 折射率灵敏度 $\sim 37.088 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$, 分辨率约为 2.69×10^{-5} . 该光纤复合法布里-珀罗结构干涉条纹对比度高、体积小、成本低, 用于折射率测量可靠性高、分辨率高、无折射率拐点、温度串扰小.

关键词: 光纤传感, 复合法布里-珀罗干涉, 折射率测量, 波长解调

PACS: 07.07.Df, 07.60.Ly, 07.60.Hv

DOI: 10.7498/aps.63.240701

1 引言

折射率 (refractive-index, RI) 传感器主要有表面等离子体共振折射率传感器^[1]、光纤光栅折射率传感器^[2,3]、马赫-曾德尔干涉型折射率传感器^[4]和光纤法布里-珀罗 (Fabry-Perot, F-P) 干涉型折射率传感器^[5-8]. 表面等离子体共振折射率传感器精度高且能实时响应但成本较高, 对温度敏感且与光纤通信的波段不兼容. 光纤光栅折射率传感器主要有基于短周期^[2]和基于长周期^[3]光纤光栅两类. 前者必须对包层进行腐蚀, 机械强度大大下降, 且易受温度波动影响; 后者传感性能受非线性特性限制, 只对很小范围敏感. 传统 F-P 干涉型折射率传感器以反射谱相位变化引起的波长漂移作为对

外界折射率的响应, 通过检测波长偏移测量气体或液体折射率, 理论上能提供对温度不敏感的绝对测量^[5]. 这类传感器测量精度高, 解调方法直接简单, 适于实时测量, 但由于都是开放性腔, 可靠性受液体填充过程中沉积在腔内的污染物严重影响. 另一种是将传感头没入待测介质, 利用反射光谱的条纹对比度来测量折射率^[6-8], 这类传感器制作和测量过程都比较简单, 但解调较前者麻烦, 且存在折射率转折点, 线性范围较窄. 电子科技大学饶云江教授研究团队 2008 年利用 157 nm 激光器加工的光纤 F-P 折射率传感器克服了温度交叉敏感的问题, 但制作过程复杂, 且在解调过程中需要去掉低频调制信号, 降低了测量精度^[6]. 2011 年他们利用化学腐蚀渐变折射率多模光纤制作了光纤 F-P 复

* 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 61405094, 61307061)、江苏省高校自然科学研究面上项目 (批准号: 14KJB510018)、江苏省气象探测与信息处理重点实验室开放基金 (批准号: KDXS1301) 和江苏高校优势学科 II 期建设工程项目 (“信息与通信工程” 优势学科) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: wtt79812@163.com

合结构折射率传感器, 并对折射率-对比度的灵敏度进行了分析^[7], 但不同波长处获得的灵敏度不相同, 这给解调带来了麻烦. 2009年, 邓明等^[8]提出另一种基于光子晶体光纤的折射率和温度传感器的F-P腔, 由光子晶体光纤两端与普通单模光纤熔接构成, 并用飞秒激光器切割一端单模光纤形成约20 μm的盖子防止被测液体进入F-P腔, 这种传感器干涉条纹没有低频调制, 测量更精确. 但飞秒激光器增加了制作的成本和复杂性, 且长腔长限制了利用直接测波长偏移来测温的范围.

2012年, 我们研究小组提出了基于封闭椭球型空气腔的高对比度F-P干涉仪^[9], 本文在此基础上研究了基于微椭球型空气腔的复合F-P结构的折射率特性. 根据第二、第一物理腔腔长比, 环境折射率对干涉条纹的影响分对比度调制与波长调制. 前者通过测量频率分量比例参数和波长偏移可同时测量折射率和温度^[10]; 后者没有折射率转折点, 采用直接的波长跟踪解调, 且可通过控制第二物理腔的长度选择需要的折射率测量范围. 本文介绍了一种既能保证可靠性又能直接解调、实时检测的高灵敏度折射率传感器.

2 基于微椭球型封闭空气腔的光纤复合法布里-珀罗结构理论模型

基于微椭球型封闭空气腔的光纤复合法布里-珀罗 (ellipsoidal cavity hybrid F-P, ECHFP) 结构如图1所示. 在靠近探头的普通单模光纤 (SMF) 和光子晶体光纤 (PCF) 熔接点处内嵌一椭球型空气腔. ECHFP结构有三个反射面, 分别是反射面1, SMF-空气; 反射面2, 空气-PCF和反射面3, PCF-待测液体, 反射系数分别为 R_1 , R_2 和 R_3 . 反射面1和2形成腔长 L_1 的第一物理腔腔1; 反射面2和3形成腔长 L_2 的第二物理腔腔1. 光纤纤芯和待测液体的折射率分别用 n_0 和 n' 表示. $R_1 = R_2 = (n_0 - 1)^2 / (n_0 + 1)^2 = 0.034 \ll 1$, 而 $R_3 = (n_0 - n')^2 / (n_0 + n')^2 \ll 1$, 仅 R_3 与待测液体折射率 n' 有关.

图2显示了三个反射面的电场强度示意图, 由于反射面的反射系数都远小于1, 高阶反射可以忽略. 考虑到腔1中的传输损耗 α 和腔2中的损耗 γ , 反射场 E_r 可以近似表示为三个端面的一阶反射电

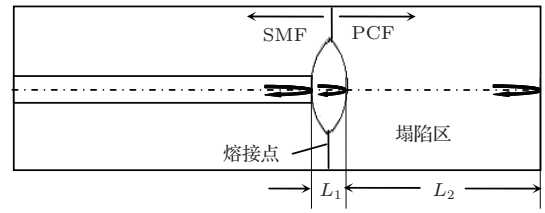


图1 基于微椭球型封闭空气腔的ECHFP示意图

场之和 $E_I + E_{II} + E_{III}$, 如图1所示. 其中 γ 包括由于折射引起的光束发散及可能的杂散光造成的传输损耗 γ_1 和由于传感器探头表面粗糙造成的反射损耗 γ_2 . 由于光束的发散, 腔2越长, 经端面反射后耦合进单模光纤的能量越小, γ_1 越大. γ_2 大小可通过研磨工艺控制, 因此 γ 值在一定范围内可控.

$$E_r = \sqrt{R_1} E_i + (1 - \alpha)(1 - R_1) \sqrt{R_2} E_i \times \exp \left[j \left(\frac{4\pi}{\lambda} L_1 + \pi \right) \right] + (1 - \alpha)(1 - \gamma)(1 - R_1)(1 - R_2) \sqrt{R_3} E_i \times \exp \left\{ j \left[\frac{4\pi}{\lambda} (L_1 + n_0 L_2) \right] \right\} \quad (n' \leq n_0), \quad (1)$$

$$E_r = \sqrt{R_1} E_i + (1 - \alpha)(1 - R_1) \sqrt{R_2} E_i \times \exp \left[j \left(\frac{4\pi}{\lambda} L_1 + \pi \right) \right] + (1 - \alpha)(1 - \gamma)(1 - R_1)(1 - R_2) \sqrt{R_3} E_i \times \exp \left\{ j \left[\frac{4\pi}{\lambda} (L_1 + n_0 L_2) + \pi \right] \right\} \quad (n' > n_0), \quad (2)$$

E_i 为垂直入射到反射面1的入射场, 由于光在光疏介质到光密介质界面发生反射, 反射面2的反射场存在半波损失. 当 $n' > n_0$ 时, 反射面3的反射也存在半波损失. 从(1)和(2)式中得到归一化的反射谱:

$$R = |E_r / E_i|^2 = A_0 - A_1 \cos \frac{4\pi L_1}{\lambda} + A_2 \cos \frac{4\pi(L_1 + n_0 L_2)}{\lambda} - A_3 \cos \frac{4\pi n_0 L_2}{\lambda} \quad (n' \leq n_0), \quad (3)$$

$$R = |E_r / E_i|^2 = A_0 - A_1 \cos \frac{4\pi L_1}{\lambda} - A_2 \cos \frac{4\pi(L_1 + n_0 L_2)}{\lambda} + A_3 \cos \frac{4\pi n_0 L_2}{\lambda} \quad (n' > n_0), \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} A_0 = R_1 + (1 - \alpha)^2(1 - R_1)^2 R_2 + (1 - \alpha)^2(1 - \gamma)^2(1 - R_1)^2(1 - R_2)^2 R_3, \\ A_1 = 2\sqrt{R_1 R_2}(1 - \alpha)(1 - R_1), \\ A_2 = 2\sqrt{R_1 R_3}(1 - \alpha)(1 - \gamma)(1 - R_1)(1 - R_2), \\ A_3 = 2\sqrt{R_2 R_3}(1 - \alpha)^2(1 - \gamma)(1 - R_1)^2(1 - R_2). \end{cases} \quad (5)$$

(3)–(5)式描述了 $n' \leq n_0$ 和 $n' > n_0$ 时的反射谱干涉模型, 输出归一化反射谱与输入光功率无关, 要获得高对比度反射谱, 需要想办法降低腔的传输损耗 α 和 γ .

我们用高斯光束模型和 $ABCD$ 法则描述光波传输过程^[11], 研究腔1中的传输损耗 α . 从 SMF 入射到椭球腔的光束可看作高斯光束, 该高斯光束束腰位置在空气腔的前反射面, 束腰直径等于 SMF 模场直径^[12]. 采用的 SMF-28 模场直径 (MDF) @1550 nm 为 $(9.2 \pm 0.8) \mu\text{m}$. 假设从前反射面发出的光束腰半径为 ω_0 , 波长为 λ , 根据高斯光束瑞利范围公式 $z_r = \pi\omega_0^2/\lambda$, 当波长为 1550 nm, $\omega_0 = \text{MDF}/2$ 时, z_r 超过 $40 \mu\text{m}$. 本文提出的 ECHFP 结构的空气腔腔长为 $10 \mu\text{m}$ 左右, 远

小于 z_r , 因此干涉腔中衍射损耗很小, 几何偏离损耗成为主要传输损耗.

F-P 干涉腔中高斯光束沿光轴 z 方向传输, 定义复参数 q 为

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - i\frac{1}{\pi\omega^2(z)}, \quad (6)$$

式中 $R(z)$ 和 $\omega(z)$ 分别是与束腰距离 z 处的等相位面的曲率半径和光斑半径. 设 $z = z_0$ 处的 $q_0 = iz_r$, 则在 z 处的 $q(z)$ 为

$$\begin{aligned} q(z) &= \frac{Aq_0 + B}{Cq_0 + D} \\ &= \frac{Aiz_r + B}{Ci z_r + D} \\ &= \frac{BD + ACz_r^2}{D^2 + C^2z_r^2} + i\frac{(AD - BC)z_r}{D^2 + C^2z_r^2}, \end{aligned} \quad (7)$$

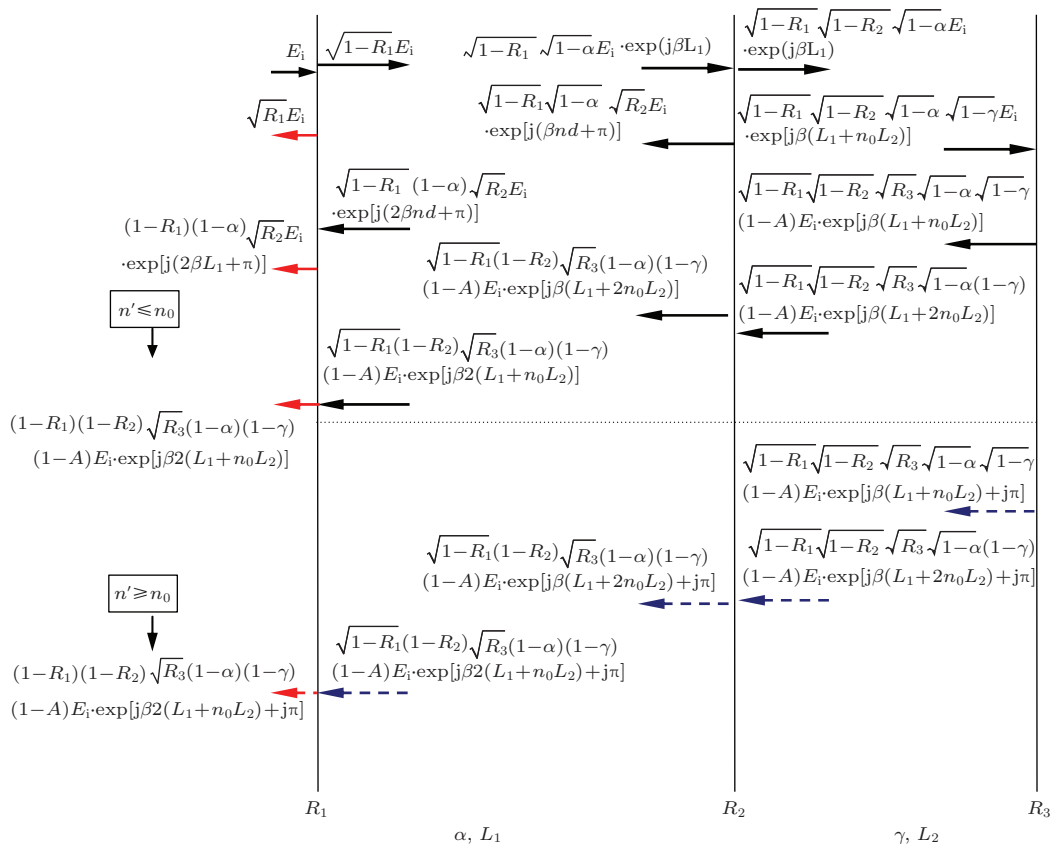


图2 电磁场在 ECHFP 腔内传播示意图

式中 A, B, C, D 是高斯光束从 $z_0 \rightarrow z$ 的传输矩阵 \mathbf{T} 的矩阵元素,

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}. \quad (8)$$

将 (7) 式与 (6) 式比较得到

$$\frac{(D^2 + C^2 z_r^2) z_r \text{Det} \mathbf{T}}{(BD + AC z_r^2)^2 + (z_r \text{Det} \mathbf{T})^2} = \frac{\lambda}{\pi \omega^2(z)}. \quad (9)$$

在反射高斯光束的腰斑 $z = l$ 处, 有

$$BD + AC z_r^2|_{z=l} = 0. \quad (10)$$

将 (10) 式代入 (9) 式可得反射高斯光束束腰半径

$$\omega_0'^2 = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \frac{z_r \text{Det} \mathbf{T}}{D^2 + C^2 z_r^2}. \quad (11)$$

高斯光束经过反射面反射时, 传输矩阵 $\mathbf{T} = \mathbf{T}_Z \mathbf{R}_r \mathbf{T}_{Z_0}$, \mathbf{T}_Z 和 \mathbf{T}_{Z_0} 分别是高斯光束在匀质空间的传输矩阵, \mathbf{R}_r 是反射面的反射矩阵,

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_Z &= \begin{bmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{T}_{Z_0} &= \begin{bmatrix} 1 & z_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{R}_r &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/r & 1 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (12)$$

其中 r 是反射面的曲率半径. 则

$$\begin{aligned} \mathbf{T} &= \begin{bmatrix} 1 - 2z/r & z_0 + z - 2zz_0/r \\ -2/r & 1 - 2z_0/r \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (13)$$

行列式 $\text{Det} \mathbf{T} = AD - BC = 1$.

将 (13) 式以及焦距 $f = r/2$, z_0 等于腔长 d 代入 (10) 和 (11) 式, 得到高斯光束经过反射面反射时的高斯变换方程式:

$$\frac{l}{f} - 1 = \left(\frac{d}{f} - 1\right) / \left[\left(\frac{d}{f} - 1\right)^2 + \left(\frac{z_r}{f}\right)^2\right], \quad (14)$$

$$\omega_0' = \frac{\omega_0}{\sqrt{\left(\frac{d}{f} - 1\right)^2 + \left(\frac{z_r}{f}\right)^2}}. \quad (15)$$

当腔长 d 等于反射面曲率半径 r 时, 椭球型空气腔可看作共焦腔, 且后凹面可看作是一个焦距

f 等于 $d/2$ 的透镜. 将 $f = d/2$ 代入 (14) 和 (15) 式, 可得到经后凹面反射回来的高斯光束的束腰半径 $\omega_{01} = \omega_0 d(d^2 + 4z_r^2)^{-1/2}$, 束腰位置距反射面长度 $l = d(d^2 + 2z_r^2)/(d^2 + 4z_r^2)$. 值得注意的是, 在前反射面即 $z = d$ 处, 代入 (12) 和 (9) 式, 可得矩阵元素 $A = -1, B = 0, C = -2/d, D = -1$, 则

$$\frac{\left(1 + \frac{4}{d^2} z_r^2\right) z_r}{\left(\frac{2}{d} z_r\right)^2 + z_r^2} = \frac{1}{z_r} = \frac{\lambda}{\pi \omega_0^2(z)} = \frac{\lambda}{\pi \omega^2(z)}. \quad (16)$$

当腔长等于反射面曲率半径时, 反射回的高斯光束在前反射面的光束半径与入射高斯光束的束腰半径 ω_0 相等, 此时理论上所有反射回的能量都耦合进入了单模光纤的纤芯, 几何偏离损耗最小. 若能将腔 1 制成共焦腔, 传输损耗 α 会极小, 总损耗主要为腔 2 损耗 γ . 显然腔 2 越长 γ 越大, 一般小于 $200 \mu\text{m}$.

3 ECHFP 制作工艺

为了得到高对比度反射光谱, 我们利用普通光纤熔接机加工制作了具有空气共焦腔的复合 F-P 结构, 具体制作步骤如下.

1) 用光纤切割刀切割 SMF-28 和光子晶体光纤 (PCF), 保护好切割端面; PCF 采用长飞公司提供的 SM-7.0-1040-28, 纤芯直径为 $7.0 \mu\text{m}$, 模场直径为 $3.9 \mu\text{m}@1550 \text{nm}$. PCF 包层外径与 SMF 包层外径同为 $125 \mu\text{m}$, 方便对准.

2) 用光纤熔接机 (古河 FITELE S176) 将已切割好端面的一端熔接, 熔接时 PCF 应稍远离电极; 第一次放电后, 熔接点处边缘首先熔接上, 而中心由于 PCF 包层空气孔的塌陷排出的空气被捕获形成空气腔. 放电的熔接参数: 间隙 $50 \mu\text{m}$, 预熔时间 0.2s , 预熔电流 5mA , 熔接电流 7mA , 熔接时间 650ms , z 轴推进量 $15 \mu\text{m}$, 追加放电电流 7mA , 追加放电时间 650ms .

3) 利用环行器对反射谱监测, 监测系统使用光传感分析仪 (OSA, Si720, Micron Optics Inc, USA). 传感分析仪输出波长为 $1510\text{--}1590 \text{nm}$ 的扫描激光, 其相干长度和谱宽分别为 $\sim 2.4 \text{m}$ 和 1pm , 波长分辨率和精度分别为 0.25 和 1pm . 扫描激光经环行器到达干涉腔, 发生 F-P 干涉, 反射回的干涉信号通过环行器被传输输入传感分析仪输入端并

被记录下来. 多次追加放电, 观察干涉信号, 使反射条纹对比度最大, 这时腔长 d 与反射面曲率半径 r 接近相等.

4) 将 PCF 切割并研磨至需要的长度, 为了避免被测液体通过空气孔进入包层, 仅保留塌陷的部分, 得到图 3(c) 所示的光纤复合 F-P 结构.

熔接中, 由于电极放电, PCF 包层空气孔在电极附近塌陷了数百微米. 以步骤 2) 中提到的熔接参数第一次放电后, SMF 和 PCF 的边缘被熔接在一起, 一部分原本在 PCF 包层空气孔中的空气被捕获形成了微型空气腔. 这时, 空气腔的腔长 d 非常短, 远远小于反射面的曲率半径 r , 此时空气腔的金相显微照片见图 3(a) 中左边的插图. 从图中可看出放电一次后干涉条纹对比度较低, 约为 14 dB, 这主要是因为两反射面较为粗糙且还未对准.

由图 3(a) 可知, d 随放电次数的增加而增加, r 逐渐减小. 4 次放电后 r 与 d 近似相等, 此时空气腔接近共焦腔, 金相显微照片见图 3(a) 中间插图. 干涉光谱图如图 3(b) 所示, 干涉腔腔长为 $8.66 \mu\text{m}$. 如前文分析, 此时几乎所有反射能量都被耦合到 SMF 纤芯中, 腔内传输损耗最小, 干涉条纹的条纹对比度达到约 30 dB.

放电 8 次后, 空气腔变成自然球型, 且形状不再随放电次数增加而改变, 这是因为空气腔内部压力各向同性, 金相显微照片见图 3(b) 中右边插图. 空气腔此时为同心腔, 两反射面焦距为 $1/4$ 个腔长, 在前反射面的反射光束半径远大于入射光束半径 ω_0 . 因此, 腔内高传输损耗使得干涉信号的条纹对比度仅为 12 dB.

图 3(b) 为基于微椭球型封闭空气 F-P 腔的金相显微照片, 可以看出 PCF 和 SMF 的表面很好地熔接在一起且形成封闭空气共焦腔. 该 F-P 干涉腔反射谱如图 3(b) 所示. 从图中可以看出, 这种干涉

腔干涉条纹对比度很高, 达到约 30 dB, 这比传统手工组装制作的 F-P 腔的对比度高出许多, 典型的典型值都不到 15 dB.

用上述制作过程制作微椭球型封闭空气腔并利用传感分析仪在制作过程中对其进行实时实地的监测, 形成椭球型空气腔的成功概率达到约 90%, 腔长 d 变化范围为 $8.5\text{--}10 \mu\text{m}$, 单 F-P 干涉条纹对比度为 $27\text{--}31 \text{ dB}$. 腔长或干涉条纹对比度的不一致可能是由于在熔接过程中采用手工对齐方式对光子晶体光纤与单模光纤进行对齐, 存在误差. 相信如果采用能自动对齐两种光纤的光纤熔接机进行熔接, 器件的工艺制作重复性将会提高.

4 ECHFP 折射率特性研究

图 4 仿真了腔 2 比腔 1 长一个数量级的情况, 各物理参数为 $R_1 = R_2 = 0.034$, $L_1 = 13633 \text{ nm}$, $L_2 = 113000 \text{ nm}$, $\alpha = 0.1$, $n_0 = 1.45$. 由于腔 2 是长腔, 反射谱包含许多小条纹, 若浸入光纤匹配液 ($n' = 1.45$), 则 $R_3 = 0$, 高频分量 $A_2 = A_3 = 0$, 小条纹消失, 只存在零频分量和由腔 1 决定的高频分量, 即图 4 中的包络线. 图 4(a) 中小条纹对比度随环境折射率变化, $n' = 1$ 时最大, 接着随折射率单调减小, 到 $n' = 1.45$ 时下降为 0; $n' = 1.45$ 是个转折点, 之后对比度又随折射率增加. 因此要通过小条纹对比度大小解调出环境折射率必须结合反射谱, 观察与 $n' = 1$ 时的是否反相, 若反相则大于 1.45, 同相则小于 1.45. 由图 4(b) 可见, 随腔 2 传输损耗 γ 的减少, 在空气中的反射谱小条纹对比度增加, 对比包络线可以看出折射率传感的灵敏度提高. 根据 (5) 式, 也可得出传输损耗 γ 越小, 折射率传感器的理论分辨率和理论灵敏度越大的结论. 因此, 要获得较高灵敏度, 可减小腔 2 的长度.

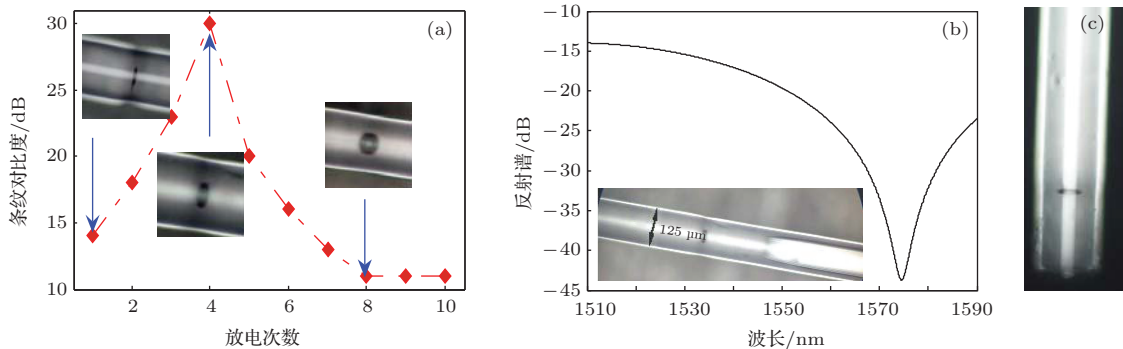


图 3 (a) 条纹对比度及空气腔形状随放电次数的变化; (b) 金相显微照片及其反射谱, 腔长为 $8.66 \mu\text{m}$; (c) 复合 F-P 结构金相显微照片

在已发表的论文[10]中,我们详细描述了这种对比度调制型的折射率传感器.文中引入频谱分量比例参数 A_R 统一了灵敏度(约为 5.68 RIU^{-1}),理论分辨率为 1.2×10^{-5} ,重复率为 $\pm 0.5\% \text{ FS}$.这种传感器通过测量 A_R 和波谷波长偏移可同时测量温度和折射率.该传感器展示了许多优良特性,包括多参数测量、可靠性高、高分辨率、体积小、制造成本低等;但折射率转折点问题仍未解决,解调仍需结合反射谱.

腔1保持不变,小条纹随 L_2 的减小逐渐减少,当 $L_2/L_1 < 2$ 时,反射谱干涉条纹在1510—1590 nm范围内只出现了一个波谷,如图5所示.

图5(a)是当 $L_1 = 10 \mu\text{m}$, $L_2 = 10.5 \mu\text{m}$, $\gamma = 0.2$ 时不同腔内损耗 α 对应的仿真反射谱.图5(a)中干涉条纹对比度随 α 下降而增加,且波谷更尖锐.因此被制成共焦腔的腔1可使该结构获得更高的对比度和测量精度.图5(b)是环境折射率为1.33时,当 $L_1 = 10 \mu\text{m}$, $L_2 = 10.5 \mu\text{m}$, $\alpha = 0.01$ 时不同腔内损耗 γ 对应的仿真反射谱.从图中可看出 γ 对对比度的影响并不明显,但随着 γ 的增大,波谷波长向短波长移动.而 $\gamma = 1$ 时(粗黑线)等效于环境折射率为1.45时的反射谱,即单F-P干涉反射谱,因此随着 γ 的增加,折射率-波长灵敏度将会降低,如图6(a)所示,但线性范围变大.

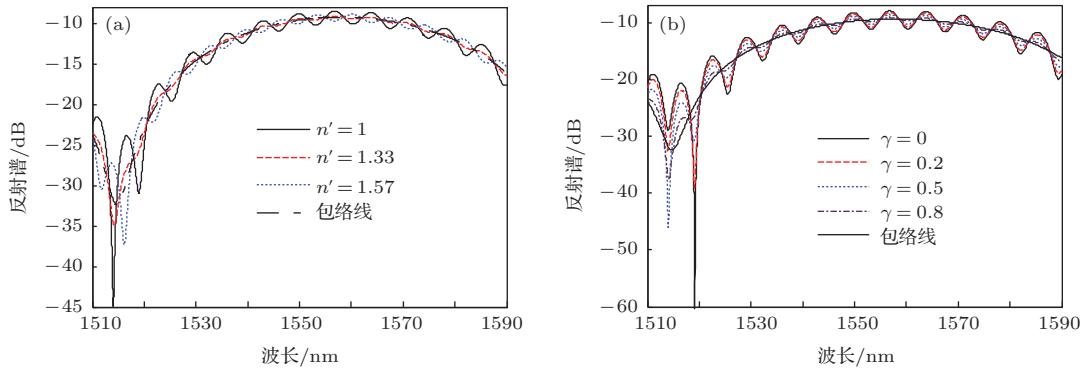


图4 (网刊彩色) (a) $\gamma = 0.32$ 时不同 n' 的反射谱仿真图; (b) $n' = 1.0$ 时不同 γ 的反射谱仿真图

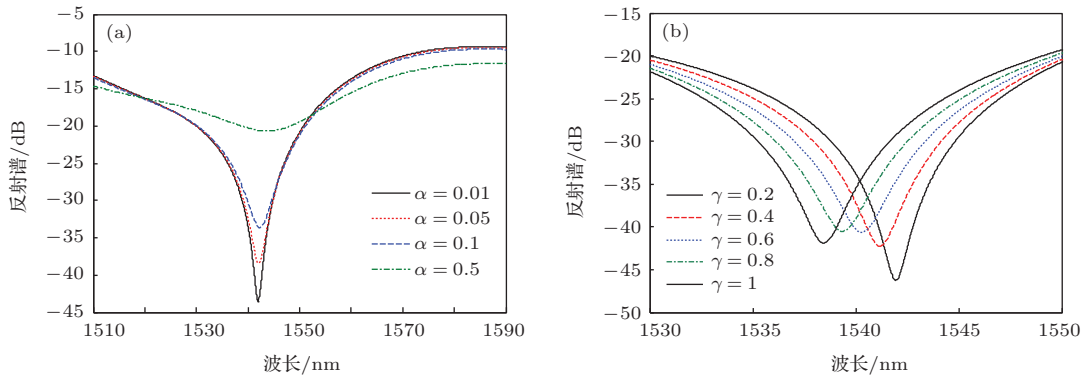


图5 (网刊彩色) $n' = 1.33$ 时 (a) 不同 α 的仿真反射谱($\gamma = 0.2$)和 (b) 不同 γ 的仿真反射谱($\alpha = 0.01$)

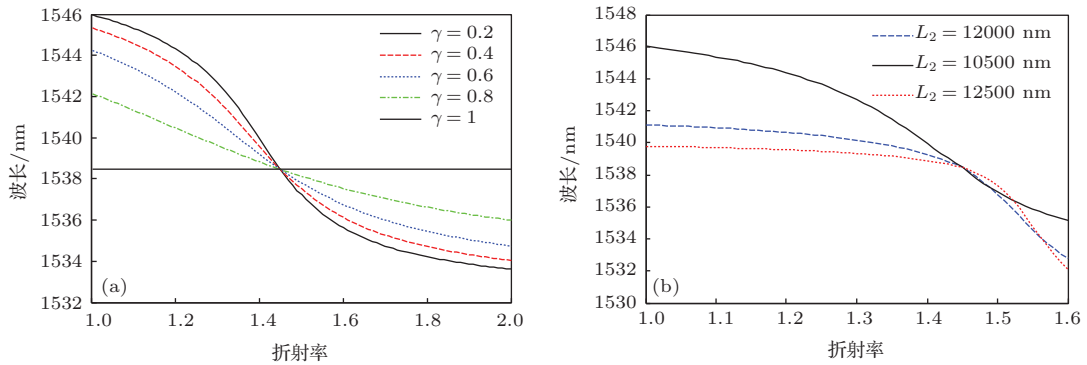


图6 (网刊彩色) (a) 不同 γ ($L_2 = 10.5 \mu\text{m}$)和 (b) 不同 L_2 ($\gamma = 0.2 \mu\text{m}$)对应的传感器折射率响应特性($L_1 = 10 \mu\text{m}$)

$\alpha = 0.01, \gamma = 0.02, L_1 = 10 \mu\text{m}$ 时,不同 L_2 对应的外界折射率 n' 从1到1.6的传感器折射率响应仿真关系如图6(b)所示。 $L_2 = 10.5 \mu\text{m}$ 时(黑色实线),在外界折射率1—1.3和1.5—1.6段,响应曲线较平坦,平均灵敏度分别为 8.25 和 $17.5 \text{ nm}\cdot\text{RIU}^{-1}$,此区间相对不够敏感;而在1.3—1.5段,响应曲线较陡峭,平均灵敏度达到 $29 \text{ nm}\cdot\text{RIU}^{-1}$,若使用波长分辨率为 1 pm 的光谱仪,折射率理论分辨率可达到 3.45×10^{-5} ; $L_2 = 12 \mu\text{m}$ 时(蓝色虚线),敏感区域在1.45—1.6段,平均灵敏度为 $38 \text{ nm}\cdot\text{RIU}^{-1}$,折射率分辨率达到 2.63×10^{-5} ,不同被测折射率对应的仿真反射谱如图7(a)所示; $L_2 = 12.5 \mu\text{m}$ 时(红色冒号线),敏感区域在1.5—1.6段,平均灵敏度达到 $52.4 \text{ nm}\cdot\text{RIU}^{-1}$,折射率分辨率达到 1.91×10^{-5} 。可见 L_1 固定,通过精确控制 L_2 可在需要的折射率范围内获得较好的线性度和较高的灵敏度。 $L_1 = 8.64 \mu\text{m}, L_2 = 16.7 \mu\text{m}$ 时不同被测折射率对应的仿真反射谱如图7(b)。图7中反射谱波谷波长均随折射率增加发生单调蓝移,未出现折射率转折点,对比度随折射率变化无明显规律。因

此可采用直接波长跟踪解调外界折射率。

接下来分析这种传感器的温度响应特性。图8(a)是 $\alpha = 0.01, L_1 = 10 \mu\text{m}, L_2 = 12.5 \mu\text{m}$ 时传感器探头在纯净水中不同温度的仿真反射谱。由于石英的热膨胀系数($5.5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$)和热光系数($8.31 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)都为正, L_2 和 n_0 随温度增加而增加,表现在干涉条纹上就是波谷波长 λ_{min} 随着温度的增加发生红移。图8(b)所示为温度与波谷波长 λ_{min} 的仿真关系,波长随温度升高向长波长方向偏移,灵敏度仅为 $1.43 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,远小于折射率灵敏度,因此可认为该传感器温度不敏感。

5 波长调制型折射率传感实验结果与分析

折射率测量实验装置如图9所示。按前述制作步骤制作的传感探头的金相显微照片见图中的放大部分。OSA输出的扫描激光经环行器进入传感探头,反射的干涉光谱又由环行器回到OSA显示。OSA中光谱图是传感探头在纯净水中的反射谱。

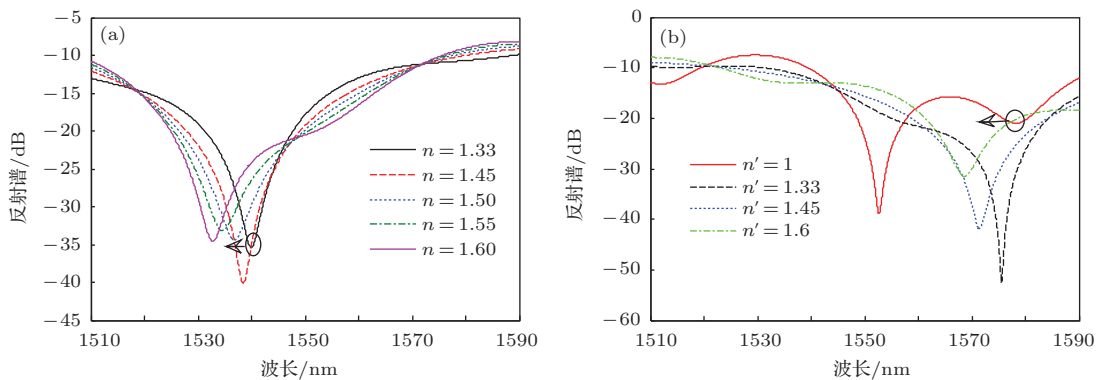


图7 (网刊彩色) 不同 n' 的反射谱仿真图 (a) $L_1 = 10 \mu\text{m}, L_2 = 12 \mu\text{m}$; (b) $L_1 = 8.64 \mu\text{m}, L_2 = 16.7 \mu\text{m}$

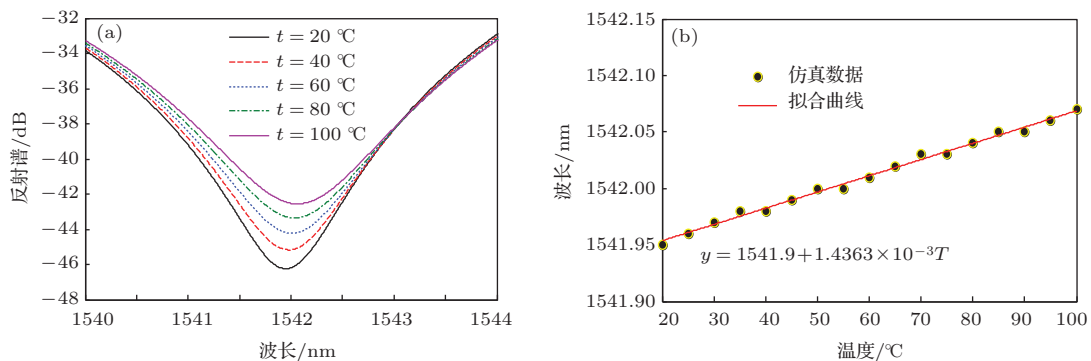


图8 (网刊彩色) (a) 不同温度对应的传感器仿真反射谱; (b) 温度与波谷波长 λ_{min} 的仿真关系

具体实验中传感探头 L_1 约为 $8.64 \mu\text{m}$, L_2 约为 $16.7 \mu\text{m}$. 图 10(a) 是传感器在不同浓度丙三醇溶液中的反射光谱图, 折射率分别为 1, 1.333, 1.355, 1.466, 与图 7(b) 的反射谱仿真图符合. 可看出反射谱的波谷波长随折射率增加单调蓝移. 为进行标定, 我们将传感探头浸入丙三醇溶液中重复测量三次, 溶液折射率通过改变溶剂的浓度控制. 不同浓度的丙三醇溶液样本的折射率通过阿贝折射率仪使用钠 D 线 (589 nm) 进行标定. 图 10(b) 所示为丙三醇溶液折射率和三次实验测得的平均波谷波长的关系图, 折射率从 1 到 1.48 增加时波谷波长单调减小, 没有转折点. 折射率在 1—1.3

范围内关系曲线较平坦, 而在 1.3—1.48 范围内灵敏度为 $37.088 \text{ nm}\cdot\text{RIU}^{-1}$, 3 次测量标准偏差约为 $\pm 3.9 \text{ pm}$, 在此范围用波长跟踪方法解调出来的折射率理论分辨率约为 2.69×10^{-5} , 折射率传感器的测量重复性约为 $\pm 0.15\% \text{ FS}$.

为得到折射率传感器的精度, 我们将探头浸入温度保持在 25°C 的纯水中, 连续测量 60 min, 每 30 s 记录一次波谷波长. 从图 11 可看出, 波长标准偏差约 $\pm 4.2 \text{ pm}$, 对应的折射率精度 2.28×10^{-4} , 这个值小于理论精度的主要原因是受到了光源稳定性、光电探测噪声以及系统中其他部件的电路噪声扰动等的影响.

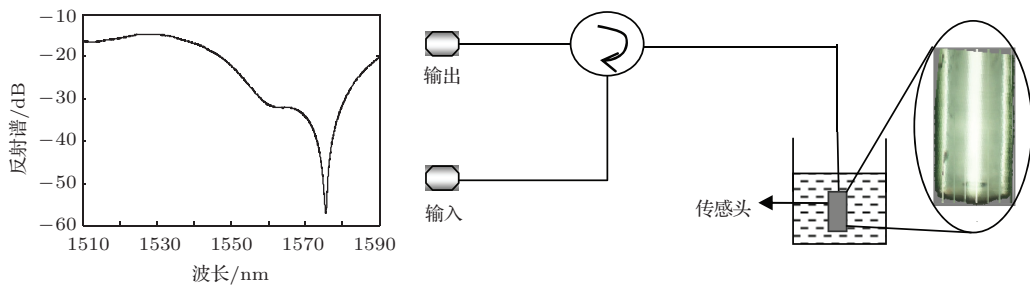


图 9 波长调制型折射率传感器标定实验装置

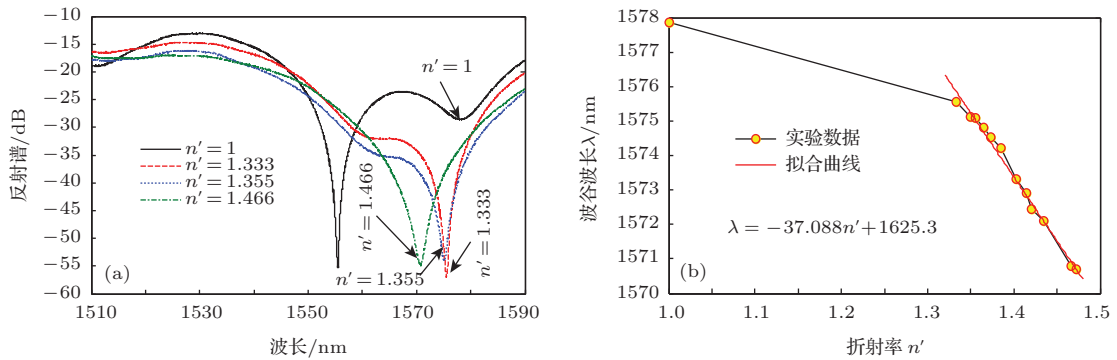


图 10 (网刊彩色) (a) 传感器在不同浓度丙三醇溶液中的反射光谱; (b) 丙三醇溶液折射率和实验测得波谷波长关系

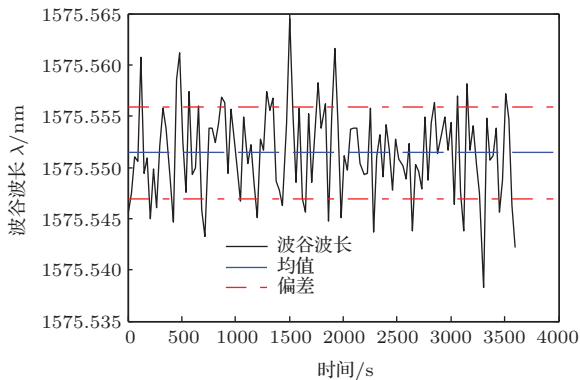


图 11 (网刊彩色) 传感器折射率精度测量

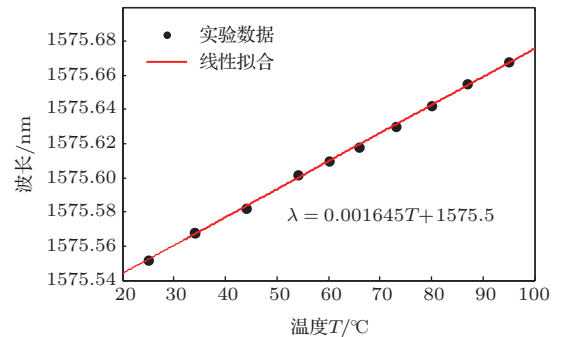


图 12 温度与波谷波长的关系

最后我们将折射率传感器放在温控箱中研究

了它的温度特性, 温度从 25°C 升高到 95°C 再降到 25°C 并重复两次. 温度-平均波谷波长关系如

图 12 所示. 波谷随温度升高稍向长波长方向偏移, 灵敏度为 $1.6 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, 远小于折射率灵敏度, 因此可认为该折射率传感器无温度串扰.

6 结 论

本文分析了基于微椭球型空气腔在线型光纤复合法布里-珀罗干涉结构的折射率传感特性. 根据第二物理腔与第一物理腔的比值, 折射率对干涉条纹的影响分为对比度调制和波长调制. 本文详细研究了波长调制型折射率传感特性. 实验结果表明, 折射率在 $1.333\text{—}1.466$ 范围内传感器灵敏度达到约 $37.088 \text{ nm}\cdot\text{RIU}^{-1}$, 分辨率约为 2.69×10^{-5} , 无明显温度串扰. 该传感器克服了已有复合 F-P 折射率传感器存在折射率拐点的问题, 并采用波长跟踪解调, 简单直接, 可用于实时测量. 该传感器结构简单、成本低, 适用于化学和生物领域的高分辨率传感.

参考文献

- [1] Zhao H J 2012 *Chin. Phys. B* **21** 087104
- [2] Sang X Z, Yu C X, Mayteevarunyoo T, Wang K, Zhang Q, Chu P L 2007 *Sens. Actuat. B: Chemical* **120** 754
- [3] Chen X F, Zhou K M, Zhang L, Bennion I 2007 *Appl. Opt.* **46** 451
- [4] Li H D, Fu H W, Shao M, Zhao N, Qiao X G, Liu Y G, Li Y, Yan X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 214209 (in Chinese) [李辉栋, 傅海威, 邵敏, 赵娜, 乔学光, 刘颖刚, 李岩, 闫旭 2013 物理学报 **62** 214209]
- [5] Wei T, Han Y K, Li Y J, Tsai H L, Xiao H 2008 *Opt. Express* **16** 5764
- [6] Ran Z L, Rao Y J, Liu W J, Liao X, Chiang K S 2008 *Opt. Express* **16** 2252
- [7] Gong Y, Guo Y, Rao Y J, Zhao T, Wu Y, Ran Z L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 064202 (in Chinese) [龚元, 郭宇, 饶云江, 赵天, 吴宇, 冉曾令 2011 物理学报 **60** 064202]
- [8] Deng M, Rao Y J, Zhu T, Duan D W 2009 *Acta Opt. Sin.* **29** 1790 (in Chinese) [邓明, 饶云江, 朱涛, 段德稳 2009 光学学报 **29** 1790]
- [9] Wang T T, Wang M, Ni H B 2012 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24** 948
- [10] Wang T T, Wang M 2012 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24** 1733
- [11] Chu T S 1966 *Bell Syst. Tech. J.* **45** 287
- [12] Marcuse D 1977 *Bell Syst. Tech. J.* **56** 703

Refractive index sensing characteristic of a hybrid-Fabry-Perot interferometer based on an in-fiber ellipsoidal cavity*

Wang Ting-Ting^{1)†} Ge Yi-Xian¹⁾ Chang Jian-Hua¹⁾ Ke Wei²⁾ Wang Ming²⁾

1) (Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

2) (Provincial Key Lab of Opto-Electronic Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(Received 17 July 2014; revised manuscript received 19 August 2014)

Abstract

A hybrid-Fabry-Perot (F-P) interferometer based on an in-fiber ellipsoidal cavity is presented, and the refractive index sensing properties are studied. The ellipsoidal air-microcavity is formed by splicing together a single-mode fiber and a photonic crystal fiber with special arc-discharge technique. The cavity loss is analyzed by using a Gaussian beam model and the $ABCD$ law, and the physical model of electromagnetic transmission is established. According to the cavity length ratio, there are two kinds of the influences of environment refractive index on interference fringe: contrast modulation and wavelength modulation. A fiber refractive index sensor with an enclosed air cavity based on wavelength demodulation is proposed in this paper. The result of simulation shows that the sensors has no turning point in a range of 1–1.6. A wavelength interrogation technique is used to demodulate refractive-index with high sensitivity ($\sim 37.088 \text{ nm}\cdot\text{RIU}^{-1}$) and high resolution ($\sim 2.69 \times 10^{-5}$) and with low temperature crosstalk. Experimental results are in good agreement with the theoretical ones. The F-P fiber sensor also holds advantages such as compactness, low cost, easy fabrication, high contrast, high resolution, no turning point, and low temperature crosstalk.

Keywords: fiber sensing, hybrid Fabry-Perot, refractive-index measurement, wavelength interrogation

PACS: 07.07.Df, 07.60.Ly, 07.60.Hv

DOI: 10.7498/aps.63.240701

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61405094, 61307061), the Natural Science Foundation of the Higher Education Institutions of Jiangsu Province, China (Grant No. 14KJB510018), the Foundation of Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, China (Grant No. KDXS1301), and the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions, China.

† Corresponding author. E-mail: wtt79812@163.com