

基于 SPR 效应和缺陷耦合的光子晶体光纤高灵敏度 磁场与温度传感器

朱晟晁, 谭 策, 王 琰, 高 源, 董碧成, 马翰林, 刘 海

中国矿业大学信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221116

摘要 设计了一种基于表面等离子体共振 (SPR) 效应以及缺陷耦合机理的新型光子晶体光纤传感器。该传感器结构中光子晶体光纤包层的一个特定空气孔内表层被镀上金属薄膜, 通过改变另一空气孔直径以形成缺陷, 并在两个空气孔中填充磁流体材料。通过分析磁流体的折射率与温度、磁场的关系, 实现了对温度和磁场的同时测量。实验结果表明, 耦合谐振峰与 SPR 损耗峰在温度升高时均产生蓝移, 磁场增强时均产生红移。耦合谐振峰与 SPR 损耗峰的温度灵敏度分别可达到 $-1.338 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 和 $-1.575 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, 磁场灵敏度分别为 $4.333 \mu\text{m}/\text{T}$ 和 $2.816 \mu\text{m}/\text{T}$ 。该传感器不仅具有高灵敏度, 而且实现了磁场和温度的精确测量。

关键词 传感器; 光子晶体光纤; 表面等离子体共振; 模式耦合; 光纤传感

中图分类号 TN25

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0310001

Photonic Crystal Fiber High Sensitivity Magnetic Field and Temperature Sensor Based on Surface Plasma Resonance Effect and Defect Coupling

Zhu Chenghao, Tan Ce, Wang Yan, Gao Yuan, Dong Bicheng, Ma Hanlin, Liu Hai

School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology,

Xuzhou, Jiangsu 221116, China

Abstract A new photonic crystal fiber sensor based on surface plasma resonance (SPR) effect and defect coupling mechanism is proposed. Two air holes of photonic crystal fiber cladding in the sensor are filled with magnetic fluid material. One hole is coated with metallic thin film on inner layer, and the diameter of the other hole is changed to form defect. By analyzing the relationship among refractive index, temperature and magnetic field of magnetic fluid, the simultaneous measurement for temperature and magnetic field can be achieved. Results show that the coupling resonance peak and the SPR loss peak are blue shifted as temperature increasing and red shifted as magnetic field increasing. The temperature sensitivity of the coupling resonance peak and the SPR loss peak can reach $-1.338 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ and $-1.575 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ respectively, and the magnetic field sensitivity of them are $4.333 \mu\text{m}/\text{T}$ and $2.816 \mu\text{m}/\text{T}$ respectively. The proposed sensor not only has a high sensitivity, but also can achieve accurate measurement for magnetic field and temperature.

Key words sensors; photonic crystal fiber; surface plasma resonance; mode coupling; fiber sensing

OCIS codes 060.2370; 120.0280; 120.4630

1 引 言

表面等离子体共振 (SPR) 作为一种独特的物理光学现象^[1], 在传感领域得到了广泛应用^[2-4]。近年来,

收稿日期: 2016-10-20; 收到修改稿日期: 2016-12-04

基金项目: 国家自然科学基金(51404268)、高等学校博士学科点专项科研基金(20130095120020)、江苏省普通高校专业学位论文研究生实践创新计划(SJZZ16_0278)

作者简介: 朱晟晁(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: 986164135@qq.com

导师简介: 刘 海(1983—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事光纤光栅传感、光子晶体光纤方面的研究。

E-mail: lhust_hust@hotmail.com(通信联系人)

光子晶体光纤(PCF)引起了广泛关注,它的结构设计灵活多变,有利于 SPR 技术的发展^[5-6]。基于 SPR 效应的 PCF 传感器具有可调谐范围宽、灵敏度高、温度稳定性好等一系列优良特性^[7-8]。2014 年,Dash 等^[9]设计了基于 SPR 的石墨烯 PCF 传感器,其灵敏度达 4×10^{-5} RIU/nm。Zhao 等^[10-11]设计了 PCF-SPR 传感器,通过检测填充物折射率的变化来分析待测物质,灵敏度可分别达到 7040 nm/RIU 和 7017 nm/RIU。2016 年,Wang 等^[12]设计了一种 D 形 PCF-SPR 折射率传感器,灵敏度达到 12450 nm/RIU。同年,Akouwah 等^[13]设计了一种双金属结构的 PCF-SPR 传感器,灵敏度达到 3200 nm/RIU。目前,基于 SPR 效应的 PCF 传感器主要用于单一参量的传感检测,对于双参量或多参量的研究相对较少,且动态检测范围也需要进一步拓展。基于 PCF 中的包层空气孔结构,在空气孔中填充不同的功能材料,可实现不同传感量的同时测量。2016 年,刘剑飞等^[14]仅通过磁流体填充设计了一种 PCF 磁场/温度传感器,灵敏度可分别达到 -0.279 dB/°C 和 0.06 dB/°C。同年,施伟华等^[15]在 PCF 中引入定向耦合,实现了磁场和温度的同时测量,灵敏度可分别达到 -3.86 nm/°C 和 1.10 nm/°C。

本文提出了一种基于 SPR 效应和缺陷耦合的 PCF 磁场/温度传感器。在满足耦合条件时,能量在两模式间发生周期性转移^[16-17],利用缺陷耦合效应可拓宽传感检测范围。为了解决温度场和磁场的交叉敏感问题,设计了两个单独的传感通道,分别位于垂直方向第二层空气孔的上下两侧。两个通道中均填充磁流体,上方的空气孔内镀金纳米薄膜,同时改变下方空气孔的尺寸以形成缺陷。当特定波长的光波进入光纤时,分别会引起 SPR 效应和缺陷耦合,表现为限制损耗的突变,且波峰的位置会受到填充磁流体折射率的影响。实验数据表明,在特定的温度和磁场范围内,温度、磁场均能与磁流体的折射率保持较好的线性关系。通过分析两种不同效应引起的损耗峰漂移,实现对温度和磁场的同时测量,该方法可行且所设计的传感器结构比较简单。

2 理论与方法

在光子晶体的包层空气孔中引入 SPR 传感通道和缺陷,并在空气孔中填充磁流体,进而形成 SPR 损耗峰和耦合谐振峰,且随着磁流体折射率的改变,损耗峰对应的谐振波长会发生漂移,利用这种特性可以实现温度和磁场的传感,实验装置示意图如图 1(a)所示。研究了 Y 方向的偏振特性,宽带光源经耦合器后分光,通过偏振控制器(PC)滤除 X 方向的光波,最后由光谱分析仪(OSA)得到模型结构温度和磁场的响应特性。基于 SPR 效应和定向耦合的 PCF 截面结构如图 1(b)所示,图中光子晶体的周期为 Λ ,中间两个特定空气孔的直径为 d_2 ,其余空气孔的直径为 d_1 ,金纳米薄膜厚度为 t ,SPR 传感通道的直径为 d_3 ,缺陷耦合通道的直径为 d_4 。在均匀对称排列的正六边形空气孔包层中引入大小不同的空气孔,大空气孔的引入可以降低基模的有效折射率。在垂直方向上的两个小空气孔中填充磁流体材料,在上方空气孔内表面镀金纳米薄膜,并将其作为激发 SPR 的传感通道。

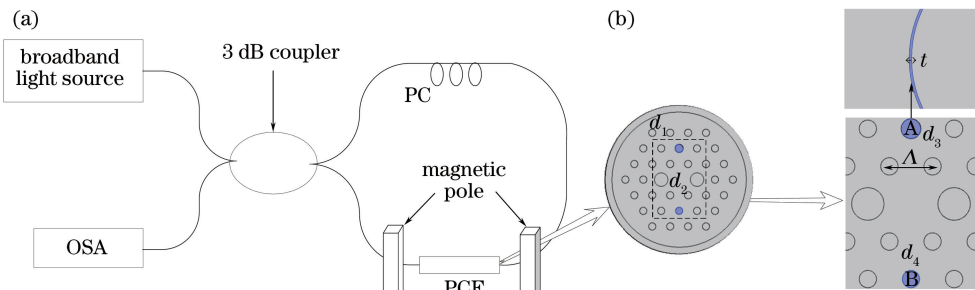


图 1 (a) PCF 传感系统结构示意图;(b) PCF 截面结构

Fig. 1 (a) Structural diagram of PCF sensing system; (b) cross section of PCF

光波在光子晶体中的传播遵循麦克斯韦方程,根据麦克斯韦方程推导出亥姆霍兹方程为

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times E) - k_0^2 \epsilon_r E = 0, \quad (1)$$

$$\nabla \times (\epsilon_r^{-1} \nabla \times H) - k_0^2 \mu_r H = 0, \quad (2)$$

式中 ∇ 为哈密顿算子, μ_r 和 ϵ_r 分别为相对磁导率张量和相对介电常量, k_0 为真空中的波数, E 和 H 表示电场强度和磁场强度。利用有限元法求解(1)、(2)式,得到光波在 PCF 中的模场分布和模式有效折射率 n_{eff} 。

限制损耗是影响 PCF 损耗的主要因素,PCF 的限制损耗 α_{CL} 可以通过模式有效折射率的虚部得到:

$$\alpha_{CL} = \frac{20}{\ln 10} \times \frac{2\pi}{\lambda} \times \text{Im}(n_{\text{eff}}), \quad (3)$$

式中 λ 为光在真空中的波长, $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 为有效折射率的虚部。

两种模式耦合时,耦合模方程可表示为

$$\frac{dE_1}{dz} = -i\beta_1 E_1 + ik_{12} E_2, \quad (4)$$

$$\frac{dE_2}{dz} = -i\beta_2 E_2 + ik_{21} E_1, \quad (5)$$

式中 β_1 和 β_2 分别为模式 1 和模式 2 的传播常数; k_{21} 和 k_{12} 为模式耦合系数; E_1 和 E_2 分别为两种模式下的电场强度, $E_1 = A_1 \exp(-i\beta_1 z)$, $E_2 = A_2 \exp(-i\beta_2 z)$, 其中 A_1 、 A_2 为两种模式下电场强度的幅值。将 E_1 、 E_2 代入(4)、(5)式,可得

$$\frac{dA_1}{dz} = ik_{12} A_2 \exp[-i(\beta_2 - \beta_1)z], \quad (6)$$

$$\frac{dA_2}{dz} = ik_{21} A_1 \exp[i(\beta_2 - \beta_1)z]. \quad (7)$$

一般地,对于 PCF 传感,光源由纤芯入射,初始条件可设为 $A_1(0) = A(0)$, $A_2(0) = 0$,将初始条件代入(6)、(7)式并求解微分方程,得到两种模式下的归一化能量分别为

$$P_1(z) = \frac{|A_1(z)|^2}{|A(0)|^2} = \frac{k_{12} k_{21}}{q^2} \cos^2(qz) + \frac{\delta^2}{q^2}, \quad (8)$$

$$P_2(z) = \frac{|A_2(z)|^2}{|A(0)|^2} = \frac{|k_{21}|^2}{q^2} \sin^2(qz), \quad (9)$$

式中 $q = (k_{12} k_{21} + \delta^2)^{1/2}$, $\delta = (\beta_2 - \beta_1)/2$ 。当两种模式的有效折射率相等($n_{1\text{eff}} = n_{2\text{eff}}$)时,即 $\delta = 0$,耦合系数 $k_{12} = k_{21}$,此时 $P_1(z) = 1 - \sin^2(qz)$ 、 $P_2(z) = \sin^2(qz)$,两种模式完全耦合,能量随着传播距离的增加在两通道中周期性转移。从能量损耗方面来看,这种能量的转移表现为模式 1 的限制损耗 α_{CL1} 或 $\text{Im}(n_{1\text{eff}})$ 在相位匹配点处达到最大,模式 2 的限制损耗 α_{CL2} 或 $\text{Im}(n_{2\text{eff}})$ 在相位匹配点处达到最小。

在完美匹配层下得到的模式的有效折射率为复数,在相位匹配点处, $\text{Im}(n_{1\text{eff}}) = \text{Im}(n_{2\text{eff}})$ 时,激发模式完全耦合,两种模式的限制损耗几乎相等。缺陷模和基模耦合时为完全耦合,缺陷模和基模在 C 点达到相位匹配条件,基模限制损耗 α_{CL1} 在相位匹配点处达到最大,缺陷模限制损耗 α_{CL2} 在相位匹配点处达到最小。同样,在相位匹配点处,当 $\text{Im}(n_{1\text{eff}}) \neq \text{Im}(n_{2\text{eff}})$,激发模式不完全耦合,两种模式下的限制损耗不相等,但仍会在相位匹配点处激发相应的损耗波峰和损耗波谷。模型中表面等离子激元(SPP)模和基模耦合时为不完全耦合,在相位匹配点处,基模出现损耗波峰,SPP 模出现损耗波谷,SPP 模损耗极大,由于部分能量被金属薄膜吸收后激发出 SPP,这种因 SPR 引起的能量共振不符合能量周期性转移规律。

3 结果与分析

选用模型的晶格周期 $\Lambda = 8 \mu\text{m}$,空气孔直径 $d_1 = 0.4\Lambda$,水平位置第一层两个大空气孔的直径 $d_2 = 6 \mu\text{m}$,缺陷耦合通道的直径 $d_3 = 2.8 \mu\text{m}$,SPR 传感通道的直径 $d_4 = 3.6 \mu\text{m}$,金纳米薄膜的厚度 $t = 40 \text{ nm}$,金的介电常数(折射率)可由 Drude^[18]模型给出:

$$\epsilon_{\text{Au}}(\omega) = \epsilon_{\infty} - \omega_p^2 / (\omega^2 + i\omega\omega_{\tau}), \quad (10)$$

式中 ω 为入射光的角频率, $\omega = 2\pi c/\lambda$, c 为真空中的光速; ϵ_{∞} 为无限频率的介电常数, $\epsilon_{\infty} = 9.75$; ω_p 为金的等离子体共振频率, $\omega_p = 1.36 \times 10^{16} \text{ rad/s}$; ω_{τ} 为碰撞频率, $\omega_{\tau} = 1.45 \times 10^{14} \text{ rad/s}$ 。此外,光纤基底材料为石英玻璃,其在通光波长(λ)为 $0.2 \sim 4 \mu\text{m}$ 范围内的折射率(n)可根据 Sellmeier 方程^[19]进行计算:

$$n^2 = 1 + \sum \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - A_i}, \quad (11)$$

式中 A_i 为色散系数。

从磁流体薄膜的微结构来看,可以将磁流体的磁性颗粒排成链状结构。纳米磁性颗粒在没有磁场的情况下呈现为一种无序的、随机的热运动状态,在这种状态下,光可以稳定通过。当有外加磁场时,磁性颗粒将产生 Brownian 和 Neel 旋转,形成平行于磁场方向的一个长链。随着外磁场强度的增加,磁性颗粒逐渐形成链结构,然后趋于饱和。磁场平行于薄膜平面时,当磁场强度超过临界磁场强度后,磁性颗粒在薄膜内部形成了一系列的簇状物,进而形成柱状物。在平行磁场作用的情况下,磁流体内部形成的链状结构要比垂直于薄膜表面时多^[20]。将浓度为 1.8%(原子分数)的水基四氧化三铁作为磁流体样品。如图 2 所示,该样品的折射率和温度具有较好的线性关系,曲线拟合度为 0.9887,折射率温度系数为 -8.02×10^{-5} 。外加磁场后(磁场方向平行于光路方向),当磁感应强度 B 在 $0 \sim 60$ mT 范围内时, n 与 B 具有较好的线性关系,曲线拟合度为 0.9779,折射率磁感应强度系数为 3.4187×10^{-4} ;磁感应强度大于 60 mT 后,材料的折射率变化缓慢,折射率的改变量约为 0.01885^[21]。对于浓度一定的磁流体,可以使用郎之万函数描述磁场强度、温度与折射率的关系:

$$n_{MF} = (n_s - n_0) \left[\cosh\left(\alpha \frac{H - H_{cn}}{T}\right) - \frac{\alpha T}{H - H_{cn}} \right] + n_0, \quad H > H_{cn}, \quad (12)$$

式中 n_{MF} 为磁流体的折射率, n_0 为临界磁场的折射率, n_s 为饱和磁场的折射率, H 为外加磁场强度, H_{cn} 为临界磁场强度, T 为热力学温度, α 为拟合参数。将郎之万函数的计算结果与文献中的实验数据进行比较,得到磁流体折射率与磁感应强度、温度的关系为

$$\Delta n_{filler} = 3.4187 \times 10^{-4} \Delta B - 8.02 \times 10^{-5} \Delta T, \quad (13)$$

式中 Δn_{filler} 为磁流体折射率的变化量, ΔB 为外加磁感应强度的变化量, ΔT 为温度的变化量。

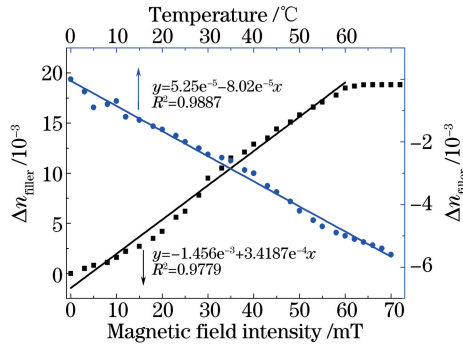


图 2 磁流体折射率与温度、磁场强度的关系

Fig. 2 Relationship among refractive index of magnetic liquid, temperature and magnetic field intensity

3.1 结构参数对传感特性的影响

PCF 的结构参数对谐振波长的影响较大,主要影响因素包括空气孔直径 d_1 、金纳米薄膜厚度 t 、SPR 传感通道的直径 d_3 和缺陷耦合通道直径 d_4 。如图 3(a)所示,随着空气孔直径的增大,SPR 损耗峰值减小,谐振波长出现红移。空气孔直径的增大会加强纤芯区域对能量的束缚能力,并使基模的有效折射率减小,导致共振波长处的损耗减弱,而 SPP 模的色散特性不变,所以基模与 SPP 模的相位匹配点发生红移。图 3(b)表

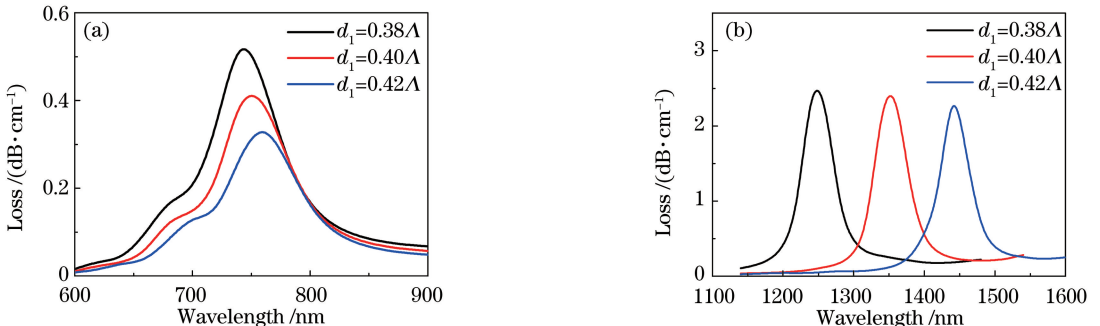


图 3 (a) SPR 效应和(b)缺陷耦合下基模损耗随空气孔直径和波长的变化

Fig. 3 Variations of fundamental mode loss with air hole diameter and wavelength under (a) SPR effect and (b) defect coupling

明随着空气孔直径的增大,基模与缺陷模的耦合中心波长发生红移,出现该现象的原因是基模与缺陷模的相位匹配点向短波长方向发生了移动。

金纳米薄膜厚度 t 对 SPR 效应的影响如图 4 所示。保持其他参量不变,当薄膜厚度 t 分别为 30, 40, 50 nm 时,SPR 的共振峰逐渐红移,波峰峰值变弱,出现该现象的主要原因是金纳米薄膜厚度的改变使 SPP 模的有效折射率发生改变,而芯模的有效折射率不会变化,从而使得二者的交点位置发生移动,导致 SPR 损耗峰移动。由于倏逝波和 SPP 在垂直于传播方向的衰减很快,当金纳米薄膜过厚时,SPR 的峰值将减小;而当金纳米薄膜过薄时,薄膜处倏逝场的能量将很弱,对 SPR 的激发不利,因此镀膜厚度以 30~50 nm 为宜^[22],综合考虑峰值位置和高度,选择金纳米薄膜的厚度为 40 nm。

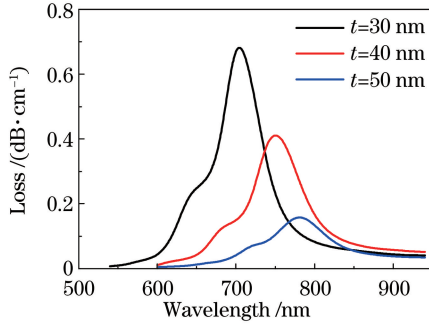


图 4 不同金纳米薄膜厚度下的基模损耗曲线

Fig. 4 Loss curves of fundamental mode with different thicknesses of gold nano-film

同理,分析了 d_3 、 d_4 对 PCF 谐振特性的影响。从图 5 中可以看出,SPR 传感通道 A 的大小对基模损耗峰有影响,当 d_3 增大时,损耗峰红移;同样地,当 d_4 增大时,损耗峰也红移。经优化比较,选择 $d_3 = 2.8 \mu\text{m}$ 和 $d_4 = 3.6 \mu\text{m}$ 。

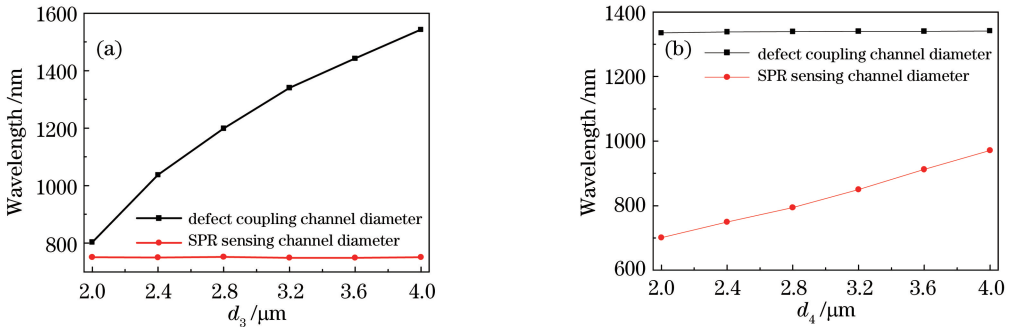


图 5 基模损耗峰对应的波长随(a)缺陷耦合通道直径和(b) SPR 传感通道直径的变化

Fig. 5 Variations of wavelength corresponding to fundamental mode loss peak with (a) defect coupling channel diameter and (b) SPR sensing channel diameter

3.2 结果与分析

采用全矢量有限元法和完美匹配层边界条件^[23]进行数值仿真,分析了基于 SPR 和缺陷耦合的 PCF 传感器。不失一般性,以 Y 方向为例,当温度 $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ 、外界磁感应强度 $B = 0 \text{ mT}$ 、磁流体折射率为 1.3418 时,Y 方向上不同模式的有效折射率如图 6、7 所示。结果表明,在特定波长下,缺陷模、SPP 模的有效折射率实部分别与基模相交,且交点处基模的限制损耗达到最大值,SPR 模与缺陷模的限制损耗达到最小值,交点对应的波长为谐振波长,C 点处两种模式同时存在,且发生了耦合。

缺陷耦合情况下及 SPR 效应下基模损耗随磁流体折射率和波长的变化如图 8 所示。当填充材料的折射率增大时,缺陷耦合下的损耗峰和 SPR 效应下的损耗峰均发生红移,其中缺陷耦合下损耗峰的红移量为 260 nm,SPR 损耗峰的红移量为 170 nm。磁流体的折射率不同时,两种效应的损耗峰灵敏度不同,从而为双参量解调提供了可能。

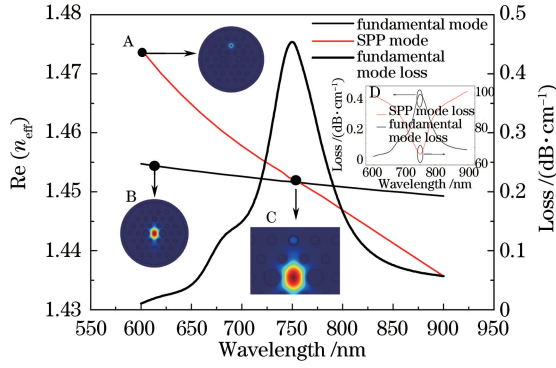


图 6 SPR 效应下基模的有效折射率实部、损耗以及 SPP 模的有效折射率实部随波长的变化。

插图 A 为 SPP 模在短波处的模场分布,插图 B 为基模在短波处的模场分布,插图 C 为 SPP 模和基模耦合时的模场分布,插图 D 为基模损耗和 SPP 模损耗随波长的变化

Fig. 6 Variations of real part of effective refractive index of fundamental mode, loss of fundamental mode and real part of effective refractive index of SPP mode with wavelength under SPP effect.

Illustration A shows mode field distribution of SPP mode at short wavelength, illustration B shows mode field distribution of fundamental mode at short wavelength, illustration C shows mode field distribution when SPP mode is coupled to fundamental mode, and illustration D shows relationship among fundamental mode loss, SPP mode loss and wavelength

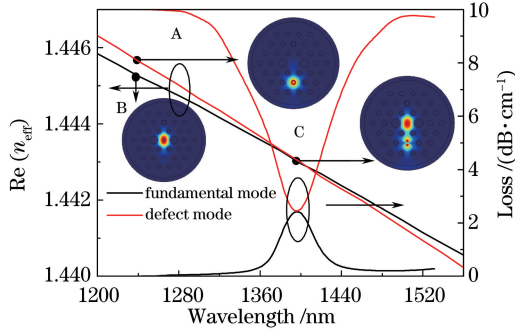


图 7 缺陷耦合情况下基模的有效折射率实部、损耗以及缺陷模的有效折射率实部随波长的变化。

插图 A 为缺陷模的模场分布,插图 B 为基模的模场分布,插图 C 为缺陷耦合时的模场分布

Fig. 7 Variations of real part of effective refractive index of fundamental mode, loss of fundamental mode and real part of effective refractive index of defect mode with wavelength under defect coupling.

Illustration A shows mode field distribution of defect mode, illustration B shows mode field distribution of fundamental mode, and illustration C shows mode field distribution under defect coupling

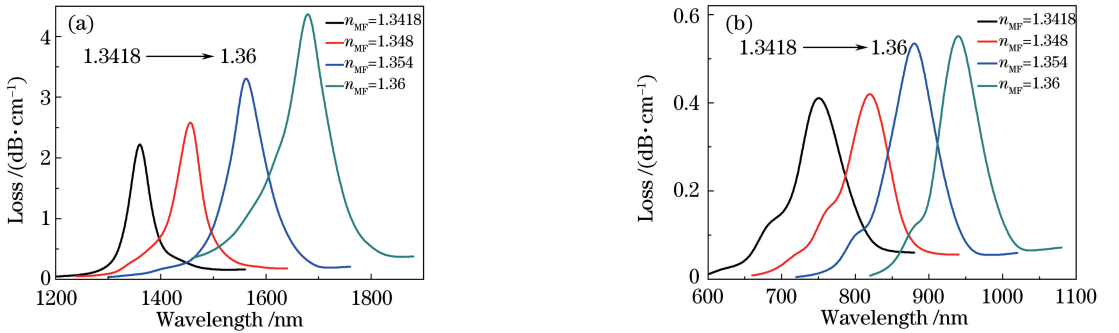


图 8 (a)缺陷耦合和(b) SPR 效应下基模损耗随磁流体折射率和波长的变化

Fig. 8 Variations in fundamental mode loss with refractive index of magnetic fluid and wavelength under (a) defect coupling and (b) SPR effect

基于上述研究,分别分析了温度和磁场对两种耦合机理中谐振波长的影响。其中,材料热光系数定义为 $\xi=(1/n)(\partial n/\partial T)$,热膨胀系数定义为 $\alpha=(1/\Lambda)(\partial \Lambda/\partial T)$,选择硅光纤基底, $\xi_{\text{SiO}_2}=8.3 \times 10^{-6}$, $\alpha_{\text{SiO}_2}=0.55 \times 10^{-6}$ 。磁感应强度为 0 mT 时,温度由 0 °C 增加到 100 °C 的过程中,缺陷耦合模和 SPR 效应下基模损耗随温度和波长的变化分别如图 9(a)、(b)所示。基模损耗峰的漂移量随温度的变化如图 9(c)所示,缺陷耦合和 SPR 下谐振波长的漂移灵敏度分别为 $-1.338 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 和 $-1.575 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。温度为 20 °C 时,缺陷耦合情况下和 SPR 效应下基模损耗随磁感应强度和波长的变化如图 10(a)、(b)所示。基模损耗峰随磁感应强度的变化如图 10(c)所示。缺陷耦合和 SPR 效应下的磁场灵敏度分别为 $4.333 \mu\text{m}/\text{T}$ 和 $2.816 \mu\text{m}/\text{T}$ 。

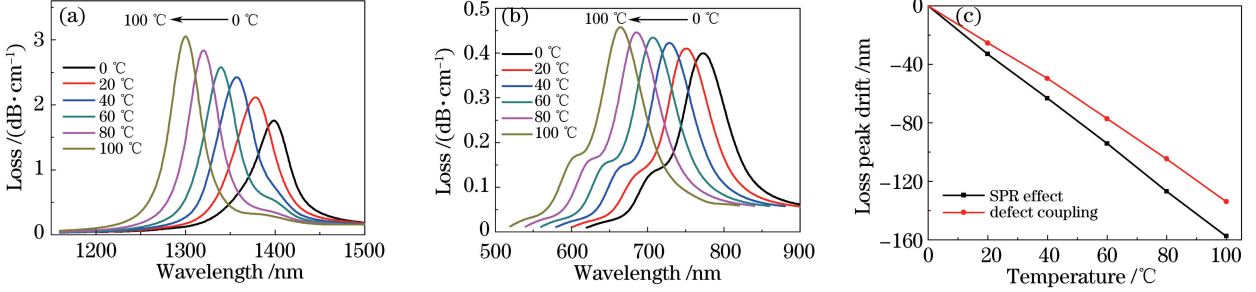


图 9 (a)缺陷耦合情况下基模损耗曲线随温度和波长的变化;(b) SPR 效应下基模损耗曲线随温度和波长的变化;
(c)基模损耗峰漂移量随温度的变化

Fig. 9 (a) Variation of fundamental mode loss with temperature and wavelength under defect coupling;
(b) variation of fundamental mode loss with temperature and wavelength under SPR effect;
(c) variation of fundamental mode loss peak drift with temperature

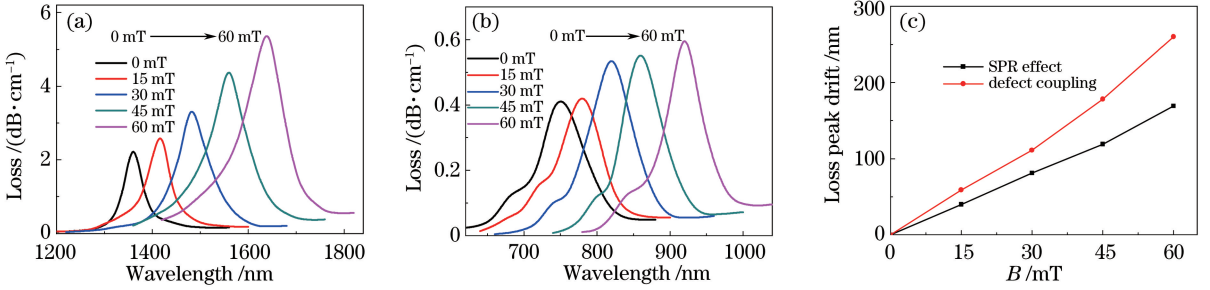


图 10 (a)缺陷耦合情况下基模损耗随磁感应强度和波长的变化;(b) SPR 效应下基模损耗随磁感应强度和波长的变化;
(c)基模损耗峰漂移量随磁感应强度的变化

Fig. 10 (a) Variation of fundamental mode loss with magnetic induction intensity and wavelength under defect coupling;
(b) variation of fundamental mode loss with magnetic induction intensity and wavelength under SPR effect;
(c) variation of fundamental mode loss peak drift with magnetic induction intensity

由图 9(c)和图 10(c)可以看出,温度-波长变化曲线与磁感应强度-波长变化曲线具有良好的线性关系。根据双波长解调原则,可直接解调出磁感应强度和温度:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \\ k_3 & k_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta B \\ \Delta T \end{bmatrix}, \quad (14)$$

式中 $\Delta\lambda_1$ 为缺陷损耗峰的漂移量, $\Delta\lambda_2$ 为 SPR 损耗峰的漂移量, k_1, k_2, k_3, k_4 为双参量解调矩阵中的 4 个系数。将拟合得到的温度灵敏度和磁场灵敏度代入矩阵中,计算得到

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.333 & -1.338 \\ 2.816 & -1.575 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta B \\ \Delta T \end{bmatrix}. \quad (15)$$

定义一个二维参数 $(T / ^\circ\text{C}, B / \text{mT})$ 描述外部环境,随机选取 $(20 \text{ } ^\circ\text{C}, 10 \text{ mT})$ 作为初始状态,选取 $(40 \text{ } ^\circ\text{C}, 30 \text{ mT})$ 作为末状态。由图 11 可知,这两个点对应的损耗峰漂移量分别为 $\Delta\lambda_1=59.95 \text{ nm}$ 和 $\Delta\lambda_2=24.71 \text{ nm}$,将(15)式左乘系数矩阵的逆矩阵并整理可得

$$\begin{bmatrix} \Delta B \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \\ k_3 & k_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5153 & -0.4377 \\ 0.9213 & -1.4176 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

根据(16)式,得到 $\Delta B=20.07$ mT, $\Delta T=20.21$ °C,与实际相符。

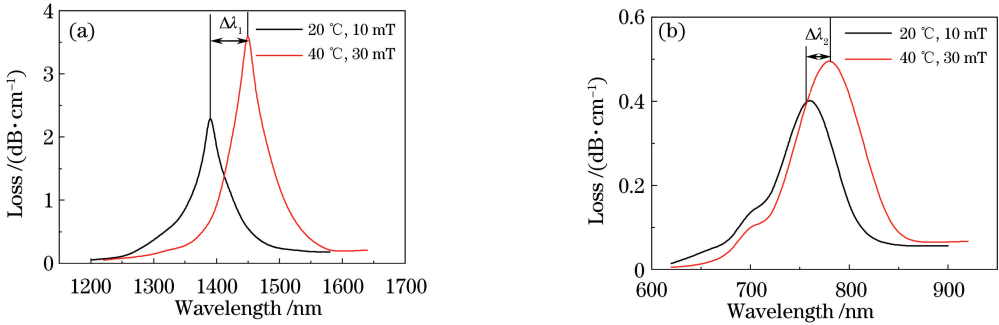


图 11 (a) 缺陷损耗随波长的变化;(b) SPR 损耗随波长的变化

Fig. 11 (a) Variation of defect loss with wavelength; (b) variation of SPR loss with wavelength

4 结 论

提出了一种基于 SPR 效应和缺陷耦合的 PCF 磁场/温度传感器,采用全矢量有限元法对其传感特性进行了研究。基于缺陷耦合和 SPR 效应的传感器的温度灵敏度分别为 -1.338 nm/°C 和 -1.575 nm/°C,磁场灵敏度分别达到 4.333 μm/T 和 2.816 μm/T。实验结果表明,提出的基于 SPR 效应和缺陷耦合的 PCF 双参数测量方案切实可行,且传感器的结构简单,灵敏度较高。

参 考 文 献

- [1] Hassani A, Skorobogatiy M. Photonic crystal fiber-based plasmonic sensors for the detection of biolayer thickness[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2009, 26(8): 1550-1557.
- [2] Maier S A. Plasmonics: Fundamentals and applications[M]. New York: Springer, 2007.
- [3] Yan Shousheng. Elements of solid state physics[M]. Beijing: Peking University Press, 2011: 13-20.
阎守胜. 固体物理基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 2011: 13-20.
- [4] Dressel M, Grüner G. Electrodynamics of solids: Optical properties of electrons in matter[M]. Cambridge: New York Cambridge University Press, 2002: 93-106.
- [5] Cui Danning. Analyse the transmission characteristics of novel dual-core photonic crystal fiber[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2014.
崔丹宁. 新型双芯结构的光子晶体光纤传输特性研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2014.
- [6] Ju J, Wang Z, Jin W, et al. Temperature sensitivity of a two-mode photonic crystal fiber interferometric sensor[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(20): 2168-2170.
- [7] Shin W, Lee Y L, Yu B A, et al. Highly sensitive strain and bending sensor based on in-line fiber Mach-Zehnder interferometer in solid core large mode area photonic crystal fiber[J]. Optics Communications, 2010, 283(10): 2097-2101.
- [8] Gao R, Jiang Y, Abdelaziz S. All-fiber magnetic field sensors based on magnetic fluid-filled photonic crystal fibers[J]. Optics Letters, 2013, 38(9): 1539-1541.
- [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] Zhao Y, Deng Z Q, Li J. Photonic crystal fiber based surface plasmon resonance chemical sensors[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2014, 202: 557-567.
- [11] Fan Z K, Li S G, Liu Q, et al. High sensitivity of refractive index sensor based on analyte-filled photonic crystal fiber with surface plasmon resonance[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(3): 15194073.
- [12] Wang G Y, Li S G, An G W, et al. Highly sensitive D-shaped photonic crystal fiber biological sensors based on surface plasmon resonance[J]. Optical and Quantum Electronics, 2016, 48(1): 1-9.
- [13] Akowuah E K, Gorman T, Ademgil H, et al. A highly sensitive photonic crystal fibre (PCF) surface plasmon

- resonance (SPR) sensor based on a bimetallic structure of gold and silver[C]. IEEE ICASST, 2012: 121-125.
- [14] Liu Jianfei, Liu Fan, Zeng Xiangye, *et al.* Sensing characteristics of photonic crystal fiber filled with magnetic fluid[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(7):070601.
刘剑飞, 刘帆, 曾祥焯, 等. 基于磁流体填充的光子晶体光纤传感特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(7): 070601.
- [15] Shi Weihua, You Chengjie. Study on high sensitivity magnetic field and temperature sensor of photonic crystal fiber based on directional coupling[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0706004.
施伟华, 尤承杰. 基于定向耦合的光子晶体光纤高灵敏度磁场、温度传感器[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0706004.
- [16] Li Peng, Zhao Jianlin, Zhang Xiaojuan, *et al.* Analysis of model coupling in photonic crystal fiber with triangular structure triple-core[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(12): 8625-8631.
李鹏, 赵建林, 张晓娟, 等. 三角结构三芯光子晶体光纤中的模式耦合特性分析[J]. 物理学报, 2010, 59(12): 8625-8631.
- [17] Wu D K C, Lee K J, Pureur V, *et al.* Performance of refractive index sensors based on directional couplers in photonic crystal fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(22): 3500-3510.
- [18] Hassani A, Skorobogatiy M. Design criteria for microstructured-optical-fiber-based surface-plasmon-resonance sensors[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2007, 24(6): 1423-1429.
- [19] Akowuah E K, Gorman T, Ademgil H, *et al.* Numerical analysis of a photonic crystal fiber for biosensing applications[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2012, 48(11): 1403-1410.
- [20] Sun Changjun. Investigation of the magnetic fluids magnetic-optical properties [D]. Shantou: Shantou University, 2009.
孙长军. 磁流体磁光特性的研究[D]. 汕头: 汕头大学, 2009.
- [21] Zhao Y, Wu D, Lü R Q, *et al.* Tunable characteristics and mechanism analysis of the magnetic fluid refractive index with applied magnetic field[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(8): 4600205.
- [22] Steel M J, Osgood R M. Elliptical-hole photonic crystal fibers[J]. Optics Letters, 2001, 26(4): 229-231.
- [23] Saitoh K, Koshiba M. Full-vectorial imaginary-distance beam propagation method based on a finite element scheme: Application to photonic crystal fibers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2002, 38(7): 927-933.