

基于表面等离子体共振的双芯光子晶体 光纤横向应力传感器

吕健滔^{1, 2}, 王春明^{2*}, 朱晟昇³, 刘 海³

¹佛山科学技术学院物理与光电工程学院, 广东 佛山 528000;

²华中科技大学材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430074;

³中国矿业大学信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221116

摘要 基于表面等离子体共振(SPR)效应,设计了一种采用双芯结构光子晶体光纤(PCF)作为光波导的横向应力传感器。通过建立 SPR 耦合波模型和 PCF 结构的形变模型,利用全矢量有限元法进行数值模拟,获得了基模共振峰的偏移量与横向应力的关系。结果表明共振峰波长的偏移量与所施加应力具有很好的线性关系。对 PCF 的截面结构进行优化设计,通过选择适当的空气孔层数、直径和周期,可获得较高的测量灵敏度。该研究可为基于 SPR 的 PCF 横向应力传感器的设计提供理论依据。

关键词 传感器; 表面等离子体共振; 光子晶体光纤; 应力

中图分类号 TN25 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0828002

Dual-Core Photonic Crystal Fiber Transverse-Stress Sensor Based on Surface Plasmon Resonance

Lü Jiantao^{1,2}, Wang Chunming², Zhu Chenghao³, Liu Hai³

¹ School of Physics and Optoelectronic Engineering, Foshan University, Foshan, Guangdong 528000, China;

² School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;

³ School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China

Abstract A new kind of transverse-stress sensor which uses photonic crystal fiber (PCF) with dual-core structure as an optical waveguide is designed based on the surface plasmon resonance (SPR) effect. The relationship between the shift of the fundamental mode resonance peak and the transverse-stress is obtained when we build the model of the SPR coupled wave and the deformation model of the PCF structure by the vector finite element method. Results show that the wavelength shift of the resonance peak is linear with the added stress. A high measurement sensitivity is obtained when the optimal design for the cross section structure of PCF, and the number of layers, the diameter and the period of air holes are selected. This study can provide theoretical guidance for the design of PCF transverse-stress sensor based on SPR.

Key words sensors; surface plasmon resonance; photonic crystal fiber; stress

OCIS codes 280.4788; 240.6680; 060.5295

1 引 言

表面等离子体激元(SPP)是金属表面自由电子与入射光子相互作用所形成的一种电磁模式。若选择适

收稿日期: 2017-03-08; 收到修改稿日期: 2017-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(51404268)

作者简介: 吕健滔(1980—),男,博士,副教授,主要从事光电子学与非线性光学方面的研究。

E-mail: keentle@gmail.com

* 通信联系人。E-mail: cmwang@mail.hust.edu.cn

当的入射光波长和入射角,使 SPP 与倏逝波的频率相等,就会产生表面等离子体共振 (SPR) 效应^[1-4]。当 SPR 效应产生时,入射光被强烈吸收,反射光或透射光的能量急剧下降,并在反射光谱中出现相应的共振吸收峰。共振吸收峰的位置对金属表面附近的介质折射率变化非常敏感,因此可以利用 SPR 效应制作各类传感器。

传统的 SPR 传感器一般采用 Kretschmann 结构^[5],即利用入射光在耦合棱镜边界全反射所产生的倏逝波激发金属膜和待测物界面的 SPP。棱镜结构的 SPR 传感器难以实现小型化与远距离遥感的要求,正逐步被光纤结构的 SPR 传感器所替代^[6]。然而,尽管光纤 SPR 传感器具有结构简单、灵敏度高和抗干扰等优点,但也存在耦合损耗大、保偏性差等缺点,因此限制了其性能的进一步提高。近年来,光子晶体光纤 (PCF) 技术发展迅速,利用化学方法在 PCF 的空气孔内壁沉积一层金属薄膜,并使纤芯的泄漏模和金属膜附近的等离子体模式相互耦合,从而实现共振。若将待测物质填充在镀有金属膜的空气孔中,通过分析传输光的频谱变化即可测量待测材料的特性^[7-11]。与普通光纤 SPR 传感器相比,基于 PCF 的 SPR 传感器通过灵活多变的结构设计可实现纤芯模式与表面等离子体模式的有效匹配,并具有模场面积大及调谐范围宽等一系列优良特性。基于上述 PCF 结构的 SPR 传感器一般用于气体检测、折射率检测和温度检测等,其检测原理为:当待测物理量改变时,激发 SPR 的条件也相应发生变化,通过对波长、强度和相位等进行检测即可获得待测物理量的变化。

本文提出一种基于 SPR 的双芯 PCF 横向应力传感器,其测量原理是 PCF 受到横向应力时会发生形变,从而改变光波入射到金属界面的角度,并导致 SPR 共振峰的偏移;通过测量共振峰的偏移量,利用 SPR 耦合波模型和基于材料力学的光纤形变模型可获得所施加应力的大小。采用双芯结构的目的是提供一个参考通道,在实际应用中可消除温度等因素的影响。数值模拟结果表明,在一定的应力范围内,SPR 基模共振峰的偏移量与所施加应力具有很好的线性关系,通过一定的优化设计,可获得较高的测量灵敏度。

2 理论模型

基于 SPR 的双芯 PCF 横向应力传感器的横截面结构示意图如图 1 所示。PCF 采用的是上下各 5 层小空气孔、中间一层是大空气孔的结构,其中大孔和小孔的直径分别为 d_1 和 d_2 ,晶格周期分别为 Λ_1 和 Λ_2 。由图 1 可以看出,大、小空气孔的堆积结构在 PCF 内部形成两个芯层,定义位于 PCF 中心位置的芯层为芯一,另外一个芯层为芯二。这里主要研究芯一的基模共振峰随横向应力的偏移特性,将芯二作为一个参考通道。在实际应用中通过相减的方式消除其他因素的影响,以提高测量精度,或者可以同时测量除应力以外的其他物理量以实现双参数解调。为了在 PCF 中激发出 SPR 效应,可在芯层附近的空气孔内壁镀上一层金属膜^[12],这里采用厚度为 40 nm 的金膜。为了保证 SPR 激发条件的一致性,芯二附近的空气孔直径与中间的大孔相同,镀膜的空气孔示意图如图 1 中左图所示。应力沿大孔排列方向 (x 方向) 加载,由于大孔的排列方向与应力加载方向相同,可以将应力集中在纤芯附近镀金膜的大孔上,沿 x 方向加载应力的形变比沿 y 方向加载应力的形变大。

光波在 PCF 中的传播遵循麦克斯韦方程,由此推导出亥姆霍兹方程为

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

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

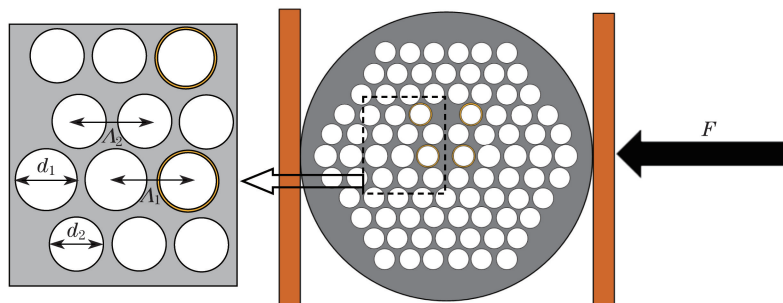


图 1 基于 SPR 的双芯 PCF 横向应力传感器横截面结构示意图

Fig. 1 Diagram of cross section structure of dual-core PCF transverse-stress sensor based on SPR

式中 μ_r 和 ϵ_r 分别为相对磁导率和相对介电常数, k_0 为真空中的波数, \mathbf{E} 和 \mathbf{H} 分别为电场和磁场。求解(1)、(2)式可得到光波在 PCF 的模场分布和有效折射率 n_{eff} 。影响 PCF 损耗的主要因素是限制损耗,其表达式为

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

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。

由倏逝波理论可知,在发生全反射现象时,光波并非直接反射回光密媒质,而是渗透到光疏媒质,并激发出 SPP。当入射光波在 PCF 纤芯内以全反射的形式传输时,其全反射的倏逝波将穿透包层到达金属膜表面并激发出 SPP,当纤芯模式沿金属界面方向的波矢分量与 SPP 的波矢相等时就会发生 SPR。当 PCF 中纤芯导模沿金属表面的波矢分量 k_x 与金属-电介质面的 SPP 本征波矢 k_{spp} 满足波矢匹配时,有

$$k_x = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_0(\omega)} \sin \theta = k_{\text{spp}} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2(\omega)}{\epsilon_1 + \epsilon_2(\omega)}}, \quad (4)$$

式中 $\omega = 2\pi c/\lambda$ 为光波角频率, c 为光速, $\epsilon_0(\omega)$ 为纤芯介电常数, θ 为光波入射到金属-电介质界面的角度, ϵ_1 为介质的介电常数, $\epsilon_2(\omega)$ 为金属膜的介电常数。当满足波矢匹配条件时,有

$$\sin \theta_{\text{res}} = \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2(\omega)}{\epsilon_0(\omega) [\epsilon_1 + \epsilon_2(\omega)]}}, \quad (5)$$

式中 θ_{res} 为共振条件下入射光的角度。当发生 SPR 时,共振角度与纤芯模的介电常数、金属的介电常数以及空气孔介质的介电常数有关,而纤芯模和金属的介电常数与光波角频率有关,因此,当镀膜空气孔因受力发生形变时,共振条件下入射光的角度将被改变,若满足共振条件则会导致 SPR 共振峰的运动。因此,可以基于 PCF 受力形变与共振峰位置的关系进行模拟,并由共振峰的偏移量得到横向应力的大小。

选择的沉积金属材料为金,其折射率可由 Drude 模型给出^[13],其介电常数可表示为

$$\epsilon_{\text{Au}}(\omega) = \epsilon_{\infty} - \omega_p^2 / (\omega^2 + i\omega\omega_{\tau}), \quad (6)$$

式中 $\epsilon_{\text{Au}}(\omega)$ 为金的介电常数, ϵ_{∞} 为无限频率的介电常数($\epsilon_{\infty} = 9.75$), $\omega_p = 1.36 \times 10^{16} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 为金的等离体共振频率, $\omega_{\tau} = 1.45 \times 10^{14} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 为碰撞频率。此外,光纤基底材料为石英玻璃,在通光波长 $0.2 \sim 4.0 \mu\text{m}$ 的范围内可以根据 Sellmeier 方程^[14]计算得到其折射率,即

$$n^2 = 1 + \sum \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - A_i}, \quad (7)$$

式中 A_i 为色散系数。对 PCF 的形变进行建模时,由材料力学原理可知,直径为 d 的光纤内任一点 $M(x, y)$ 的横向应力为

$$\sigma_x(x, y) = \frac{-2F}{\pi L} \left\{ \frac{x^2(D/2 + y)}{[x^2 + (D/2 + y)^2]^2} + \frac{x^2(D/2 - y)}{[x^2 + (D/2 - y)^2]^2} - \frac{1}{D} \right\}, \quad (8)$$

$$\sigma_y(x, y) = \frac{-2F}{\pi L} \left\{ \frac{(D/2 + y)^3}{[x^2 + (D/2 + y)^2]^2} + \frac{(D/2 - y)^3}{[x^2 + (D/2 - y)^2]^2} - \frac{1}{D} \right\}, \quad (9)$$

式中 D 为光纤直径, F 为光纤光栅横向受力, L 为光纤长度。假设光纤的轴向应力为 σ_z ,由(9)、(10)式可得光纤在 x, y, z 方向的应变分别为

$$\begin{cases} \epsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \epsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)], \\ \epsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \end{cases} \quad (10)$$

式中 E 为光纤材料的杨氏模量, ν 为泊松系数。对于这里所采用的石英玻璃材料,有 $E = 72 \text{ GPa}$, $\nu = 0.17$ 。

3 结果与分析

对于所设计的应力传感器,其测量原理是通过建立 PCF 受力形变与共振峰波长的关系,由共振峰的偏移量得到横向应力的 大小 。由 PCF 结构的 SPR 模型可知,光纤的横截面形变越大,共振峰的偏移量就越大。根据材料力学的形变模型,在一定的横向应力作用下可通过改变 PCF 的结构参数来获得更大的形变量。这里首先分析光纤结构参数对形变的影响,通过优化参数以获得较大的形变量,然后分析共振峰的偏移量与横向应力的关系。

3.1 结构参数对形变的影响及优化

首先分析空气孔层数的影响,分别选择 3~7 层空气孔结构进行研究。图 2 为当施加的力 $F=3\text{ N}$ 时不同空气孔层数的 PCF 在 x 方向的形变量。可以看出:随着层数的增加,纤芯附近的形变量逐渐增大;当层数大于 5 层时,形变量无明显增加。考虑到制作工艺误差及成本等问题,这里选择 5 层空气孔作为 PCF 横截面的基本结构。PCF 横截面的结构参数主要包括大孔和小孔的直径 d_1 和 d_2 ,以及相应的晶格周期 Λ_1 和 Λ_2 。其中,大孔晶格周期 Λ_1 无论变大或变小都会导致空气孔相交,因此这里保持 Λ_1 不变。按照单变量跟踪原则,分别单独改变 d_1 、 d_2 和 Λ_2 ,并研究横截面的形变情况。由于施加的力较小,横截面的形变可以简化为 x 方向和 y 方向的位移。数值模拟结果表明,当施加一定的横向压力时,光纤横截面不同位置的形变量有很大差异,形变量在圆周区域最大,并向纤芯区域递减,因此不同位置空气孔的形变量不同。这里主要讨论芯一附近两个镀金大孔的形变情况,下面所给出的 x 方向和 y 方向的形变量是指芯一附近镀金大孔的形变量。

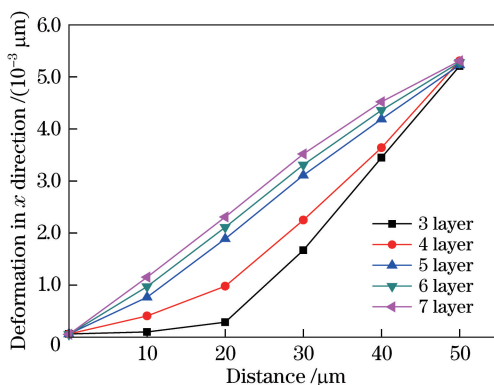


图 2 $F=3\text{ N}$ 时不同空气孔层数的 PCF 在 x 方向的形变量

Fig. 2 Deformation in x direction for different air hole layers of PCF when $F=3\text{ N}$

采用全矢量有限元法(FEM)和完美匹配层(PML)边界条件对基于 SPR 的 PCF 应力传感器进行数值仿真与分析。图 3 为在保持其他参量不变的情况下,不同大孔直径下的形变量的变化。

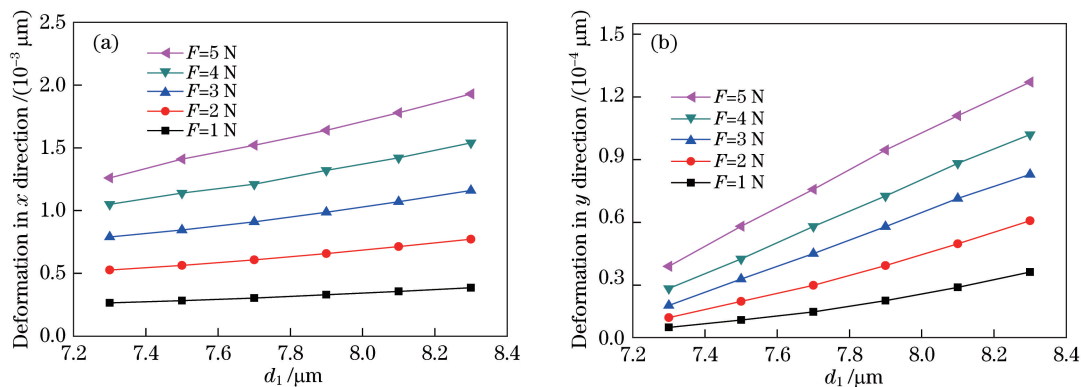


图 3 不同大孔直径下的形变量的变化。(a) x 方向;(b) y 方向

Fig. 3 Change of deformation under different diameters of big hole. (a) x direction; (b) y direction

选择 d_1 的范围为 $7.3\sim 8.3\ \mu\text{m}$, 间隔为 $0.2\ \mu\text{m}$, 分别计算镀金大孔附近区域在 x 方向和 y 方向的形变量。选择在 x 方向施加横向压力 ($0\sim 5\ \text{N}$), PCF 在 x 方向所产生的形变量远大于 y 方向的。随着大孔直径 d_1 逐渐增大, x 方向和 y 方向的形变量都随之增大, 并与孔径的变化呈较好的线性关系。进一步分析可以看出, 对于每个确定的大孔直径 d_1 , 形变量与所加压力基本呈线性关系, 表明该结构有利于传感应用。因此, 在一定的应力范围内, 如果要获得更大的形变量, 则应尽量增大大孔直径。对于所研究的 PCF 结构, 选择 $d_1=8.3\ \mu\text{m}$ 可获得最大的形变量。

同样地, 研究小孔直径 d_2 和小孔晶格周期 Λ_2 对形变量的影响。当单独改变小孔直径 d_2 时 (选择 d_2 为 $6.26\sim 7.06\ \mu\text{m}$, 间隔为 $0.2\ \mu\text{m}$), 不同小孔直径下的形变量的变化如图 4 所示。可以看出, 随着小孔直径 d_2 的增大, x 方向和 y 方向的形变量都呈现出上升的趋势, 而且 x 方向的形变量比 y 方向的大一个数量级。然而, 两个方向的形变量与小孔直径之间并非呈线性关系。对于 x 方向, 随着 d_2 的增大, 形变量增大得更快; 而对于 y 方向, 当 d_2 超过一定值后, 形变量的增大明显具有增速减缓的趋势。根据所讨论的小孔直径的尺度, 选择 $d_2=7.06\ \mu\text{m}$ 可获得最大的形变量。当改变小孔晶格周期 Λ_2 时, x 方向和 y 方向的形变量随着 Λ_2 的增大而减小, 如图 5 所示。由于光纤横截面尺寸的限制, 选择 Λ_2 为 $8.15\sim 8.55\ \mu\text{m}$, 间隔为 $0.1\ \mu\text{m}$ 。由图 5 可以看出, 当 $\Lambda_2=8.15\ \mu\text{m}$ 时, x 方向和 y 方向的形变量最大。

综上, 在一定的应力范围内, 通过改变光纤光栅的结构参数可以改变镀金膜孔附近的形变量。如果要获得更大的形变量, 则需选择更大的大孔直径 d_1 和小孔直径 d_2 , 并选择更小的小孔晶格周期 Λ_2 。

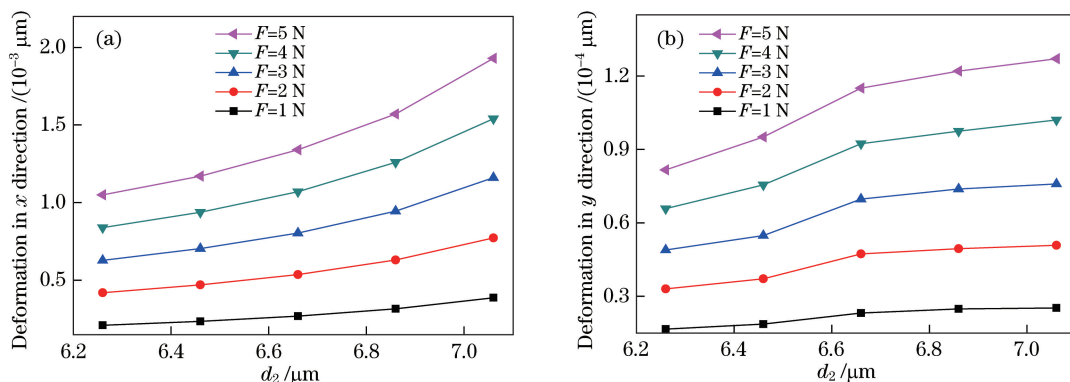


图 4 不同小孔直径下的形变量的变化。(a) x 方向; (b) y 方向

Fig. 4 Change of deformation under different diameters of small hole. (a) x direction; (b) y direction

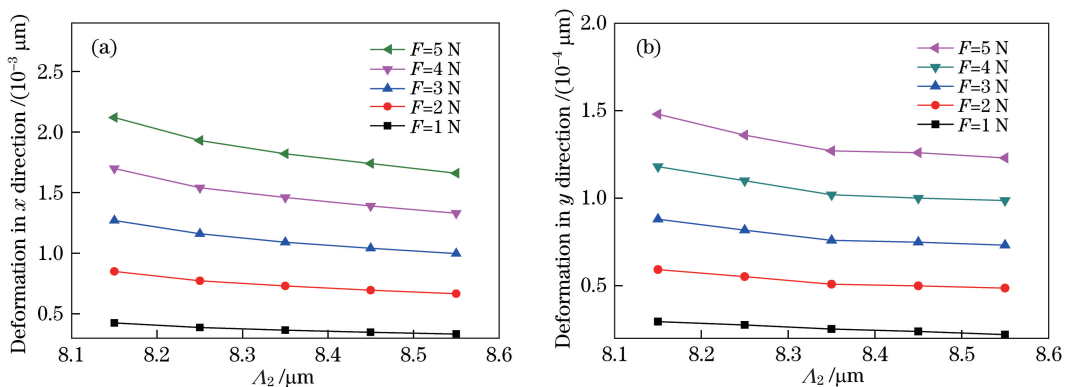


图 5 不同小孔晶格周期下的形变量的变化。(a) x 方向; (b) y 方向

Fig. 5 Change of deformation under different lattice periods of small hole. (a) x direction; (b) y direction

3.2 共振峰偏移与横向应力的关系

根据第 3.1 节的结论, 选择一组可获得较大形变量的结构参数: 大孔直径 $d_1=8.3\ \mu\text{m}$, 小孔直径 $d_2=7.06\ \mu\text{m}$, 大孔晶格周期 $\Lambda_1=8.68\ \mu\text{m}$, 小孔晶格周期 $\Lambda_2=8.15\ \mu\text{m}$ 。图 6(a) 为在上述结构参数下, 不同横向应力所产生的基模损耗。可以看出, 随着所施加应力的增大, 损耗峰值向短波长方向移动。图 6(b) 为

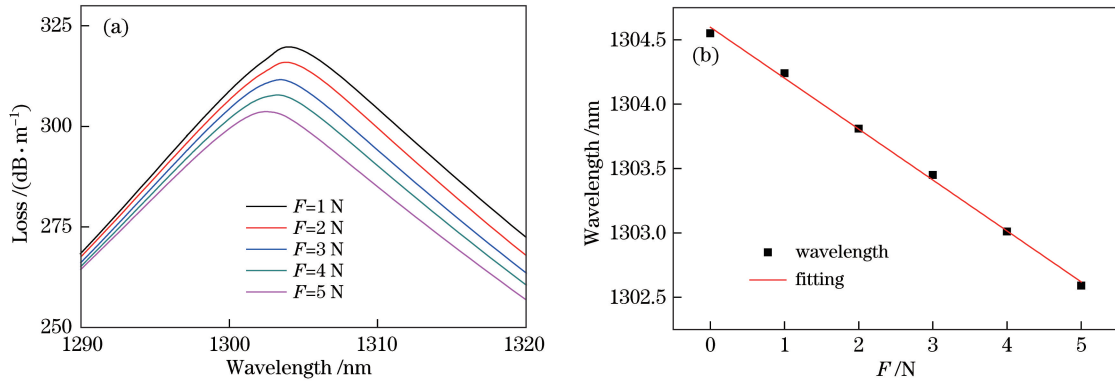


图 6 (a)不同横向应力下的基模损耗;(b)共振峰波长与横向应力的关系
($d_1=8.3 \mu\text{m}$, $d_2=7.06 \mu\text{m}$, $\Lambda_1=8.68 \mu\text{m}$, $\Lambda_2=8.15 \mu\text{m}$)

Fig. 6 (a) Loss of fundamental mode under different transverse stresses; (b) relationship between wavelength of resonance peak and transverse stress ($d_1=8.3 \mu\text{m}$, $d_2=7.06 \mu\text{m}$, $\Lambda_1=8.68 \mu\text{m}$, $\Lambda_2=8.15 \mu\text{m}$)

共振峰波长与横向应力的关系及其拟合曲线。结果表明,峰值波长与所加应力之间有很好的线性关系,通过线性拟合得到其拟合度为 0.9972。定义 SPR 应力传感器的灵敏度 $S_n = \delta\lambda / \delta N$, 其中 $\delta\lambda$ 为峰值波长的偏移量, δN 为 x 方向施加的应力,在上述结构参数下得到的应力传感器的灵敏度为 0.392 nm/N。

作为对比,选择另外一组结构参数:大孔直径 $d_1=7.3 \mu\text{m}$,小孔直径 $d_2=6.26 \mu\text{m}$,大孔晶格周期 $\Lambda_1=8.68 \mu\text{m}$,小孔晶格周期 $\Lambda_2=8.55 \mu\text{m}$ 。由上述分析可知,该参数组合会得到较小的形变量。图 7(a)为该组结构参数下不同横向应力产生的基模损耗,图 7(b)为共振峰波长与横向应力的关系及其拟合曲线。与图 6 进行对比可以看出,在相同的横向应力情况下,该组结构参数所产生的共振峰偏移量明显减小,但峰值波长与所加横向应力仍保持很好的线性关系(线性拟合度为 0.9944)。由图 7(b)可以得到该组结构参数下应力传感器的灵敏度为 0.162 nm/N。

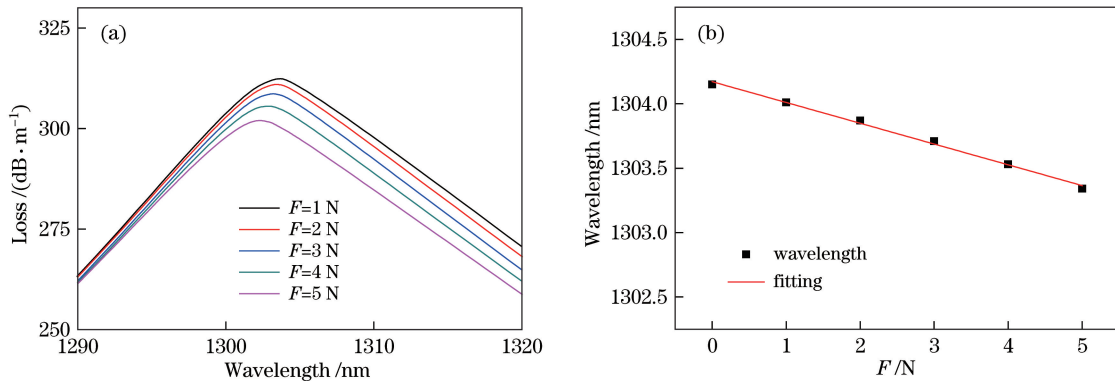


图 7 (a)不同横向应力下的基模损耗;(b)共振峰波长与横向应力的关系
($d_1=7.3 \mu\text{m}$, $d_2=6.26 \mu\text{m}$, $\Lambda_1=8.68 \mu\text{m}$, $\Lambda_2=8.55 \mu\text{m}$)

Fig. 7 (a) Loss of fundamental mode under different transverse stresses; (b) relationship between wavelength of resonance peak and transverse stress ($d_1=7.3 \mu\text{m}$, $d_2=6.26 \mu\text{m}$, $\Lambda_1=8.68 \mu\text{m}$, $\Lambda_2=8.55 \mu\text{m}$)

由上述两组参数的模拟结果可以看出,通过优化结构参数可以增大光纤横截面的形变量,从而增大基模共振峰波长的偏移量,即提高了应力传感器的灵敏度。在一定的应力范围内(0~5 N),传感器具有很好的线性度,因此该传感器比较适用于某些应力较小场合的测量。

4 结 论

设计了一种基于 SPR 效应的双芯结构 PCF 横向应力传感器,通过建立 SPR 耦合波模型和 PCF 结构的形变模型,并利用全矢量有限元法进行数值模拟,获得了基模共振峰的偏移量与横向应力的关系。结果表

明,通过对 PCF 的截面结构进行优化设计,并选择适当的空气孔层数、空气孔直径和晶格周期,可获得较大的形变量,从而提高测量灵敏度。共振峰波长的偏移量与所施加的应力之间具有很好的线性关系。所得结论可为基于 SPR 效应的 PCF 横向应力传感器的设计提供理论依据。

参 考 文 献

- [1] Maier S A. Plasmonics: Fundamentals and applications[M]. New York: Springer, 2007.
- [2] Ritchie R H. Plasma losses by fast electrons in thin films[J]. Physical Review, 1957, 106(5): 874-881.
- [3] Powell C J, Swan J B. Effect of oxidation on the characteristic loss spectra of aluminum and magnesium[J]. Physical Review, 1960, 118(3): 640-643.
- [4] Stern E A, Ferrell R A. Surface plasma oscillations of a degenerate electron gas[J]. Physical Review, 1960, 120(1): 130-136.
- [5] Kretschmann E. The determination of the optical constants of metals by excitation of surface plasmons[J]. Zeitschrift Für Physik A Hadrons and Nuclei, 1971, 241(4): 313-324.
- [6] Jorgenson R C, Yee S S. A fiber-optic chemical sensor based on surface plasmon resonance[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 1993, 12(3): 213-220.
- [7] Poulton C G, Schmidt M A, Pearce G J, *et al.* Numerical study of guided modes in arrays of metallic nanowires[J]. Optics Letters, 2007, 32(12): 1647-1649.
- [8] Hou J, Bird D, George A, *et al.* Metallic mode confinement in microstructured fibres[J]. Optics Express, 2008, 16(9): 5983-5990.
- [9] Schmidt M A, Sempere L N P, Tyagi H K, *et al.* Waveguiding and plasmon resonances in two-dimensional photonic lattices of gold and silver nanowires[J]. Physical Review B, 2008, 77(3): 033417.
- [10] Guan Chunying, Yuan Libo, Shi Jinhui. Microstructured-fiber surface plasmon resonance sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0206003.
关春颖, 苑立波, 史金辉. 微孔光纤表面等离子体共振传感特性分析[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0206003.
- [11] Shi Weihua, Wu Jing. Photonic crystal fiber sensor based on surface plasmonic and directional resonance coupling[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0206002.
施伟华, 吴 静. 基于表面等离子体共振和定向耦合的光子晶体光纤传感器[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0206002.
- [12] Zhang X, Wang R, Cox F M, *et al.* Selective coating of holes in microstructured optical fiber and its application to in-fiber absorptive polarizers[J]. Optics Express, 2007, 15(24): 16270-16278.
- [13] 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.
- [14] 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.