

激光与光电子学进展

基于二维光子晶体的电磁双参量传感的研究

施伟华*, 上官铭宇, 陈伟

南京邮电大学电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院, 江苏 南京 210023

摘要 提出一种基于二维光子晶体的镜像边腔耦合型电压和磁场强度双参量传感结构。在完整的光子晶体中通过空气孔的平移和尺寸改变引入缺陷, 分别形成 H0 腔和改进的 H1 腔这两种光子晶体微腔; 将 H0 腔和改进的 H1 腔分别与 W1 波导进行边腔耦合, 并沿 W1 波导做镜像对称结构; 在微腔中分别填充液晶和磁流体作为敏感材料, 利用液晶的电光效应和磁流体的磁光效应形成电压和磁场强度的传感区域。由于光子晶体的光子局域特性, 上述镜像边腔耦合结构的透射谱中形成两个相对独立的透射峰, 通过测量两个透射峰的波长偏移量间接测量电压和磁场强度的变化。利用时域有限差分法, 在各向异性的完美匹配层边界条件下对传感特性进行数值研究。结果表明: 在电压范围分别为 14~32 V 和 32~50 V 时, 电压灵敏度分别为 0.65 nm/V 和 1.86 nm/V; 折射率灵敏度和品质因子在 14~50 V 的电压范围分别为 296 nm/RIU 和 3350, 在 10~40 mT 的磁场强度范围分别为 251 nm/RIU 和 2722, 且磁场强度灵敏度为 13.06 nm/mT。

关键词 遥感与传感器; 二维光子晶体; 电磁传感; 镜像式微腔; 灵敏度

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP213279

Study of Electromagnetic Dual Parameter Sensor Based on Two-Dimensional Photonic Crystal

Shi Weihua*, Shanguan Mingyu, Chen Wei

College of Electronic and Optical Engineering, College of Flexible Electronics (Future Technology),
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, Jiangsu, China

Abstract A symmetric side cavity coupling sensing structure based on two-dimensional photonic crystals is proposed for voltage and magnetic field strength sensing. In the complete photonic crystal, defects are introduced through the translation and size change of air holes, and two photonic crystal microcavities, H0 cavity and improved H1 cavity, are formed respectively; The H0 cavity and the improved H1 cavity are coupled with the W1 waveguide respectively, and the symmetrical structure is made along the W1 waveguide; The microcavity is filled with liquid crystal and magnetic fluid as sensitive materials, and the electro-optical effect of liquid crystal and the magneto-optical effect of magnetic fluid are used to form the sensing region of voltage and magnetic field intensity. Due to the photon localization characteristics of photonic crystals, two relatively independent transmission peaks are formed in the transmission spectrum of the side cavity coupling structure. The changes of voltage and magnetic field intensity are indirectly measured by measuring the wavelength offset of the two transmission peaks. The sensing characteristics are numerically studied under anisotropic perfectly matched layer boundary conditions using the finite-difference time-domain method. The simulation results reveal that the voltage sensitivity can reach 0.65 nm/V in the voltage range of 14–32 V and 1.86 nm/V in the voltage range of 32–50 V. In addition, the sensor demonstrates a refractive index sensitivity and quality factor of 296 nm/RIU and 3350 in the voltage range of 14–50 V and 251 nm/RIU and 2722 in the magnetic field strength range of 10–40 mT, respectively. And the magnetic field strength sensitivity is 13.06 nm/mT in the magnetic field strength range of 10–40 mT.

Key words remote sensing and sensors; two-dimensional photonic crystal; electromagnetic sensing; symmetric microcavity; sensitivity

1 引言

随着科学技术的发展,电磁环境几乎无处不在,尤

其是在电力传输、航空航天、国防、工业等领域,电磁检测对于设备正常运行、故障排查意义重大^[1]。传统的方法利用电学方法进行电磁测量,结构较为复杂、易受

收稿日期: 2021-12-20; 修回日期: 2022-01-14; 录用日期: 2022-01-20; 网络首发日期: 2022-01-29

基金项目: 国家自然科学基金(61571237, 61275067)

通信作者: *njupt_shiwh@126.com

外界环境影响、灵敏度较低。相比之下,光学方法具有抗电磁干扰、灵敏度高的特点,逐渐取代电学方法被应用于电磁传感中^[2-4]。

光子晶体具有光子带隙^[5]、光子局域^[6]等特性,通过在完整的光子晶体中引入缺陷可以形成光子晶体微腔,在透射光谱中出现透射峰,即产生一个透射率最小的峰值,透射峰峰值波长对微腔中介质折射率的变化十分敏感,因此作为光学传感的重要方法被广泛应用于温度传感^[7-8]、气体浓度传感^[9]、生物分子检测^[10-11]以及压力传感^[12]等领域。其中,二维光子晶体平板结构制备工艺简单,易于级联和集成,在实际传感应用中具有优势。根据二维光子晶体平板结构类型的不同,可分为缺陷腔传感结构^[13-15]、光波导传感结构^[16]以及异质结构微腔传感结构^[17]等。在实际应用过程中通常将多种传感结构运用到同一块光子晶体中。Dorfer等^[18]将L3型微腔与W1波导耦合,其折射率灵敏度为63 nm/RIU,品质因子为3000。Zhou等^[19]将H2型微腔与W1波导相耦合实现磁场传感,其折射率灵敏度为131.70 nm/RIU,品质因子为2966。Mohsenirad等^[20]将纳米微腔与双波导耦合,折射率灵敏度为83.75 nm/RIU,品质因子为3051。Rajasekar等^[21]设计了基于硅-钛酸钡二维光子晶体传感结构,并将H1型微腔与W1波导相耦合,折射率灵敏度为83.75 nm/RIU,品质因子为1420。

除了在上述领域的应用,光子晶体还可以实现对电磁的检测。Zhang等^[22]提出了电光聚合物填充光子晶体槽波导的电场测量装置。Su等^[23]在光子晶体中引入肩耦合纳米微腔,在微腔中填充磁流体(MF)实现对磁场传感。Zhao等^[24]则在纳米微腔中填充液晶(LC)完成电场检测。Ge等^[25]将MF膜覆盖在二维光子晶体平板微腔表面设计了一种新型磁场传感器。

Calero等^[26]将铌酸锂与光子晶体相结合,设计了一种全介质电场传感器。

然而,目前的研究大多针对电场或者磁场的单一参量的传感,而在实际应用中需要同时对电场和磁场参量进行检测。同时,对于二维光子晶体平板结构的灵敏度和品质因子仍有提升空间。

本文设计了一种基于二维光子晶体的镜像边腔耦合型电磁双参量传感结构,将H0腔和改进的H1腔分别与W1波导边腔耦合,并沿W1波导做镜像对称。同时,通过在两种微腔的传感区域分别填充LC和MF,利用电光效应和磁光效应实现对电压和磁场强度的双参量传感。

2 传感结构

本文设计的二维光子晶体的电磁传感结构如图1(a)所示。采用Si作为基底材料,在空气孔型三角晶格二维光子晶体中去除中间一排空气孔,形成W1波导, a 为空气孔间距, r 为空气孔半径。在二维光子晶体的右侧,将两个相邻的空气孔分别向两侧平移构成单边式H0腔与W1波导边腔耦合结构,以下简称单边H0腔结构, d_0 为两相邻空气孔反向移动距离,虚线框内部分为传感区域,用于填充敏感材料, N_0 为单边H0腔传感区域空气孔数量,局部放大图如图1(b)所示。再沿W1波导镜像,引入相同的结构单元,构成镜像式H0腔与W1波导边腔耦合结构,以下简称镜像H0腔结构。在二维光子晶体的左侧,去除一个空气孔形成H1微腔,然后在原有空气孔的位置添加一个半径较小的空气孔,空气孔半径为 r_1 ,调整 r_1 构成单边式改进的H1腔与W1波导边腔耦合结构,以下简称单边改进H1腔结构, N_1 为单边改进H1腔传感区域空气孔数量,局部放大图如图1(c)所示。

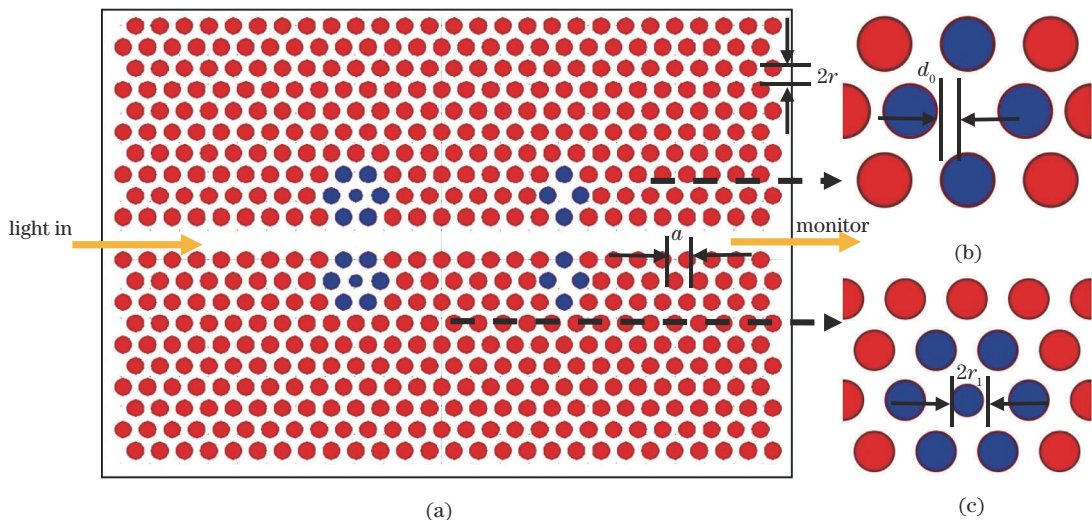


图1 结构图。(a) 基于二维光子晶体的镜像边腔耦合型电磁传感结构;(b) 局部放大的H0腔结构;(c) 局部放大的改进H1腔结构
Fig. 1 Structure diagram. (a) Electromagnetic sensing structure based on two-dimensional photonic crystal with symmetrical nanocavities; (b) structure of locally amplified H0 cavity; (c) structure of locally amplified improved H1 cavity

再沿 W1 波导镜像,引入相同的结构单元,构成镜像式改进的 H1 腔与 W1 波导边腔耦合结构,以下简称镜像改进 H1 腔结构。最终形成二维光子晶体的镜像边腔耦合型电磁传感结构。采用 TM 模的偏振光,从左侧沿波导入射,在波导右侧放置检测器,用于检测透射谱。

选取向列相液晶(NLC)作为电压敏感材料,填充到 H0 腔传感区域的空气孔内,当电压发生变化时,液晶分子方向角 θ 会发生改变^[27]:

$$\theta = \begin{cases} 0, & V \leq V_c \\ \frac{\pi}{2} - 2 \tan^{-1} \left[\exp\left(-\frac{V - V_c}{30V_c}\right) \right], & V > V_c \end{cases}, \quad (1)$$

式中, V_c 为阈值电压, $V_c = \pi \sqrt{\frac{K_{11}}{\epsilon_0 \Delta \epsilon}}$, 其中 K_{11} 为弗兰克弹性系数, ϵ_0 为自由空间介电常数, $\Delta \epsilon$ 为各向异性介电常数^[28]。由于液晶的电光效应,液晶折射率张量 n_{NLC} 会发生改变:

$$n_{\text{NLC}} = \begin{bmatrix} n_o & 0 & 0 \\ 0 & n_o & 0 \\ 0 & 0 & \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \sin^2 \theta + n_e^2 \cos^2 \theta}} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中, n_o 和 n_e 分别为寻常光和非寻常光的折射率。

选取质量分数为 1.8% 的水基 Fe_3O_4 作为 MF, 填充到 H1 腔传感区域的空气孔内, 由于 MF 的磁光效应, 当外界磁场和温度发生改变时, MF 的折射率也会随之改变, 用朗之万函数^[29]表示为

$$n_{\text{MF}}(H, T) = [n_s - n_o] \left[\cosh\left(\alpha \frac{H - H_{\text{cn}}}{T}\right) - \frac{T}{H - H_{\text{cn}}} \right] + n_o, \quad H > H_{\text{cn}}, \quad (3)$$

式中: α 为拟合参数; T 为热力学温度; H 为磁场强度; H_{cn} 为磁场强度的阈值; n_o 与 n_s 是与 MF 材料有关的常数, n_o 为在无外加磁场或磁场强度未达到阈值时 MF 的折射率, n_s 为磁场强度增大到一定程度趋于饱和时 MF 的折射率。

3 传感性能分析

本文使用时域有限差分软件 Lumerical-FDTD 在各向异性的完美匹配层边界条件下进行仿真计算, 设置晶格常数 $a = 420 \text{ nm}$, 占空比 $\Lambda = 0.3$, 空气孔半径 $r = 0.3a$, 平板厚度 $t = 220 \text{ nm}$ 。

3.1 传感原理

由于光子晶体的周期性排列结构, 当一束光波通过光子晶体波导时, 在垂直方向上, 光受到周期性布拉格散射形成能带结构, 即光子带隙, 特定频率的光波将无法沿着与 W1 波导垂直的方向上传播, 而只能沿水平方向传播, 并被检测器接收。通过引入镜像 H0 腔和镜像改进 H1 腔, 形成微腔与波导耦合结构, 此时与缺陷模式相对应频率的光波就会被局域,

在其原本平坦的透射谱中将会出现与点缺陷相对应的特定频率的透射峰。图 2 为电压为 14 V, 磁场强度为 10 mT, 温度为 20 °C 时, 基于二维光子晶体的镜像边腔耦合型电磁传感结构的透射谱图。左边为镜像 H0 腔结构对应的透射峰, 峰值波长为 1463 nm, 右边为镜像改进 H1 腔结构对应的透射峰, 峰值波长为 1540 nm。通过在微腔传感结构中选择性填充电场敏感材料和磁场敏感材料, 当电场和磁场发生变化时, 与点缺陷对应的特定频率的透射峰将发生漂移。通过检测透射峰的漂移量可实现对电磁场的检测。

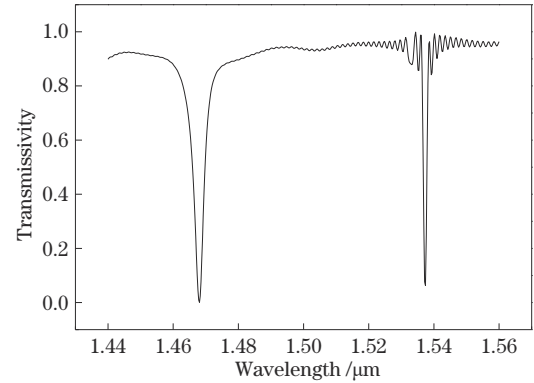


图 2 基于二维光子晶体的镜像边腔耦合型电磁传感结构透射谱图

Fig. 2 Transmission spectrum of symmetrical side cavity coupled electromagnetic sensing structure based on two-dimensional photonic crystal

3.2 结构优化

3.2.1 H0 腔

研究该传感结构中传感区空气孔数量 N_0 对折射率灵敏度 S_n 和品质因子 Q 的影响。折射率灵敏度 $S_n = \Delta \lambda / \Delta n$, 其中 $\Delta \lambda$ 表示透射峰峰值波长的变化量, Δn 表示传感结构所在环境中折射率的变化量。品质因子 $Q = \lambda_r / \lambda_{\text{FWHM}}$, 其中 λ_r 是透射峰峰值波长, λ_{FWHM} 是透射峰的半峰全宽。取 N_0 分别为 2, 4, 6。当 $N_0 = 2$ 和 4 时, 考虑在透射谱中获得单一透射峰, 取 d_0 移动范围为 $0.02a \sim 0.28a$ 。两者分别在 $d_0 = 0.16a$ 和 $0.02a$ 时 S_n 达到最大值 58 nm/RIU 和 222 nm/RIU; 在 $d_0 = 0.22a$ 和 $0.06a$ 时 Q 达到最大值 900 和 3389。当 $N_0 = 6$ 时, 透射谱中会形成多个透射峰, 不利于传感结构的检测。故选择传感区空气孔数量 $N_0 = 4$, 如图 1(b) 所示。

研究该传感结构中 d_0 对 S_n 和 Q 的影响, 同时对镜像 H0 腔结构和单边 H0 腔结构进行比较。考虑空气孔在周期性二维光子晶体中可移动的范围, 以及移动以后在透射谱中始终能够形成单一透射峰, 选择 d_0 的移动范围分别为 $0.06a \sim 0.16a$ 和 $0.02a \sim 0.12a$ 。图 3(a)、3(b) 分别为镜像 H0 腔结构和单边 H0 腔结构 λ_r 和 S_n 随 d_0 变化的规律图, 实线表示 λ_r 随 d_0 变化的规律曲线, 对应左边的纵坐标, 虚线表示 S_n 随 d_0 变化

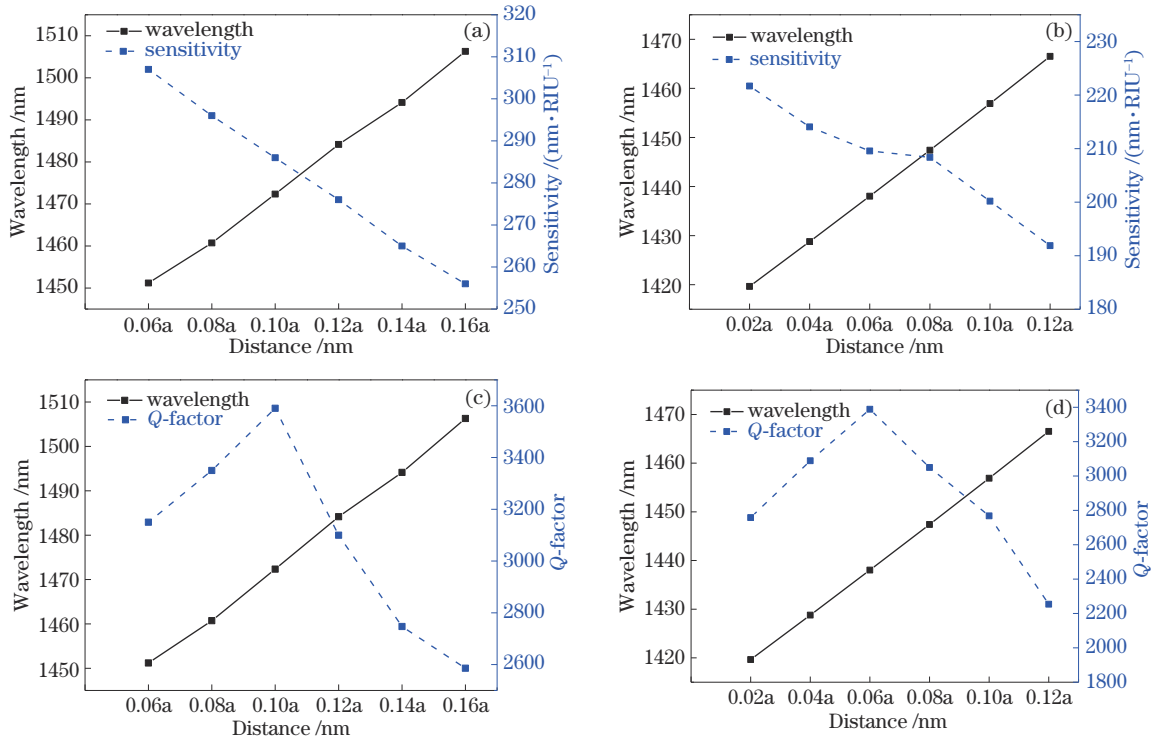


图 3 λ_r 、 S_n 和 Q 随 d_0 变化的规律图。(a) 镜像 H0 腔结构；(b) 单边 H0 腔结构；(c) 镜像 H0 腔结构；(d) 单边 H0 腔结构
Fig. 3 Variation of λ_r , S_n , and Q with d_0 . (a) Symmetrical H0 cavity structure; (b) unilateral H0 cavity structure; (c) symmetrical H0 cavity structure; (d) unilateral H0 cavity structure

的规律曲线,对应右边的纵坐标。图 3(c)、3(d) 分别为 λ_r 和 Q 随 d_0 变化的规律图,实线表示 λ_r 随 d_0 变化的规律曲线,对应左边的纵坐标,虚线表示 Q 随 d_0 变化的规律曲线,对应右边的纵坐标。两者分别在 $d_0=0.06a$ 和 $0.02a$ 时, S_n 达到最大值 307 nm/RIU 和 222 nm/RIU ; 在 $d_0=0.1a$ 和 $0.06a$ 时, Q 达到最大值 3590 和 3389 , 相比于单边 H0 腔结构, 镜像式 H0 腔结构折射率灵敏度提高约 1.5 倍且品质因子几乎保持不变。

综合考虑 S_n 和 Q 的变化趋势, 以及两个峰值波长可移动范围, 选择传感区空气孔数量 $N_0=4$ 、 $d_0=0.08a$ 时的结构作为镜像 H0 腔的优化结构, 相应的折射率灵敏度和品质因子分别为 296 nm/RIU 和 3350 。

3.2.2 改进的 H1 腔

研究该传感结构中传感区空气孔数量 N_1 对 S_n 和 Q 的影响, 取 N_1 分别为 1 和 7。考虑在透射谱中获得单一透射峰, 取 r_1 的移动范围分别为 $0.12a \sim 0.24a$ 和 $0.2a \sim 0.3a$, 两者分别在 $r_1=0.22a$ 和 $0.26a$ 时 S_n 达到最大值 77.2 nm/RIU 和 213.6 nm/RIU ; 在 $r_1=0.20a$ 和 $0.24a$ 时 Q 达到最大值为 1265 和 4207 。故选择传感区空气孔数量 $N_1=7$, 如图 1(c) 所示。

类似 H0 腔, 研究该传感结构中 r_1 对 S_n 和 Q 的影响, 同时对镜像改进 H1 腔结构和单边 H1 腔结构进行比较。选择 r_1 的变化范围为 $0.20a \sim 0.30a$ 。两者分别

在 $r_1=0.30a$ 和 $0.26a$ 时, S_n 达到最大值 318 nm/RIU 和 213.6 nm/RIU ; 在 $r_1=0.26a$ 和 $0.24a$ 时, Q 达到最大值 3678 和 4207 , 相比于单边改进 H1 腔结构, 镜像改进 H1 腔结构品质因子略微下降但折射率灵敏度提高 1.5 倍。

综合考虑 S_n 和 Q 的变化趋势, 以及两个峰值波长可移动范围, 选择传感区空气孔数量 $N_1=7$ 、 $r_1=0.20a$ 时的结构作为镜像改进 H1 腔的优化结构, 相应的折射率灵敏度和品质因子分别为 251 nm/RIU 和 2722 。

表 1 为本文结构与其他二维光子晶体平板结构的折射率灵敏度和品质因子的比较, 本文通过采用镜像微腔的结构, 在保证品质因子的基础上提高折射率灵敏度, 并同时引入镜像 H0 腔结构和镜像改进 H1 腔结构, 实现双参量传感。

3.3 电磁传感性能

在磁场强度固定, 且温度为 20°C 条件下, 改变外加电压变化范围为 $14 \sim 50 \text{ V}$, 其峰值波长随着外加电压变化的透射谱如图 4 所示。可以看出镜像 H0 腔结构传感区域的折射率变化不会影响到镜像改进 H1 腔结构, 且随着电压的增强, 镜像 H0 腔所对应的共振峰峰值波长产生红移, 逐渐向长波方向移动。如图 5 所示, 通过数值模拟仿真发现, 在电压范围为 $14 \sim 32 \text{ V}$ 和 $32 \sim 50 \text{ V}$ 时, 分别能与谐振波长产生较好的线性拟合, 线性拟合关系符合如下公式:

表 1 二维光子晶体平板结构比较

Table 1 Comparison of planar structures of two-dimensional photonic crystals

Reference	Type of device	Q-factor	Refractive index sensitivity $S_n / (\text{nm} \cdot \text{RIU}^{-1})$
[22]	L3 nanocavity and broadband W1 waveguide	3000	63.00
[23]	H2 nanocavity and broadband W1 waveguide	2966	131.70
[24]	A nanocavity and two photonic crystal waveguides	3051	83.75
[25]	A nanocavity and 2D photonic crystal waveguide	1420	133.33
Proposed	Improved H0 and H1 nanocavity symmetrical	3350	296.00
	along W1 waveguide	2722	251.00

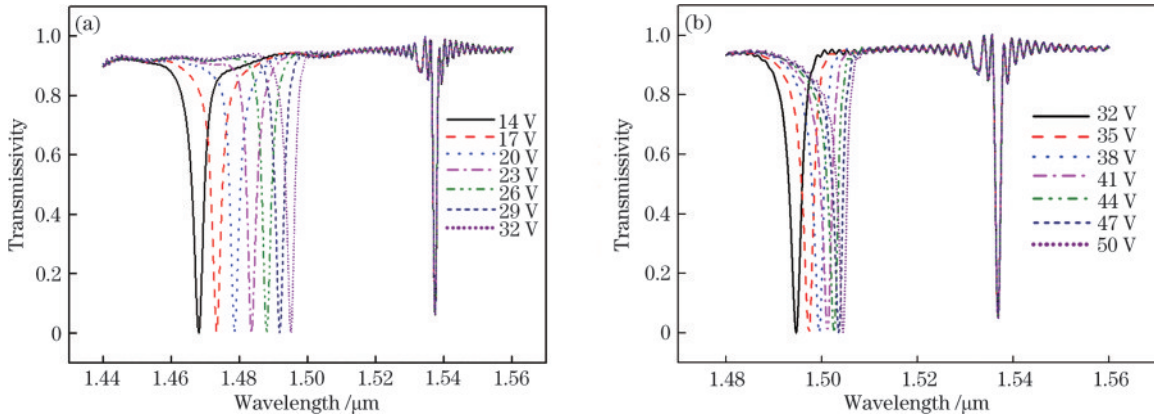


图 4 磁场强度固定时不同电压条件下的透射谱图。(a) 14~32 V; (b) 32~50 V

Fig. 4 Reflection spectra under different voltage conditions with fixed magnetic field strength. (a) 14~32 V; (b) 32~50 V

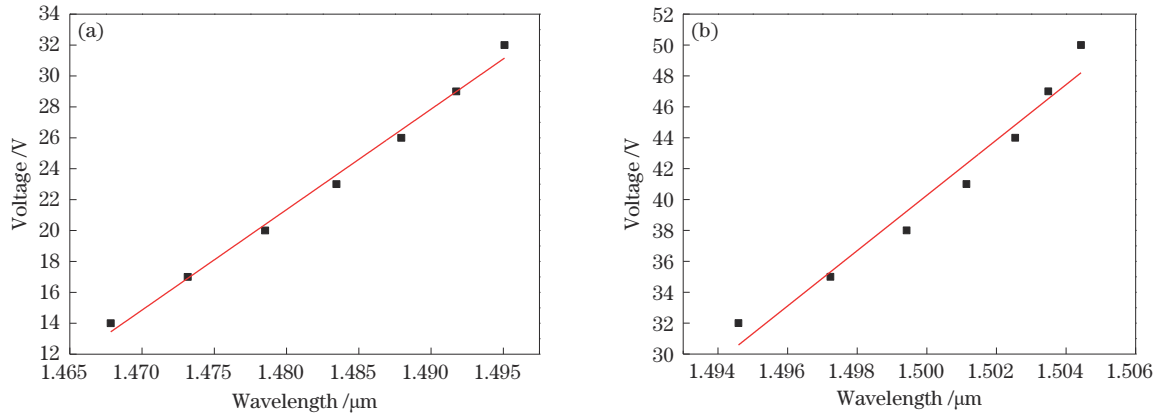


图 5 电压和波长线性拟合图。(a) 14~32 V; (b) 32~50 V

Fig. 5 Relationship between wavelength and voltage. (a) 14~32 V; (b) 32~50 V

$$y_1 = \begin{cases} 0.65\lambda_1 - 946.39, & 14\text{--}32 \text{ V} \\ 1.86\lambda_1 - 2741.92, & 32\text{--}50 \text{ V} \end{cases}, \quad (4)$$

式中： λ_1 表示与电压变化对应的透射峰峰值波长，单位为nm； y_1 表示外加电压，单位为V。电压灵敏度 $S_v = \Delta\lambda/\Delta U$ ，其中 $\Delta\lambda$ 表示透射峰峰值波长的变化量， ΔU 表示传感结构两侧的电压变化量。当电压范围为14~32 V时， $S_v=0.65 \text{ nm/V}$ ；当电压范围为32~50 V时， $S_v=1.86 \text{ nm/V}$ 。

在电压固定，温度为20℃条件下，改变外加磁场强度变化范围为10~40 mT。其峰值波长随着外加磁场强度变化的透射谱如图6(a)所示。并且镜像改进

H1腔结构传感区域的折射率发生变化不会影响到镜像H0腔结构，随着磁场强度的增强，镜像改进H1腔所对应的共振峰峰值波长产生小幅度红移，逐渐向长波方向移动。如图6(b)所示，通过数值模拟仿真，得到磁场强度和共振波长的线性拟合关系为

$$y_2 = 13.06\lambda_2 - 20072.38, \quad 10\text{--}40 \text{ mT}, \quad (5)$$

式中： λ_2 表示与磁场对应的透射峰峰值波长，单位为nm； y_2 表示外加磁场强度，单位为mT。磁场强度灵敏度 $S_m = \Delta\lambda/\Delta B$ ，其中 ΔB 表示磁场强度的变化量。当磁场强度范围为10~40 mT时， $S_m=13.06 \text{ nm/mT}$ 。

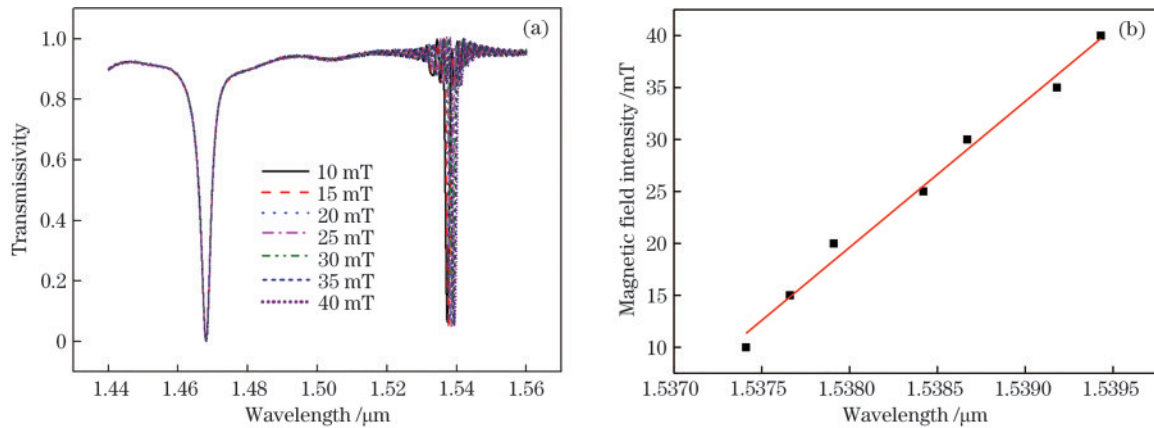


图6 磁场变化时结果图。(a) 电压大小固定时不同磁场强度条件下的透射谱图;(b) 磁场强度与波长的线性拟合图

Fig. 6 Results when magnetic field changes. (a) Reflection spectra under different magnetic field strength conditions with fixed voltage; (b) relationship between wavelength and magnetic field strength

4 结 论

设计并研究了基于二维光子晶体的镜像边腔耦合型电磁双参量传感结构。将H0腔和改进的H1腔分别与W1波导边腔耦合,并沿W1波导做镜像对称,在传感区域分别填充LC和MF,利用电光效应和磁光效应,实现了电压和磁场强度双参量传感。讨论了传感区域空气孔数量对传感性能的影响,并对比镜像边腔耦合结构和单边腔耦合结构,镜像边腔耦合结构在保证品质因子的基础上折射率灵敏度提高1.5倍。在14~50 V电压范围以及10~40 mT的磁场感应强度范围内,最高灵敏度分别可达1.86 nm/V及13.06 nm/mT,品质因子分别为3350和2722。所设计的基于二维光子晶体的镜像边腔耦合型双参量级联传感结构,利用H0腔和改进的H1腔级联,实现了电压和磁场强度的双参量传感,并通过镜像边腔耦合结构,在保证品质因子的基础上提高了折射率灵敏度,且具有结构简单、集成度高等优点,在电磁场传感领域有着广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Ferrero A. Measuring electric power quality: problems and perspectives[J]. Measurement, 2008, 41(2): 121-129.
- [2] Petridis C, Dimitropoulos P D, Hristoforou E. New magnetic field sensor based on combined flux-gate/hall-effect arrangement[J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9(2): 128-134.
- [3] Passaro V M N, Dell'Olio F, De Leonardis F. Electromagnetic field photonic sensors[J]. Progress in Quantum Electronics, 2006, 30(2/3): 45-73.
- [4] Peng J, Jia S H, Bian J M, et al. Recent progress on electromagnetic field measurement based on optical sensors[J]. Sensors, 2019, 19(13): 2860.
- [5] Abram I, Bourdon G. Photonic-well microcavities for spontaneous emission control[J]. Physical Review A, 1996, 54(4): 3476-3479.
- [6] Chen B, Tang T T, Chen H. Study on a compact flexible photonic crystal waveguide and its bends[J]. Optics Express, 2009, 17(7): 5033-5038.
- [7] 刘海, 白冰冰, 张砚曾, 等. 基于SPR效应的金-PDMS涂覆光子晶体光纤高灵敏度温度测量[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0404003.
Liu H, Bai B B, Zhang Y Z, et al. High-sensitivity temperature measurement based on SPR in gold-PDMS-coated photonic crystal fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0404003.
- [8] Qiu S, Yuan J H, Zhou X, et al. Highly sensitive temperature sensing based on all-solid cladding dual-core photonic crystal fiber filled with the toluene and ethanol [J]. Optics Communications, 2020, 477: 126357.
- [9] 张文, 白冰冰, 张砚曾, 等. 基于新型光子晶体光纤近红外波段的传感特性[J]. 中国激光, 2021, 48(7): 0706001.
Zhang W, Bai B B, Zhang Y Z, et al. Sensing characteristics of near-infrared band based on new photonic crystal fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(7): 0706001.
- [10] 范雨艳, 施伟华. 基于表面等离子体共振的光子晶体光纤生物传感[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(21): 2106003.
Fan Y Y, Shi W H. Photonic crystal fiber biosensors based on surface plasmon resonance[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(21): 2106003.
- [11] Hao J J, Gu K D, Xia L, et al. Research on low-temperature blood tissues detection biosensor based on one-dimensional superconducting photonic crystal[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2020, 89: 105299.
- [12] Zhang W, Lou S Q, Wang X, et al. Multi-function sensor based on rectangular-lattice photonic crystal fiber with high pressure sensitivity[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 310: 111987.
- [13] Tandaechanurat A, Iwamoto S, Nomura M, et al. Increase of Q-factor in photonic crystal H1-defect nanocavities after closing of photonic bandgap with optimal slab thickness[J]. Optics Express, 2008, 16(1): 448-455.

- [14] Yang D Q, Tian H P, Ji Y F. Nanoscale photonic crystal sensor arrays on monolithic substrates using side-coupled resonant cavity arrays[J]. *Optics Express*, 2011, 19(21): 20023-20034.
- [15] Chakravarty S, Zou Y, Lai W C, et al. Slow light engineering for high Q high sensitivity photonic crystal microcavity biosensors in silicon[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2012, 38(1): 170-176.
- [16] Zhang Y N, Zhao Y, Wu D, et al. Theoretical research on high sensitivity gas sensor due to slow light in slotted photonic crystal waveguide[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2012, 173: 505-509.
- [17] Song B S, Noda S, Asano T, et al. Ultra-high- Q photonic double-heterostructure nanocavity[J]. *Nature Materials*, 2005, 4(3): 207-210.
- [18] Dorfner D F, Hürlimann T, Zabel T, et al. Silicon photonic crystal nanostructures for refractive index sensing [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(18): 181103.
- [19] Zhou J, Tian H P, Yang D Q, et al. Integration of high transmittance photonic crystal H_2 nanocavity and broadband W1 waveguide for biosensing applications based on Silicon-on-Insulator substrate[J]. *Optics Communications*, 2014, 330: 175-183.
- [20] Mohsenirad H, Olyae S, Seifouri M. Design of a new two-dimensional optical biosensor using photonic crystal waveguides and a nanocavity[J]. *Photonics & Lasers in Medicine*, 2016, 5(1): 51-56.
- [21] Rajasekar R, Robinson S. Nano-electric field sensor based on two dimensional photonic crystal resonator[J]. *Optical Materials*, 2018, 85: 474-482.
- [22] Zhang X Y, Hosseini A, Subbaraman H, et al. Electric field detection using an electro-optic polymer refilled silicon slot photonic crystal waveguide[C]//*Frontiers in Optics 2014*, October 19-23, 2014, Tucson, Arizona, USA. Washington, D.C.: OSA, 2014: FW5B.4.
- [23] Su D L, Pu S L, Mao L M, et al. A photonic crystal magnetic field sensor using a shoulder-coupled resonant cavity infiltrated with magnetic fluid[J]. *Sensors*, 2016, 16(12): 2157.
- [24] Zhao Y, Zhang Y N, Lü R Q, et al. Electric field sensor based on photonic crystal cavity with liquid crystal infiltration[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(16): 3440-3446.
- [25] Ge D H, Chen H, Jin P F, et al. Magnetic field sensor based on evanescent wave coupling effect of photonic crystal slab microcavity[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2021, 527: 167696.
- [26] Calero V, Suarez M A, Salut R, et al. An ultra wideband-high spatial resolution-compact electric field sensor based on Lab-on-Fiber technology[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 8058.
- [27] 赵阶林, 任广军. 液晶电控效应的实验研究[J]. *液晶与显示*, 2006, 21(4): 384-387.
Zhao J L, Ren G J. Empirical study of electro-optic birefringent effect of liquid crystal[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2006, 21(4): 384-387.
- [28] Tefelska M M, Woliński T R, Ertman S, et al. Electric field sensing with photonic liquid crystal fibers based on micro-electrodes systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(12): 2405-2411.
- [29] Chen Y F, Yang S Y, Tse W S, et al. Thermal effect on the field-dependent refractive index of the magnetic fluid film[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(20): 3481-3483.