

DOI:10.16136/j.joel.2022.03.0859

基于宇称-时间对称光子晶体结构的磁场传感器研究

易凌俊, 李长红*

(青岛大学 电子信息学院, 山东 青岛 266071)

摘要:提出了一种基于宇称-时间(parity-time, PT)对称结构的磁场检测微腔模型,利用水基 Fe_3O_4 磁流体介质层的磁光效应和 PT 对称结构的光放大效应,当磁场强度发生变化时,引起结构禁带中缺陷模位置的变化。因此,可以通过检测缺陷模位置实现磁场强度的检测。本文利用传输矩阵法(transfer matrix method, TMM)从理论上分析了结构的透射光谱,在此基础上对结构周期、介质层厚度、PT 对称单元中宏观洛伦兹振荡强度等参数进行了数值优化。优化后的仿真结果表明,该传感器能够实现有效的磁场磁强检测,磁场强度在 0—500 Oe 的范围内,传感器的灵敏度可以达到 97.14 nm/RIU,优值和检测极限分别可以达到 10^4 和 10^{-7} RIU。同时,传感器的分辨率数值最小可以达到 0.05 Oe 和最大可以达到 2 Oe。本文所设计的传感器结构可用于高综合性能磁场强度检测设备的设计。

关键词:宇称-时间(parity-time, PT)对称;磁光效应;传输矩阵法(transfer matrix method, TMM);磁场传感器

中图分类号:O431.1;TP212 文献标识码:A 文章编号:1005-0086(2022)03-0256-08

Research on magnetic field sensor based on parity-time symmetry photonic crystal structure

YI Lingjun, LI Changhong*

(College of Electronic Information, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China)

Abstract: A magnetic field detection micro-cavity model based on parity-time (PT) symmetry structure is proposed. Using the magnetic-optical effect of hydro-based Fe_3O_4 magnetic fluid medium layer and the optical amplification effect of the PT-symmetry structure, when the magnetic field strength changes, the defect mode position in the structure band gap is changed. Therefore, the magnetic field intensity can be detected by detecting the defect mode position. In this paper, the transmission spectrum of the structure is theoretically analyzed based on the transfer matrix method (TMM), and the parameters such as the structure period, the thickness of the dielectric layer and the macroscopic Lorentz oscillation intensity in the PT-symmetry element are numerically optimized. The optimized simulation results show that the sensor can achieve effective magnetic field intensity detection, the sensitivity of the sensor can reach 97.14 nm/RIU in the magnetic field intensity range of 0—500 Oe, the figure of merit and detection limit can reach 10^4 and 10^{-7} RIU, respectively. Meanwhile, the resolution value can be as low as 0.05 Oe and as high as 2 Oe. The proposed sensor structure can be used in the design of high comprehensive performance magnetic field intensity testing equipment.

Key words: parity-time (PT) symmetry; magnetic-optical effect; transfer matrix method (TMM); magnetic field sensor

* E-mail: jiluch@126.com

收稿日期:2021-12-20 修订日期:2022-01-18

基金项目:国家自然科学基金(61307050, 61701271)和山东省自然科学基金(ZR2016AM27)资助项目

1 引言

传感器件作为信息接收的基础组成部分,在现代信息系统、智能应用系统及环境监测等领域具有重要的作用。从本质上讲,传感器的主要功能是利用介质对物理环境变化的敏感特性,从而达到对变化信息的接收或利用的目的。传感器件主要分为电传感器和光传感器^[1-4],由于电传感器灵敏度和分辨率等性能指标有限,而且信号易受物理环境的干扰,难以对极端环境和微观物理信号进行精确检测。因此,对于光学传感器的研究受到了广大学者的青睐。BAI等^[5]提出了磁流体与光纤环形腔激光器相结合的传感器模型,结构的灵敏度和传感范围分别可以达到-12.05 pm/Oe和15.9—222.32 Oe。ZHAO等^[6]基于紧凑的光纤结构和 Sagnac 干涉仪的原理,在磁场强度范围为10—40 mT的磁场环境,传感器的灵敏度和分辨率分别可达到0.073 nm/mT和0.001 mT。但对于现有的磁场传感器,光波会受到消光因子介质层的影响,这使得输出信号逐渐衰减,从而影响接收设备读取数据,这需要通过选择特殊的介质层材料,复杂的结构设计来减少信号的衰减,从而增加了制造难度和制造成本。上述传感器的局限性影响了实际检测的精度和可靠性,并对光谱检测装置提出了严格的要求。

宇称-时间 (parity-time, PT) 对称理论起源于量子力学,满足 PT 对称的周期性光学结构会表现出奇异的光传输现象,如非互易光传输、光隔离、单向光传输和增强的透射率效应^[7-11]。因此,可以通过将 PT 对称理论引入到光学领域,实现对光学传感器和光学吸收器等不同功能光学器件的设计^[12,13]。

本文类比量子力学中宇称-时间对称理论,将满足 PT 对称条件的光子晶体结构用于磁场强度传感器的设计。通过引入水基 Fe₃O₄ 磁流体介质层,构建一种 PT 对称微腔结构,利用磁流体折射率随磁场强度的变化规律和 PT 对称结构的光放大效应,实现对磁场强度的检测。由于该设计主要利用光学的方法对磁场强度进行检测,因此避免了电学测量对被测磁场产生干扰。同时与传统传感器件相比,该结构在设计难度和综合传感性能等方面有较大的突破,这为光学传感器件的设计和实际应用等方面提供了参考。

2 研究模型与分析方法

2.1 研究理论模型

本文设计的磁场强度检测主体模型如图1所

示,主体结构可以表示为(ACB)^ND(BCA)^N,其中N表示PT对称单元周期数,A层和B层分别代表掺杂量子点的损耗介质层与增益介质层,其折射率在特定波长下呈互为共轭关系,即满足实部相等,虚部互为相反,这样的结构整体就满足PT对称条件。

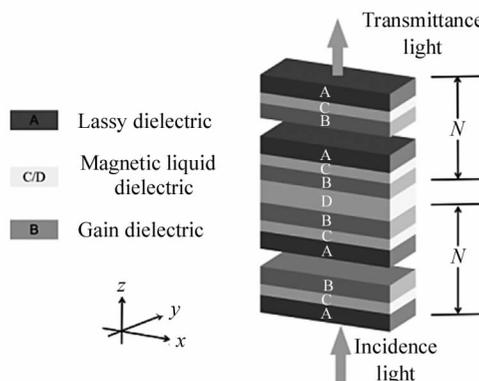


图1 磁场强度检测主体模型

Fig. 1 Model of main structure of magnetic field detection

在普通基底材料中掺杂量子点,就可以实现对损耗介质层(A层)和增益介质层(B层)的构建,它们的色散关系可以用洛伦兹模型定量描述为^[12]:

$$n_{(A,B)} = \left(\epsilon_0 + \frac{\alpha_{PT} \omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - \omega \gamma i} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

式中,γ=2.5×10¹⁴ s⁻¹为阻尼系数,ω₀=1.439×10¹⁵ s⁻¹表示共振角频率,对应于中心波长λ₀=1310 nm,ω表示入射光角频率,α_{PT}表示宏观洛伦兹振荡强度,其值反映了系统增益、掺杂量子点浓度、激发态量子点分布之间的关系,可通过结构仿真优化进行确定。ε₀表示基底二氧化硅的介电常数,可用 Sellmeier 色散关系近似描述为^[14]:

$$\epsilon_0 = 1 + \sum_i \frac{C_i \lambda}{\lambda^2 - \lambda_i^2}, \quad (i = 1, 2, 3), \quad (2)$$

式中,λ为波长,C_i为振荡强度常数,C₁、C₂、C₃的值分别为0.7、0.41和0.9,λ_i为特征振荡波长,λ₁、λ₂、λ₃的值分别为68 nm、116 nm和9896 nm。

C层和D层代表水基四氧化三铁磁流体介质层,该层的有效折射率受纳米磁性四氧化三铁颗粒、基液、浓度、温度和外加磁场的影响。当磁流体浓度确定时,水基四氧化三铁磁流体的折射率可以表示为^[15]:

$$n_{MF} = (H, T) = (n_s - n_0) \cdot \left[\cosh \left(\alpha \frac{H - H_{cn}}{T} \right) - \frac{T}{H - H_{cn}} \right] + n_0, \quad (3)$$

$H > H_{cn},$

式中,n_s和n₀分别表示磁饱和状态和磁临界状态下

磁流体的折射率, H_{cn} 为临界磁场强度, α 为拟合参数, H 和 T 分别为磁场强度和摄氏温度。

考虑到温度特性、磁饱和特性和磁临界特性, 温度可以设置为 25 °C 的室温环境, 探测磁场强度范围为 0—500 Oe, 磁流体折射率可简化为:

$$n_{MF} = n_s + \beta H, \quad (4)$$

式中, $n_s = 1.3418$ 表示温度和磁场强度分别为 25 °C 和 0 Oe 时磁流体层的折射率, $\beta = 3.4187 \times 10^{-5} \text{ Oe}^{-1}$ 为磁灵敏度系数。

2.2 分析方法

本文基于传输矩阵法 (transfer matrix method, TMM) 进行了结构分析, 介质层与电磁波之间的相互作用可表示为^[16]:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} = (\mathbf{M}_A \mathbf{M}_C \mathbf{M}_B)^N \mathbf{M}_D (\mathbf{M}_B \mathbf{M}_C \mathbf{M}_A)^N, \quad (5)$$

式中, $(m_{ii})_{i=1,2}$ 表示第 i 单层的传递矩阵, \mathbf{M}_A 、 \mathbf{M}_B 、 \mathbf{M}_C 和 \mathbf{M}_D 分别为不同介质层的特征矩阵, 可定义为:

$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} \cos \delta_i & -\frac{j}{\eta_i} \sin \delta_i \\ -j \eta_i \sin \delta_i & \cos \delta_i \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中, $\delta_i = \frac{2\pi n_i d_i \cos \varphi_i}{\lambda}$ 为各层相位差, $j = \sqrt{-1}$ 为虚单位, 对于 TE 入射波 $\eta_i = n_i \cos \varphi_i$ 。

增益层、损耗层和水基四氧化三铁磁流体层的入射角 φ_A 、 φ_B 和 $\varphi_{C/D}$ 要满足 Snell 定律:

$$n_0 \sin \varphi_0 = n_A \sin \varphi_A = n_B \sin \varphi_B = n_{C/D} \sin \varphi_{C/D}. \quad (7)$$

对于 N 个周期介质层, 利用第二类切比雪夫多项式计算矩阵乘积 $(\mathbf{M}_A \mathbf{M}_C \mathbf{M}_B)^N$ 。由上述公式可知, 该结构的透射系数和透射率表示为^[12]:

$$t_{PT} = \frac{2\eta_0}{(m_{11} + m_{12}\eta_1)\eta_0 + (m_{21} + m_{22}\eta_1)}, \quad (8)$$

$$T_{PT} = \frac{\eta_1}{\eta_0} |t_{PT}|^2, \quad (9)$$

式中, η_0 和 η_1 分别表示入射介质和出射介质的阻抗。

3 计算结果分析

对整体结构而言, 中间磁流体 D 层相当于结构的缺陷腔, 这样在结构禁带中就会出现与之对应的缺陷模式。当磁流体层的折射率随着外界磁场强度变化时, 禁带中缺陷模式位置及透射率也随之改变。下面在结构参数优化的基础上, 研究了缺陷模随外界磁场强度的变化特性, 同时基于这种变化特性分析了磁场强度进行检测时结构的灵敏度和分辨率

等性能指标。

3.1 磁流体层厚度与 PT 对称单元参数的优化

本文选取 $\lambda_0 = 1310 \text{ nm}$ 作为中心波长, 因此在计算时希望结构的缺陷模式出现在 1310 nm 波长附近, 并以此来调整各介质层的厚度。首先, 设置 A 层与 B 层厚度为 $d_A = d_B = 1222 \text{ nm}$, D 层与 C 层的厚度满足 $d_D = 2d_C$ 。外加磁场取 $H = 250 \text{ Oe}$ (检测区间中心的磁场强度), 宏观洛伦兹振荡强度取 $\alpha_{PT} = 2.0 \times 10^{-4}$, 结构周期 $N = 9$ 。由于 C 介质层厚度的改变会影响缺陷模的位置, 因此可以通过调节 C 层厚度 d_C , 使得缺陷模位置移动至 1310 nm 波长附近。图中可以看出, 随着 d_C 的增大, 缺陷模位置向长波方向移动。为了精准确定 d_C 的值, 本文给出了缺陷模位置随 d_C 变化的拟合曲线, 如图 2 所示。

图 2(a) 绘制了不同 d_C 取值下结构的透射率谱线。从图 2(b) 所示, 根据拟合关系可知, 当 $d_C = 790 \text{ nm}$ 时, 缺陷模位置正好处于 1310 nm 处, 因此本文

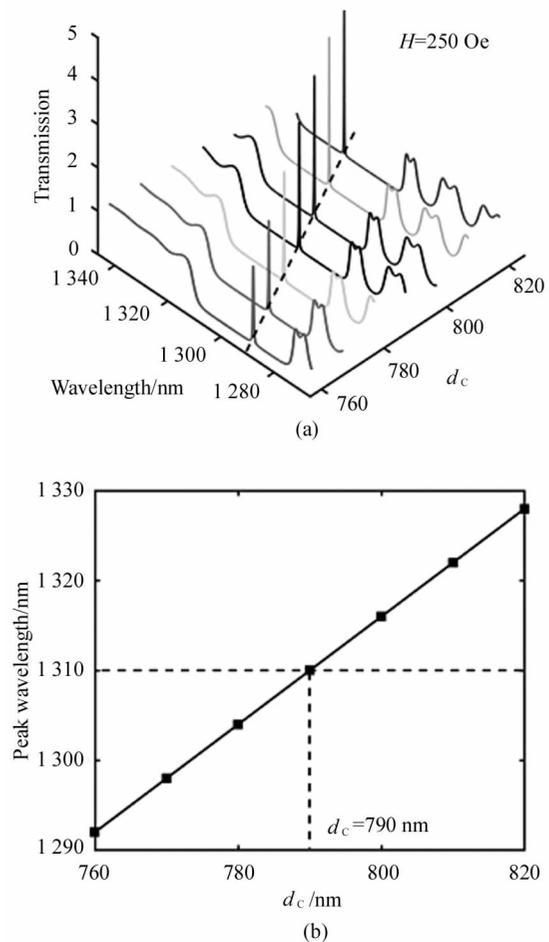


图 2 (a) 不同 d_C 下的结构透射率谱线;
(b) 缺陷模位置随 d_C 的变化

Fig. 2 (a) Transmission spectra with different d_C ;
(b) Defect mode position varying with d_C

选取 $d_c = 790 \text{ nm}$ 作为最终优化结果并进行下面的计算。

结构对入射光的放大效应是由结构的 PT 对称性质引起的,其中,PT 对称单元的周期数 N 是影响结构缺陷模的透射率的重要因素,因此,有必要研究周期 N 对整体结构放大效应的影响。首先,选择周期 $N=9,10,11,12$,得到图 3 所示在不同周期 N 结构的透射谱。从图 3 可以得出,在 1290 nm 到 1330 nm 的波长范围内存在带宽约为 40 nm 的光子禁带,并在禁带中心 1310 nm 处产生一个窄频透射峰,对于图 3(a)、图 3(b)和图 3(c),结构的透射率大于 1,这说明在此模式下结构对工作光波产生放大效应。同时,改变 N 的取值,缺陷模位置不发生变化,但透射率变化显著,当周期 N 分别等于 9、10、11 和

12 时,缺陷模传输分别等于 2.94、12.90、14.08 和 0.70。当 $N=10$ 和 11 时,在波长 1310 nm 处,该结构的放大效应最明显且透射率接近相等。因此,为了确定结构的周期,下面计算了结构在周期 $N=10$ 和 11 时,在不同宏观洛伦兹振荡强度下结构的透射率,计算结果如表 1 所示。

从表 1 可以得出,当 $N=10$ 时,缺陷模透射率随 α_{PT} 增加而先增大然后减少,当 $\alpha_{PT} = 2.7 \times 10^{-4}$ 时,透射率达到最大值 242.0。当 $N=11$ 时,缺陷模透射率随 α_{PT} 减小而先增大然后减少,当 $\alpha_{PT} = 1.6 \times 10^{-4}$ 时,透射率达到最大值 1955.0。这里需要说明的是, α_{PT} 值的增大是以牺牲外部泵能量为代价的,考虑到结构的实际应用,本文选择 $N=11$ 和 $\alpha_{PT} = 1.6 \times 10^{-4}$ 作为优化结果。

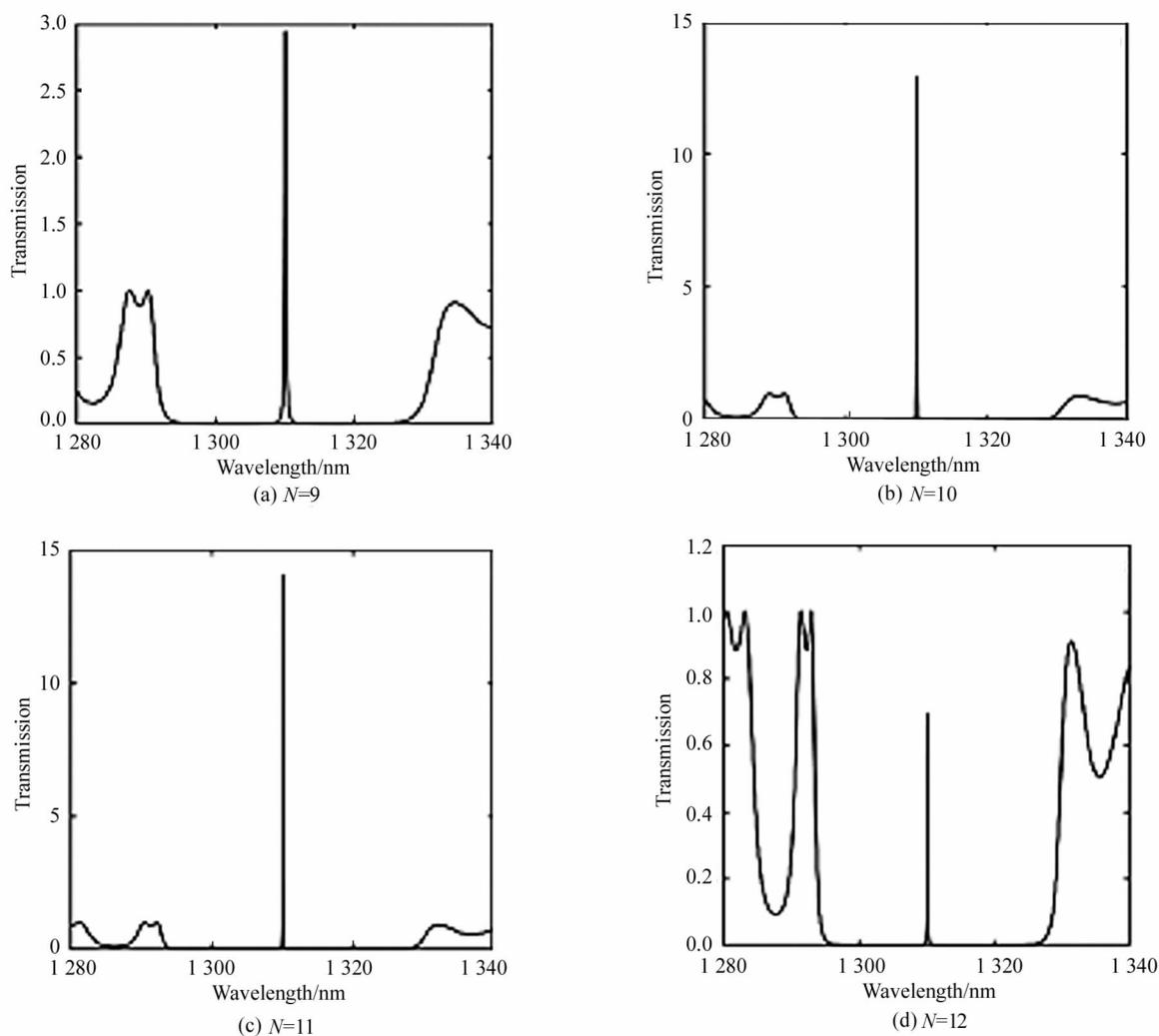


图 3 不同周期 N 结构的透射谱

Fig. 3 Transmission spectra of the structure with different periods N

表 1 周期为 10 和 11 时不同 α 值下结构的透射率

Tab. 1 Transmission of different α values with the structure period $N=10$ and 11

N=10	$\alpha (\times 10^{-4})$	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
	Transmission	12.9	17.0	23.2	33.3	51.3	85.6
	$\alpha (\times 10^{-4})$	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	-
	Transmission	152.4	242.0	227.8	136.1	76.9	-
N=11	$\alpha (\times 10^{-4})$	2.0	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5
	Transmission	12.9	24.0	51.0	166.2	1955.0	328
	$\alpha (\times 10^{-4})$	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	-
	Transmission	73.3	32.2	16.9	10.7	7.3	-

3.2 磁场强度检测机制及性能分析

根据优化后的结构参数,本文选择 0—500 Oe 的磁场强度,计算了以 100 Oe 作为等距磁场强度各点处结构的透射谱。由于不同的磁场强度所对应缺陷模的透射率有显著的数值差异,因此在计算过程中结构透射率以 dB 为单位进行对数变换,变换关系可以写成: $T(\text{dB}) = 10\lg T^*$ 。不同磁场强度下结构磁共振腔的透射谱如图 4 所示。从图 4 可得出,随着磁场强度的增加,缺陷模位置出现了明显的红移,从 0 Oe 对应的 1 303 nm 移动到 500 Oe 对应的 1 318 nm。同时,缺陷模的透射率也随磁场强度而变化,当 H 位于所选磁场强度区间的中心时,PT 对称结构对缺陷模的放大效应最显著,当磁场强度值偏离磁场强度间隔的中心时,透射率逐渐减小,同时,整个缺陷模位置的红移区间关于强耦合点 1 310 nm 对称分布。

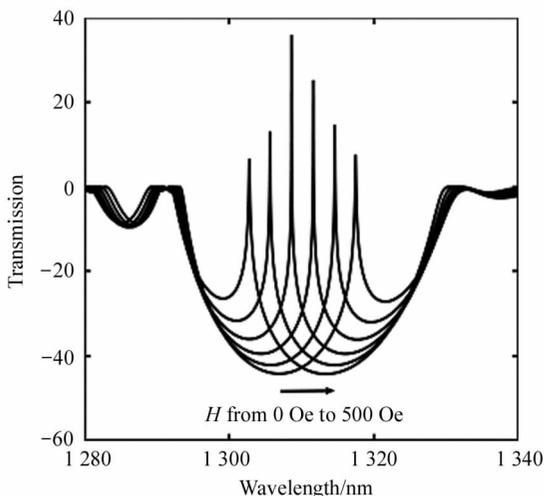


图 4 不同磁场强度下结构共振腔的透射谱

Fig. 4 The transmission spectra of the structure with different magnetic field intensity

从式(2)可以分析出,磁流体层的折射率不仅与磁场强度有关,而且还与外部温度有关。本文进一

步分析了外部不同温度对结构检测性能的影响,如图 5 所示。图 5(a)给出了该结构在外部磁场强度为 0 Oe,外部温度分别为 25 °C、55 °C 和 85 °C 时波长与透射谱关系。可以分析出,当外部温度升高时,缺陷模位置产生蓝移,这表明,当通过缺陷模位置进行磁场强度检测时,温度的变化会导致其缺陷模位置的漂移,从而影响到结构的检测精度。

图 5(b)给出了当温度从 0 变到 100 °C 时,磁场强度从 0 到 500 Oe 的检测范围内缺陷模位置的位移区间。可以分析出,在温度变化 100 °C 时,不同磁场强度对应的缺陷模平均位移仅为 1 nm (0.01 nm/°C),说明当温度在很小范围内变化时,对缺陷模位置影响较小,因此该传感器结构可以检测环境温度波动范围较小的磁场强度。在实际应用中,可以设置 $\Delta T=10$ °C 作为温度波动范围,温度变化超过此温度间隔时,外部温度所导致缺陷模位置的蓝移就会干扰传感器的性能。

在室温条件下,根据磁流体层折射率和缺陷模位置的拟合曲线可以得到: $\lambda = 1171 + 97.14n_{\text{ML}}$ 。这里,线性拟合与仿真数据之间的相关系数可以达到 0.9898。同时,根据文献[17]中提到的灵敏度定义: $S = \Delta\lambda / \Delta n$,可以得到该结构的检测灵敏度可达到 97.14 nm/RIU。

结构的检测分辨率是衡量器件性能的另一个关键指标,分辨率可定义为检测到的磁场强度 H_{min} 的最小值,分辨率值越小,检测性能越好。当磁场强度发生变化时,缺陷模位置发生位移,可以根据磁场强度的变化和传输峰的位移可计算分辨率值。对于实际检测,传输峰值的位移间隔应大于传输峰值的半高宽。利用峰值间隔计算的结构分辨率,如图 6 所示。从图 6 中传输峰的位移中可以看出,当 H 为 0 Oe 和 1.6 Oe 时,两个峰之间的间隔为 0.07 nm,完全等于透射峰半高宽 (full wave at half maximum, FWHM),因此可以得出,在 0 Oe 时结构的分辨率为

1.6 Oe。利用该方法可用于计算不同磁场强度下结构的分辨率,不同磁场强度下结构的分辨率如表 2 所示。

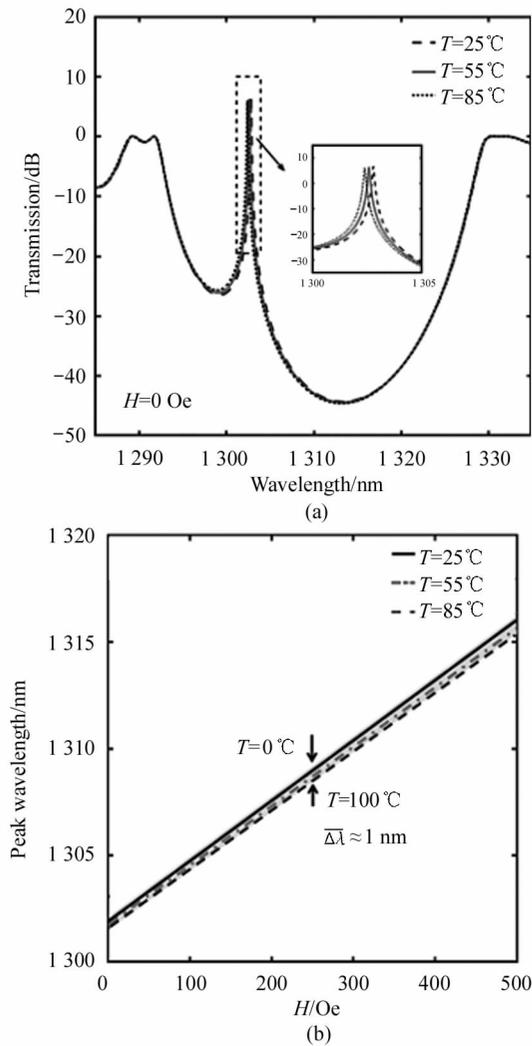


图 5 (a) 不同温度 T 的透射谱;
(b) 不同温度下缺陷模式位置随磁场强度 H 而变化
Fig. 5 (a) Transmission spectra with different temperatures T ; (b) Defect mode position in different temperatures varying with magnetic field intensity H

从表 2 可以分析出,在所选择的磁场强度区间中心位置,结构的分辨率数值较小,表明结构可以有较小磁场强度值。当磁场强度远离区间中心位置

时,分辨率数值增大,检测性能相对下降。但从整个检测区间范围内分辨率的数值变化来看,结构最大分辨率值为 2 Oe,此分辨率值对于实际的应用来说也是一个不错的指标。因此,在计算的分辨率数值波动范围内,分辨率的差异不影响结构的实际应用。

为了综合分析所提出的传感器结构的检测性能,本文还根据缺陷模式的透射率计算了质量因子 (quantity, Q) 和优值 (figure of merit, FOM), 其表达式为^[18]:

$$Q = \frac{\lambda_d}{\lambda_{FWHM}}, \tag{10}$$

$$FOM = \frac{S}{\lambda_{FWHM}}, \tag{11}$$

式中, λ_d 、 λ_{FWHM} 、 S 分别为缺陷模式的波长、缺陷模半高宽 $FWHM$ 和灵敏度。表 3 列出了传感器在不同的磁场强度值下的检测性能,可以分析出,该传感器在磁场强度为 200 Oe 时的质量因子约为 8.72×10^5 , 优值约为 $6.48 \times 10^4 / \text{RIU}^{-1}$ 。同时,利用表 3 的计算结果,根据公式 $LD = \lambda_d / (20S)$ ^[19] 计算了该传感器的检测极限 (limit of detection, LD)。计算结果表明,当磁场强度为 200 Oe 时,传感器的检测极限可达到 $7.23 \times 10^{-7} \text{RIU}$ 。检测极限值较低,说明该传感器检测性能越好,因为它可以准确检测外部磁场强度所引起的磁流体折射率 n_{MF} 的微小变化。

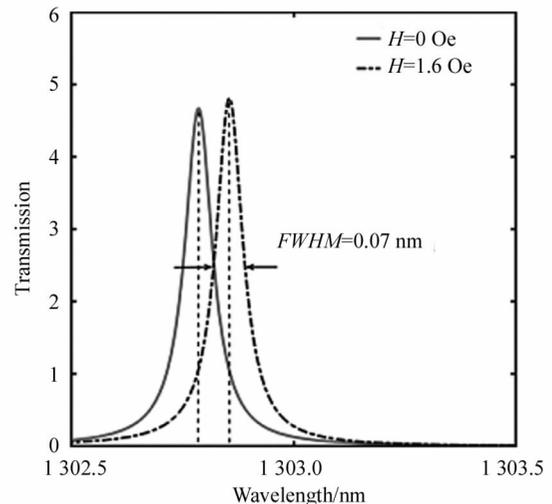


图 6 利用峰值间隔计算的结构分辨率
Fig. 6 Calculation of structural resolution by peak interval

表 2 不同磁场强度下结构的分辨率

Tab. 2 Resolution of the structure detecting with different magnetic field intensity H

H /Oe	0-50	50-100	100-150	150-200	200-250
Resolution /Oe	1.6-1.2	1.2-0.9	0.9-0.4	0.4-0.09	0.09-0.05
H /Oe	250-300	200-350	350-400	400-450	450-500
Resolution /Oe	0.05-0.07	0.07-0.3	0.3-0.9	0.9-1.4	1.4-2

表 3 传感器在不同磁场强度值下的检测性能

Tab. 3 Properties of the proposed sensor for different values of magnetic field intensity

H / Oe	n_{MF}	$S / \text{nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$	λ_d	λ_{FWHM}	$Q / (\times 10^5)$	$FOM / (\times 10^4 / \text{RIU}^{-1})$
0	1.3418		1301.4	0.02	0.65	0.49
100	1.3760		1304.5	0.007	1.86	1.39
200	1.4102		1308.4	0.0015	8.72	6.48
300	1.4444	97.14	1310.6	0.004	3.28	2.43
400	1.4785		1313.5	0.024	0.55	0.40
500	1.5127		1318.6	0.037	0.36	0.26

4 结 论

本文在 PT 对称理论的基础上,提出了一种新的磁场强度传感器模型 $(ACB)^N D (BCA)^N$, 并采用 TMM 方法对其结构参数进行了数值优化。在此基础上研究了磁场强度、结构的周期和温度对该探测器检测性能的影响。计算结果表明,在 0—500 Oe 磁场强度范围内,该结构的磁场强度检测灵敏度可以达到 97.14 nm/RIU。同时,由于 PT 对称结构的放大效应,使得结构具有较高的质量因子、优值、检测极限和分辨率。这种综合性能优异的磁场传感结构可应用于不同领域如军事、工业制造和生物医学等领域的磁场强度检测。

参考文献:

[1] HE X Q, LI C S, YANG X Y, et al. An optoelectronic voltage sensor based on timer chip and pulse duration radio modulation[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2020, 31(9):909-914.
贺雪倩,李长胜,杨心月,等.利用计时器芯片和脉冲占空比调制的光电式电压传感器[J].光电子·激光, 2020,31(9):909-914.

[2] SHEN W M, JIANG C, WANG J, et al. Bending sensor fabricated by hard plastic cladding fiber[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2021, 32(6):567-572.
申万梅,江超,王解,等.硬塑料包层光纤构成的弯曲传感器[J].光电子·激光, 2021,32(6):567-572.

[3] ZHANG A Y, HUANG H L, JIANG C, et al. Optical fiber sensor composed of multi-core fiber for simultaneous measurement of temperature and refractive index [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2019, 30(10):1017-1025.
张傲岩,黄会玲,江超,等.多芯光纤构成的温度与折射率同时测量的光纤传感器[J].光电子·激光, 2019,30(10):1017-1025.

[4] MALMIR N, FASIHI K. Highly-sensitive label-free biosensor based on two dimensional photonic crystals with negative refraction[J]. Modern Optics, 2017, 64(20):1346828.

[5] BAI X K, YUAN J, GU J, et al. Magnetic field sensor using fiber ring cavity laser based on magnetic fluid[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(2):115-118.

[6] ZHAO Y, WU D, LV R Q, et al. Magnetic field measurement based on the Sagnac interferometer with a ferrofluid-filled high-birefringence photonic crystal fiber[J]. IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, 2016, 65(6):1503-1507.

[7] WANG Y Y, XIA J, FANG Y T. Unique non-reciprocal mode with a parity-time symmetric structure under magneto-optic effects[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12):312-317.
王誉雅,夏景,方云团.磁光效应下 PT 对称结构独特的非互易传输模式[J].中国激光, 2018,45(12):312-317.

[8] SUN L, ZHAO B, YUAN J Q, et al. Optical resonance in inhomogeneous parity-time symmetric systems[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(7):109-113.

[9] DUAN Y, ZHANG X G, DING Y M, et al. Single-cavity bicolor laser enabled by optical anti-parity-time symmetry [J]. Photonics Research, 2021, 9(7):1280-1288.

[10] LIU Y X, JIANG X P, CAO J P, et al. Non-Hermitian mobility edges in one-dimensional quasicrystals with parity-time symmetry[J]. Physical Review B, 2020, 101(17):174205.

[11] CHEN W J, ZHANG J, PENG B, et al. Parity-time-symmetric whispering-gallery mode nanoparticle sensor[J]. Photonics Research, 2018, 6(5):11-18.

[12] YI L J, LI C H. Simulation research on blood detection sensing with parity-time symmetry structure [J]. Crystals, 2021, 11(9):1030.

[13] YI L J, LI C H. Simulation study of in-phase and out-phase

- enhanced absorption of graphene based on parity-time symmetry one-dimensional photonic crystal structure[J]. *Crystals*, 2021, 11(12): 1513.
- [14] DING S, WANG G P. Extraordinary reflection and transmission with direction dependent wavelength selectivity based on parity-time-symmetric multilayers[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(2): 023104.
- [15] WU Q, ZHANG Z Y, GUO X C, et al. Simultaneous measurement of magnetic field and temperature based on photonic crystal fiber with eliminating cross-sensitivity[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(18): 180-185.
吴倩, 张诸宇, 郭晓晨, 等. 基于光子晶体光纤交叉敏感分离的磁场温度传感研究[J]. *物理学报*, 2018, 67(18): 180-185.
- [16] SHAN Y Y, LI C H, YAN C Q, et al. Research on the high absorption property of on dimensional ternary photonic crystals with metal layer[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2019, 30(3): 241-249.
- 单圆圆, 李长红, 闫崇庆, 等. 含金属层一维三元光子晶体结构的高吸收特性研究[J]. *光电子 • 激光*, 2019, 30(3): 241-249.
- [17] AYYANAR N, RAJA G T, SHARMA M, et al. Photonic crystal fiber-based refractive index sensor for early detection of cancer[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(17): 7093-7099.
- [18] ARAFA H A, MOHAMED D, MOHASEB M A, et al. Biophotonic sensor for the detection of creatinine concentration in blood serum based on 1D photonic crystal[J]. *Cryogenics*, 2020, 10(53): 31765-31772.
- [19] BEHEIRY M E, LIU V, FAN S, et al. Sensitivity enhancement in photonic crystal slab biosensors. *Optical Express*, 2010, 18(22): 1822702-1822714.

作者简介:

李长红 (1973—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事光子晶体器件、慢光传输和太阳能捕获等方面的研究。