

磁流体光子晶体微腔的磁场响应特性

英宇¹, 赵勇^{1,2}, 吕日清¹, 吴迪¹

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 流程工业综合自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 提出了基于磁流体光子晶体的微腔, 并对其形成过程进行了理论解释, 进而研究了该微腔的传感特性, 计算了其光透射特性. 分析了薄膜厚度分别为 $6\ \mu\text{m}$ 和 $0.94\ \mu\text{m}$ 时磁流体光子晶体微腔的磁场响应特性. 研究表明, 随着外加磁场增加, 这两种结构的光子晶体谐振峰中心波长分别蓝移了 $4.130\ \mu\text{m}$ 和 $0.076\ \mu\text{m}$; 磁场响应的最大灵敏度分别为 $243\ \text{nm/mT}$ 和 $3.8\ \text{nm/mT}$. 这种基于微腔的传感系统具有易调谐、制备简单, 且灵敏度高等优点, 为胶体光子晶体在传感领域的应用提供了新的思路.

关键词: 微腔; 透射特性; 磁响应; 谐振峰; 传感器

中图分类号: TB 34 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2015)08-1080-04

Magnetic Response Property of Magnetic Fluid Photonic Crystal Microcavity

YING Yu¹, ZHAO Yong^{1,2}, LYU Ri-qing¹, WU Di¹

(1. School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHAO Yong, professor, E-mail: zhaoyong@ise.neu.edu.cn)

Abstract: A kind of microcavity using magnetic fluid photonic crystal was presented, and its forming process was explained theoretically. Then the sensing property was studied, and the transmission characteristic was computed. The magnetic response properties of the proposed structure with the thickness of $6\ \mu\text{m}$ and $0.94\ \mu\text{m}$ were analyzed respectively. It was found that the central wavelength of resonance peak would be blue-shifted about $4.130\ \mu\text{m}$ and $0.076\ \mu\text{m}$. The maximum sensitivity was $243\ \text{nm/mT}$ and $3.8\ \text{nm/mT}$ respectively. The sensor system exhibited the advantages of easy tuning, simple formation and high sensitivity, which would provide a new idea for optical sensor.

Key words: microcavity; transmission characteristic; magnetic response; resonance peak; sensor

光子晶体, 又称“光学半导体”, 是由介电常数不同的两种材料周期性排列而成^[1-2]. 进一步研究发现, 在这种周期性结构中引入缺陷, 会导致光子晶体的禁带中出现缺陷模. 基于此, 产生了光子晶体滤波器^[3]、光子晶体波导^[4]和光子晶体微腔^[5]等许多新型的光学器件.

近年来, 人们通过在光子晶体微腔中填充敏感材料并改变环境参数, 使缺陷模对应的谐振峰发生变化, 从而开启了光子晶体在传感领域的研究. 2011年, Scullion等^[6]提出了一种基于槽光子

晶体微腔的生物传感系统, 并用于检测有机物浓度. 当卵白素质量浓度从 0 增加到 $100\ \mu\text{g/mL}$ 时, 光子晶体的谐振峰值所对应的光波长从 $1549.3\ \text{nm}$ 红移到 $1551.5\ \text{nm}$. 2014年, Chen等^[7]提出了一种基于光子晶体纳米梁微腔 (photonic crystal nanobeam cavities) 的超灵敏气体检测系统. 当水杨酸甲酯 (methyl salicylate) 气体的体积分数从 240×10^{-6} 增加到 1200×10^{-6} 时, 谐振峰光功率从 $1.5\ \mu\text{W}$ 增加到 $6.5\ \mu\text{W}$. 然而, 当前的研究主要是以固体电介质材料为主, 有

收稿日期: 2013-12-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61273059, 61203206); 流程工业综合自动化国家重点实验室基础科研业务费资助项目 (2013ZCX02-05).

作者简介: 英宇 (1983-), 男, 辽宁鞍山人, 东北大学博士研究生; 赵勇 (1973-), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学教授, 博士生导师.

关其他材料结构的研究较少. 本文提出了基于磁流体光子晶体的微腔, 并对其形成过程进行了理论解释, 进而研究了该微腔的传感特性, 计算了其光透射特性, 并比较了不同薄膜厚度下谐振峰对磁场的响应特性. 相关研究对于研制基于磁流体光子晶体的传感器具有十分重要的意义.

1 系统分析和设计

磁流体中磁性粒子的运动会受到外界磁场的影响. 当无磁场作用时, 磁性粒子主要受布朗力、磁偶作用力和排斥力的作用, 磁矩指向无规则 (图 1a); 当施加较小强度磁场时, 磁矩开始沿着外磁场方向排列, 粒子上下相互吸引, 进而沿着磁场方向成链状排列 (图 1b); 当施加较高强度磁场时, 磁矩沿着磁场方向的排列进一步加强, 粒子以交叉方式形成粗链 (图 1c). 平衡状态时, 根据能量定理^[8], 磁柱最终将呈六边形排列. 本文采用的粒子直径为 10 nm, 当形成光子晶体结构时, 磁柱相对介电常数为 3.74, 相对磁导率为 1, 晶格常数与磁场强度的关系如图 2 所示, 当磁场强度增加时, 更多的磁柱形成, 导致晶格常数逐渐减少^[9].

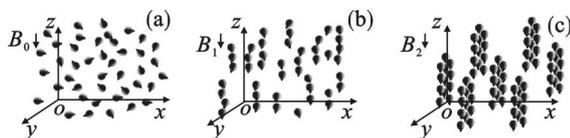


图 1 磁流体粒子在不同磁感应强度下的结构
Fig. 1 Magnetic fluid structure in different magnetic fields

(a) — $B_0 = 0$; (b) — $B_1 > B_0$; (c) — $B_2 > B_1 > B_0$.

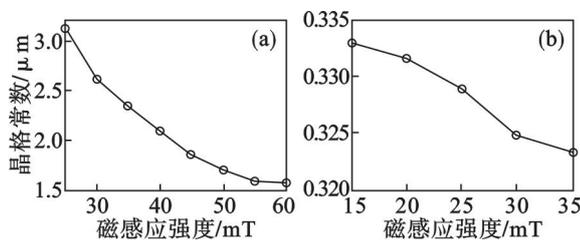


图 2 磁流体光子晶体晶格常数随磁场的变化曲线
Fig. 2 Lattice constant of magnetic fluid photonic crystal as a function of magnetic field

(a) — 薄膜厚度 6 μm ; (b) — 薄膜厚度 0.94 μm .

磁流体光子晶体属于胶体光子晶体, 这种结构具有很好的调谐性, 但结构不稳定. 图 3 是用于填充磁流体且深度为微米量级 (小于饱和磁链长度) 的硅槽, 为保证透射率和足够的磁柱周期, 设定槽边长 $W = 50 \mu\text{m}$. 在槽中心位置腐蚀出直径

为 D 的硅柱. 在外加磁场作用下, 磁流体能够形成磁流体光子晶体微腔.

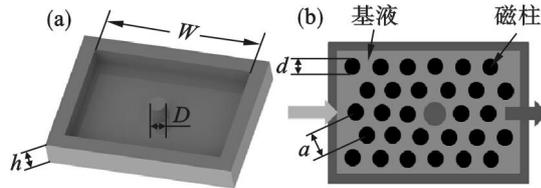


图 3 磁流体光子晶体微腔结构
Fig. 3 Magnetic fluid photonic crystal microcavity
(a) — 三维视图; (b) — 俯视图.

通过前面的分析得到了磁场强度与磁流体光子晶体晶格常数之间的关系, 在此基础上, 对其光学特性进行研究. 本文对不同薄膜厚度条件下光透射特性随磁场的变化进行仿真. 通过求解麦克斯韦方程并计算本征值得出磁流体光子晶体透射谱^[10]:

$$\Delta \times \left[\frac{1}{\varepsilon(r)} \Delta \times H(r) \right] = \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 H(r) \mu(r). \quad (1)$$

式中: $\varepsilon(r)$ 和 $\mu(r)$ 分别为介质的介电常数和磁导率; c 为真空中的光速; ω 为传输光的频率; $H(r)$ 为电磁波当中的磁场. 通过有限时域差分法求解麦克斯韦方程, 可得出空间分量式分别为^[11]

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_z}{\partial x} &= \varepsilon(r) \frac{\partial E_y}{\partial t}, \quad \frac{\partial H_z}{\partial y} = \varepsilon(r) \frac{\partial E_x}{\partial t}, \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} &= -\mu \frac{\partial H_z}{\partial t}. \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $(E_x, E_y, 0)$ 和 $(0, 0, H_z)$ 分别为电磁分量.

通过以上对磁流体光子晶体微腔的结构和理论的分析, 提出了一套磁场传感系统, 如图 4 所示.

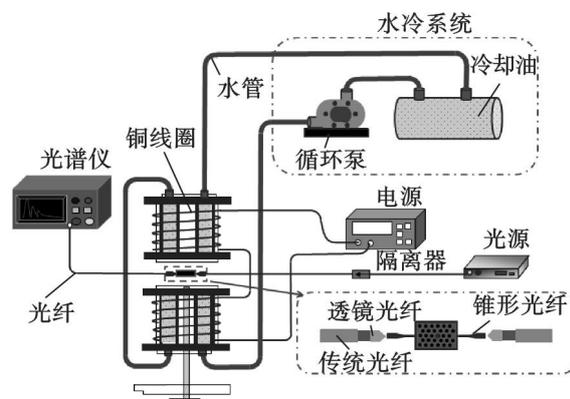


图 4 基于磁流体光子晶体微腔的磁场传感系统
Fig. 4 Magnetic field sensor system based on magnetic fluid photonic crystal microcavity

磁场通过电源连接通电线圈产生, 通过调节电流大小改变磁场强度. 薄膜置于两线圈之间. 磁场方向垂直于薄膜表面. 外部通过水管连接水冷

系统,循环泵使冷却油流动以保持热平衡.与微腔连接的部分采用透镜光纤,将经过传统光纤的光耦合到锥形光纤;锥形光纤的末端大约 $4\ \mu\text{m}$,与光子晶体晶格在同一数量级.当光源发出的光经过光纤进入磁流体光子晶体微腔时,出射光在禁带区域产生谐振峰;当磁场强度发生改变时,谐振峰发生移动.这样可以实现相应的磁场强度测量和传感.

2 结果和讨论

光子禁带是光子晶体的基本光学特性之一.当磁流体薄膜的厚度为 $6\ \mu\text{m}$ 时,光子禁带随磁场的变化趋势如图 5 所示.当磁感应强度为 $25\ \text{mT}$ 时,光子禁带出现在 $9.76\sim 14.53\ \mu\text{m}$;当磁感应强度增加到 $55\ \text{mT}$ 时,光子禁带蓝移到 $6.97\sim 10.49\ \mu\text{m}$.由此可见,这种结构在远红外范围内存在光子禁带,并可实现其磁调谐性.

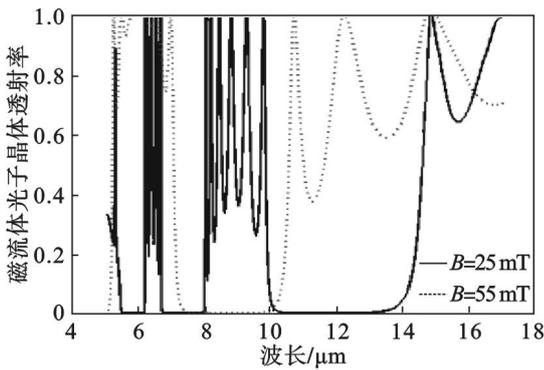


图 5 磁流体光子晶体的光子禁带随磁场的变化
Fig. 5 Photonic bandgap change of magnetic fluid photonic crystal as increasing magnetic field

介质柱的直径对谐振峰的特性会产生影响.图 6 显示磁感应强度为 $25\ \text{mT}$ 时,缺陷柱直径分

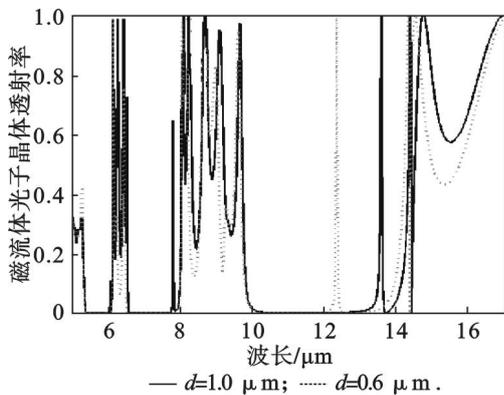


图 6 磁流体光子晶体在不同直径缺陷柱下的透射谱
Fig. 6 Transmission spectrum of magnetic fluid photonic crystal with different defect column diameters

别为 $0.6\ \mu\text{m}$ 和 $1.0\ \mu\text{m}$ 两种情况下的光透射性.对比可知,当缺陷柱直径为 $0.6\ \mu\text{m}$ 时,谐振峰比较明显,且位于禁带中间.

对缺陷柱直径为 $0.6\ \mu\text{m}$ 时磁流体光子晶体谐振峰的磁调谐特性进行分析可知,当磁感应强度从 $25\ \text{mT}$ 升高到 $55\ \text{mT}$ 时,谐振峰的中心波长位置从 $12.38\ \mu\text{m}$ 蓝移到 $8.25\ \mu\text{m}$,如图 7a 所示.由图 7b 可以看出,谐振峰波长在不同磁场范围表现出不同的响应特性.在磁感应强度为 $25\sim 35\ \text{mT}$ 范围内的灵敏度 ($243\ \text{nm/mT}$) 高于磁感应强度为 $35\sim 55\ \text{mT}$ 范围内的灵敏度 ($85\ \text{nm/mT}$).

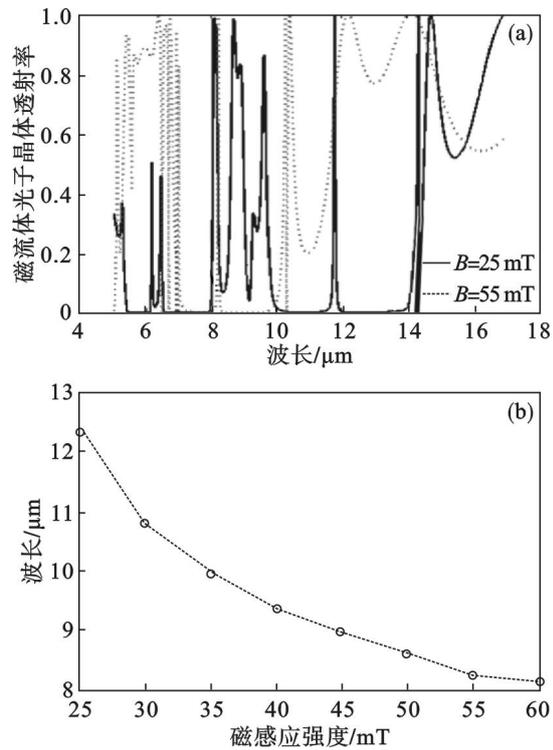


图 7 磁流体光子晶体微腔在不同磁场下的远红外光学性质
Fig. 7 Far-infrared optical property of magnetic fluid photonic crystal microcavity in different magnetic fields

虽然谐振波长对磁场强度的响应具有较高的灵敏度,但在实际应用中,远红外器件过于昂贵,因此,需要将磁流体光子晶体的光子禁带区域限制在近红外范围.减小磁流体光子晶体的磁柱直径和间距可以使禁带向短波长方向移动.相关研究表明,相同磁场和温度下,薄膜厚度越小,磁流体光子晶体的磁柱直径和间距越小^[9].将体积分数为 23.43% 的磁流体填充到厚度为 $0.94\ \mu\text{m}$ 的槽中,并分析其磁调谐性^[11],可以看出,当磁场强度增加时,磁柱间距和直径都逐渐减小.如图 8a 所示,当磁感应强度从 $15\ \text{mT}$ 升高到 $35\ \text{mT}$ 时,谐振峰波长的透射率从 0.65 减小到 0.30 .如图

8b 所示, 谐振峰波长位置从 $1.528 \mu\text{m}$ 蓝移到 $1.452 \mu\text{m}$, 灵敏度为 3.8 nm/mT , 且线性度比较好.

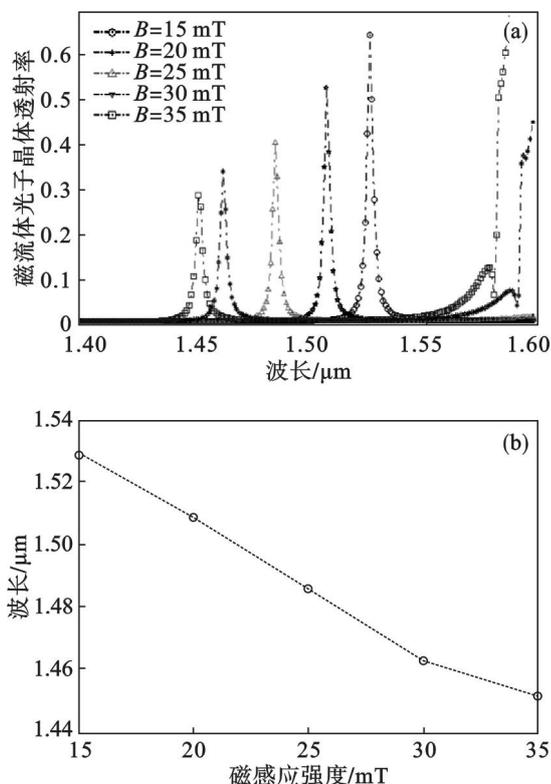


图 8 磁流体光子晶体微腔在不同磁场下的近红外光学性质

Fig. 8 Near-infrared optical property of magnetic fluid photonic crystal microcavity in different magnetic fields

通过以上分析比较可得, 磁流体光子晶体微腔结构具有较好的磁调谐特性, 其谐振峰波长能够随磁场变化而变化, 并且在远红外和近红外波段实现光学传感. 当其应用于磁场检测时, 具有较高的灵敏度, 可用于制作新型光学传感器件.

3 结 论

1) 从微观角度分析并解释了磁流体光子晶体的形成过程, 指出了这种新型的光子晶体的优点.

2) 提出了一种新型的槽结构来实现磁流体光子晶体谐振腔, 并根据这种结构的特征, 设计了一种磁场传感系统.

3) 分别分析了磁流体光子晶体在远红外和近红外的谐振峰移动特性. 结果表明, 该结构在这两个波段的灵敏度分别达到 243 nm/mT 和 3.8 nm/mT .

参考文献:

- [1] Sajeev J. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(23):2486–2489.
- [2] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(20):2059–2063.
- [3] Mehr A, Emami F, Mohajeri F. Tunable photonic crystal filter with dispersive and non-dispersive chiral rods[J]. *Optics Communications*, 2013, 301/302:88–95.
- [4] Andrea B R, Sarriguarte P, Garcia A, et al. Coupling mid-infrared light from a photonic crystal waveguide to metallic transmission lines[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(1):011101-1–5.
- [5] Radulaski M, Babinec T M, Buckley S, et al. Photonic crystal cavities in cubic (3C) polytype silicon carbide films[J]. *Optics Express*, 2013, 21(26):32623–32629.
- [6] Scullion M G, Falco D A, Krauss T F, et al. Slotted photonics crystal cavities with integrated microfluidics for biosensing applications[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2011, 7(1):101–105.
- [7] Chen Y, Fegadolli W S, William J M, et al. Ultrasensitive gas-phase chemical sensing based on functionalized photonic crystal nanobeam cavities[J]. *Chinese Physics Letters*, 2014, 8(1):522–527.
- [8] Zhao Y, Lyu R Q, Li H, et al. Simulation and experimental measurement of magnetic fluid transmission characteristics subjected to the magnetic field[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2014, 50(5):4600107-1–7.
- [9] Yang S Y, Horng H E, Shiao Y T, et al. Photonic-crystal resonant effect using self-assembly ordered structures in magnetic fluid films under external magnetic fields[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2006, 307(1):43–47.
- [10] Lyubchanskii I L, Dadoenkova N N, Lyubchanskii M I, et al. Magnetic photonic crystal[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2003, 36:277–287.
- [11] Yang L X, Xie Y T, Yu P P, et al. Study of bandgap characteristics of 2D magnetoplasma photonic crystal by using M-FDTD method[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2011, 53(8):1778–1784.