

光子晶体的相位特性在高灵敏 温度传感器中的应用*

黄 覃 冷逢春 梁文耀 董建文 汪河洲[†]

(中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广州 510275)

(2009 年 7 月 19 日收到; 2009 年 11 月 6 日收到修改稿)

对含耦合缺陷的不对称结构光子晶体的研究发现, 其缺陷模频率附近的反射率接近于 1, 而缺陷模频率附近反射光的相移随频率迅速改变; 当缺陷层为折射率的温度敏感材料时, 温度的极微小变化就能使处于缺陷模频率的反射光相移发生很显著变化. 根据这一原理, 设计了高灵敏高分辨率的相位温度传感器. 以高灵敏高分辨率的温度传感器为例, 介绍高灵敏高分辨率的相位传感器的工作原理.

关键词: 光子晶体, 相位, 传感器

PACC: 4270Q, 7820P

1. 引 言

光子晶体是介质或金属等材料构成的人工周期结构^[1,2]. 光子晶体的带隙和缺陷的物理性质、光子晶体的制作及应用研究已引起广泛的关注^[3-15].

传感器是能够感受被测量信号并把感受到的信号按一定规律转换成易传输易读取的信号的各种器件的总称, 是信息系统的一种重要器件. 利用光子晶体的优点发展光子晶体传感器已成为一个重要研究课题. 例如, 光子晶体光纤传感器因有望解决普通光纤传感器中存在的许多问题而受到广泛的重视^[16-19], 光子晶体晶片传感器^[20]也已有报道.

光的相位特性是光的典型特性之一, 许多光物理现象与相位特性有关. 在光子晶体中, 几乎所有光物理现象都与相位特性相关联, 在光子晶体中相位与振幅和频率一样重要. 然而, 虽然已有一些光子晶体相位器件被报道^[21,22], 但基于光子晶体的相位特性所设计的传感器作者尚未见报道. 本文研究了基于光子晶体相位特性的温度传感器, 它具有很高的灵敏度.

2. 含耦合缺陷的不对称结构光子晶体的物理特性

光子晶体缺陷模的相位特性过去很少被应用, 其主要原因如下: 在缺陷模光是高透射的, 离开缺陷模光是高反射的, 这种透射光或反射光的光强剧烈变化会使相位测量中光强无法恒定. 另外, 相位还受衬底等影响. 通过研究我们发现, 以上问题都能通过光子晶体不对称结构或异质结结构获得解决^[22].

运用传输矩阵方法^[23], 我们计算和研究了含缺陷的一维光子晶体不对称结构的带隙和相位特性. 首先, 以含 5 个耦合缺陷层为例. 此光子晶体结构为 $(HL)^3D(LH)^3L(HL)^3D(LH)^3L(HL)^3D(LH)^3L(HL)^3D(LH)^3L(HL)^3D(LH)^8$. 这里 H 表示高折射率材料, L 表示低折射率材料, D 表示杂质材料; 相应的折射率分别为 $n_H = 3.3$, $n_L = 1.45$, $n_D = 3.4$; $n_D d_D = \lambda_0/2$, $n_H d_H = n_L d_L = \lambda_0/4$. 计算所得缺陷模附近的反射谱和相位特性如图 1 所示. 图 1 中 ω 为频率, R 为反射率, θ 为相位, 图中实心点线和空心点线分别代表缺陷层的折射率改变 0.01% 前后的情况. 从图 1(a) 可以看出, 不对称结构使缺陷模的高透射消失, 即整个带隙(包括缺陷模频率)的反射

* 国家自然科学基金(批准号:10874250, 10674183, 10804131)和高等学校博士学科点专项科研基金(批准号:20060558068)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: stswzh@mail.sysu.edu.cn

率接近于 1,但在缺陷模频率附近反射光的相移随频率迅速改变. 对应耦合缺陷模的每一个子峰,相移等于 2π ,对含 5 个耦合缺陷层的缺陷模,相移等于 10π ,如图 1(b)所示. 并且不对称结构使衬底的影响被克服.

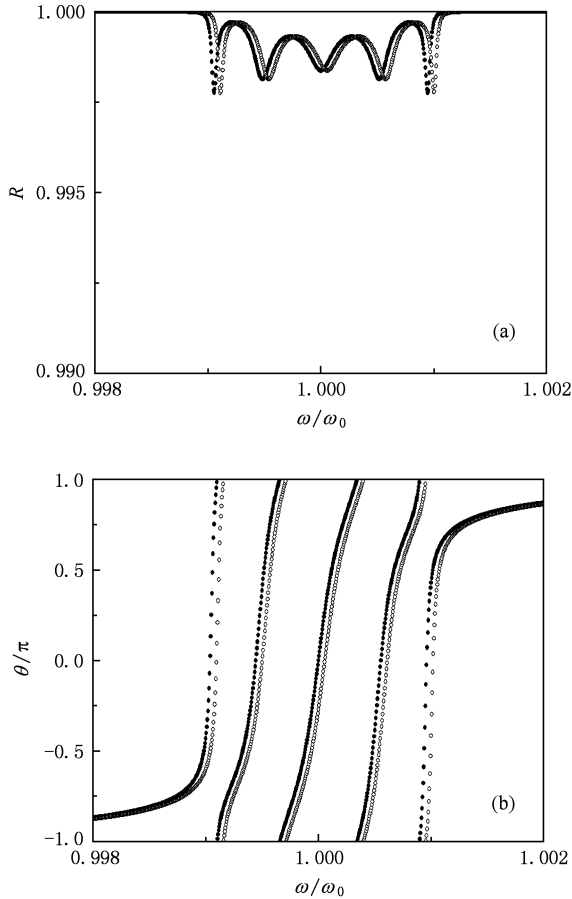


图 1 含耦合缺陷的不对称结构一维光子晶体的计算结果 (a) 反射谱, (b) 相位特性

从图 1(b)可以看出,相位曲线中有近似线性一段,这种近似线性关系在光子器件的应用中很有价值. 下面我们基于光子晶体相位的上述特性,以温度传感器为例讨论光子晶体相位特性在传感器中的应用.

3. 高灵敏高分辨率光子晶体相位温度传感器

如果光子晶体缺陷层的介质是温度敏感材料,温度变化时,缺陷模的频率和相位都将随着温度而变化. 根据热光效应,温度直接导致的折射率变化可表示为^[24]

$$\Delta n = \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T.$$

这里的 $\frac{\partial n}{\partial T}$ 为折射率随温度变化系数(也称热光系数), $\frac{\partial n}{\partial T}$ 越大,说明温度引起的折射率变化就越明显. 如透光聚合物的热光系数(约为 10^{-4})比玻璃高一个数量级以上,适用于制造温度敏感的器件. 可根据实际测量的具体要求选择适用的透光聚合物. 环氧树脂的折射率随温度变化是透光聚合物中特别明显的一种,本文的计算中将选环氧树脂作为耦合缺陷层. 环氧树脂的参数^[25]如下: 折射率为 1.5122, $\left| \frac{\partial n}{\partial T} \right| = -2.5$.

由图 1(b)可知,耦合缺陷模中含多个子峰,两边沿的子峰频率处的相位随频率变化最剧烈. 利用此最边沿的子峰可获得较高的温度灵敏度,且缺陷层越多,则子峰越密,即灵敏度越高. 所以,本文中用含 10 个耦合缺陷层结构,并用频率最高的子峰的相位特性为例进行研究. 具体的结构为 $(LH)^3D(HL)^3H(LH)^3D(HL)^3H(LH)^3D(HL)^3H(LH)^3D(HL)^3H(LH)^3D \cdots (HL)^8$, 其中 $n_H = 3.3$, $n_L = 1.45$, $n_D = 1.5122$ (环氧树脂的折射率), $n_D d_D = \lambda_0/2$, $n_H d_H = n_L d_L = \lambda_0/4$. 对这一结构计算得到的缺陷模中频率最高的子峰的相位特性如图 2 所示,图中曲线 a 和曲线 b 分别代表缺陷层的折射率改变 0.01% 前后的情况. 图 2 中的相位特性曲线中有一段线性很好,这段呈现很好线性关系的相位特性曲线能很好满足相位温度传感器的要求.

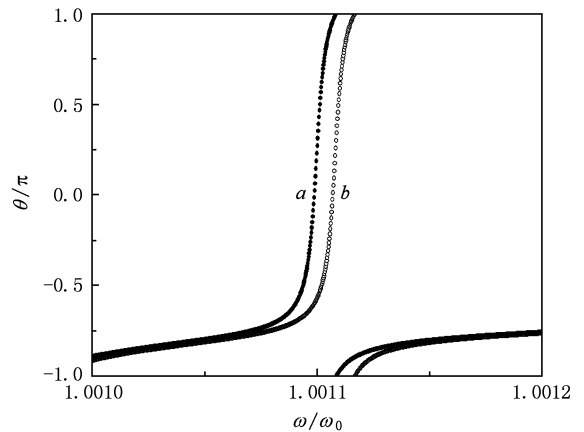


图 2 含 10 个耦合缺陷层结构的频率最高的子峰相位特性

图 3(a)展示了与图 2 相同结构的缺陷模中频率最高的子峰的相位与温度关系,图中 T 为温度.

入射激光频率取图 2 曲线中线性段的中点(即 $\omega/\omega_0 = 1.0010995$), 计算所得线性温度测量范围为 20.42—20.47 °C. 这说明此高灵敏温度传感器的测量范围为 0.05 °C. 如果读取测试数据的仪表的满刻度分 100 格, 该温度传感器的温度分辨率达 5×10^{-4} °C, 远高于其他各类温度传感器的分辨率.

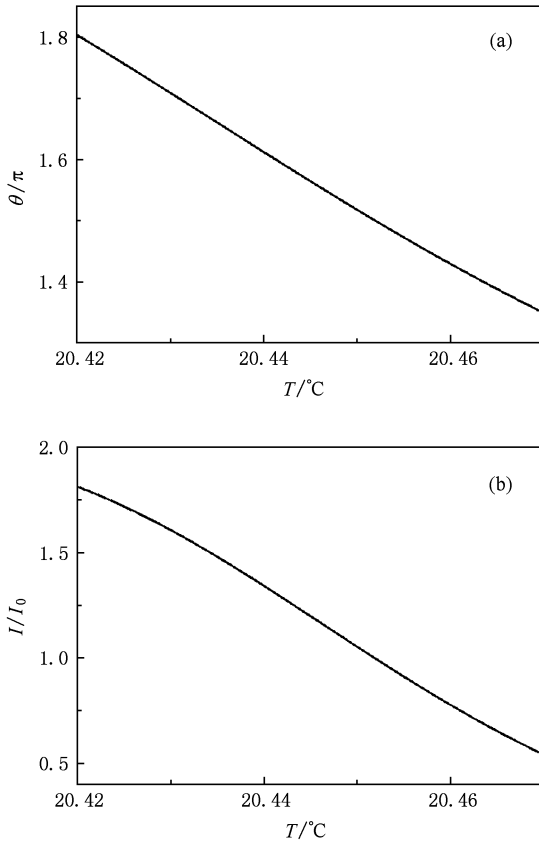


图 3 基于光子晶体相位的温度传感器温度依赖曲线 (a) 相位与温度关系曲线, (b) 用 Michelson 干涉仪结构将相位转换为光强后的光强与温度关系曲线

为了更直观地说明问题, 可设想把一束强度为

I_0 的激光束等分成 B_1 和 B_2 两束, 分别作为 Michelson 干涉仪的两臂的光束, 温度传感器的光子晶体为其中一臂的反射镜, 经温度传感器的光子晶体反射镜的一臂的相移使 B_1 和 B_2 随温度在相增和相消干涉间变化, 即把相位变化转换为光强变化, 所得结果如图 3(b) 所示. 上述计算只作为相位传感器的一个例子, 具体应用时还有更具体或更多问题需要进一步考虑. 例如上述结构和用环氧树脂作为缺陷层时温度测量范围很小, 这可满足超高灵敏度 (高达 5×10^{-4} °C) 的温度传感器的需求, 但满足了超高灵敏度自然就会以损失测量范围为代价. 如果在实际应用中灵敏度无需那么高而测量范围要求大些, 则可通过减少杂质层解决. 如果在某项特殊应用中既要有很高的灵敏度又要有较宽的测量范围, 也可考虑用如下方法解决: 可以设计一种特殊光子晶体, 其杂质层是热敏材料, 而周期层是电场诱变折射率材料, 这样就能用电场分档改变测量范围而实现宽范围测量. 另外, 对高温的测量则要另选材料.

本文只是用一维光子晶体作为一个例子讨论相位传感器. 光子晶体相位传感器也可用二维光子晶体制作, 因而有可集成等优点.

4. 结 论

利用光子晶体不对称结构解决了缺陷模的相位在应用中存在的两大问题(剧烈的光强变化和衬底等的影响)后, 缺陷模的相位能被用于发展传感光子器件. 我们以一维光子晶体相位温度传感器为例, 说明用含耦合缺陷模的不对称结构光子晶体的相位特性制作的高灵敏高分辨率温度传感器的原理适用于发展其他高灵敏传感器.

- [1] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [2] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [3] Noda S, Yokoyama M, Imada M, Chutinan A, Mochizuki M 2001 *Science* **293** 1123
- [4] Wang Z, Fan S H 2005 *Opt. Lett.* **30** 1989
- [5] He Y J, Su H M, Tang F Q, Dong P, Wang H Z 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 892 (in Chinese) [何拥军、苏慧敏、唐芳琼、董鹏、汪河洲 2001 物理学报 **50** 892]
- [6] Wang X, Xu J F, Su H M, Wang H Z, Zen Z H, Chen Y L 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 527 (in Chinese) [王霞、许剑峰、苏慧敏、汪河洲、曾兆华、陈用烈 2002 物理学报 **51** 527]
- [7] Su H M, Zheng X G, Wang X, Wang H Z 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1044 (in Chinese) [苏慧敏、郑锡光、王霞、汪河洲 2002 物理学报 **51** 1044]
- [8] Liang G Q, Han P, Wang H Z 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2197 (in Chinese) [梁冠全、韩鹏、汪河洲 2004 物理学报 **53** 2197]
- [9] Han P, Wang H Z 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 338 (in Chinese) [韩鹏、汪河洲 2005 物理学报 **54** 338]
- [10] Pan J Y, Liang G Q, Mao W D, Wang H Z 2006 *Acta Phys.*

- Sin.* **55** 729 (in Chinese) [潘杰勇、梁冠全、毛卫东、汪河洲 2006 物理学报 **55** 729]
- [11] Zhong Y C, Zhu S A, Wang H Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 688 (in Chinese) [钟永春、朱少安、汪河洲 2006 物理学报 **55** 688]
- [12] Wei Z C, Dai Q F, Wang H Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 733 (in Chinese) [韦中超、戴峭峰、汪河洲 2006 物理学报 **55** 733]
- [13] Zen J, Pan J Y, Dong J W, Wang H Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2785 (in Chinese) [曾 隽、潘杰勇、董建文、汪河洲 2006 物理学报 **55** 2785]
- [14] Wen X W, Dong J W, Wang H Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2781 (in Chinese) [温曼文、董建文、汪河洲 2006 物理学报 **55** 2781]
- [15] Dong J W, Chen Y H, Wang H Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **56** 269 (in Chinese) [董建文、陈溢杭、汪河洲 2006 物理学报 **56** 269]
- [16] Hoo Y L, Jin W, Ho H L, Wang D N 2003 *IEEE Photon. Techn. Lett.* **15** 1434
- [17] Jensen J, Hoiby P, Emiliyanov G, Bang O, Pedersen L, Bjarklev A 2005 *Opt. Express* **13** 5883
- [18] Pickrell G, Peng W, Wang A 2004 *Opt. Lett.* **29** 1476
- [19] Wu D K C, Kuhlmeier B T, Eggleton B J 2009 *Opt. Lett.* **34** 322
- [20] Shi L N, Pottier P, Peter Y A, Skorobogatiy M 2008 *Opt. Express* **16** 17962
- [21] Dai X F, Li Y W, Wang H Z 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 061121
- [22] Wu K S, Dong J W, Wang H Z 2008 *Appl. Phys. B* **91** 145
- [23] Bell R M, Pendry J B, Moreno L M, Ward A J 1995 *Comput. Phys. Commun.* **85** 306
- [24] Klein C A 1990 *Opt. Eng.* **29** 343
- [25] Liu Q, Chiang K S, Lor K P, Chow C K 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 241115

Sensitive temperature sensor based on phase properties of photonic crystal*

Huang Qin Leng Feng-Chun Liang Wen-Yao Dong Jian-Wen Wang He-Zhou[†]

(State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

(Received 19 July 2009; revised manuscript received 6 November 2009)

Abstract

It is revealed in the present paper that the reflectance around the defect mode of one-dimensional defective photonic crystal (PC) in an asymmetric structure approaches to 1, while the phase-shift depends on the number of the coupled-defect layers, i. e., the phase shift is 2π for every sub-peak of the defect mode. When the defect layer is a temperature sensitive material, very small change of temperature will cause a significant phase change. Secondly, it is demonstrated that the relationship of phase and temperature has a linear range. According to the above characteristics, a highly sensitive temperature sensor is designed based on the phase property of photonic crystal. Moreover, this principle of PC phase sensing can be extended to study other sensors, such as the two-dimensional PC, which is suitable for optical integration.

Keywords: photonic crystal, phase, sensor

PACC: 4270Q, 7820P

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10874250, 10674183, 10804131) and the Doctoral Program Foundation of Institution of Higher Education, China (Grant No. 20060558068).

[†] Corresponding author. E-mail: stshwh@mail.sysu.edu.cn