

一维缺陷光子晶体温度的测量^{*}

童 凯^{1)†} 崔卫卫¹⁾ 汪梅婷²⁾ 李志全¹⁾

1) 燕山大学电气工程学院, 秦皇岛 066004)

2) 燕山大学继续教育学院, 秦皇岛 066004)

(2007 年 3 月 28 日收到, 2007 年 5 月 13 日收到修改稿)

采用 Si 和 SiO₂ 两种介质材料构造一维缺陷光子晶体, 缺陷层介质为 Si, 利用传输矩阵法对带有缺陷的一维光子晶体的传光特性进行了理论分析, 并得到其带隙特性. 由于缺陷的存在, 使得光子晶体的透射谱中产生缺陷峰. 当被测温度变化时, 根据两种介质的热光效应和热膨胀效应, 光子晶体介质和缺陷层的光学厚度和折射率发生变化, 透射谱缺陷峰产生漂移, 由缺陷峰的中心波长漂移量得到被测温度的大小. 构建了一维缺陷光子晶体测量温度的实验系统, 实验结果表明缺陷峰中心波长与光子晶体所受的温度呈线性关系, 测量灵敏度为 0.207 nm/°C, 测量范围为 -20—120°C.

关键词: 温度测量, 一维光子晶体, 传输矩阵法, 缺陷峰

PACC: 0720D, 4283

1. 引 言

1987 年 John 和 Yablonovitch 分别提出光子晶体和光子能带的概念^[1-3], 1991 年 Yablonovitch 等人第一次在实验室人工制造出具有完全带隙的三维光子晶体. 随着光通讯和光传感技术的发展, 人们对光子晶体进行了广泛的理论与实验研究^[4-8]. 由于光子晶体带隙的存在, 可以通过设计和调节光子带隙达到控制光子运动的目的, 因此光子晶体在许多方面有着重要的应用, 如光子晶体激光器、光子晶体滤波器^[5]、光子晶体光纤^[9,10]、光子晶体偏振片、光子晶体天线、光子激光二极管等, 这些应用主要集中在光器件的研制与开发上. 同时, 人们利用光子晶体的传光特点, 将其引入到测量领域, 如光子晶体压力传感器^[11]、光子晶体温度传感器、光子晶体扭矩传感器、光子晶体生物传感器等, 拓展了光子晶体的应用领域.

本文基于具有缺陷层的一维光子晶体的缺陷模特性, 构造了一维缺陷光子晶体(Si/SiO₂), 使其缺陷峰值波长控制在近红外. 从 Maxwell 方程出发, 结合光子晶体周期性结构, 采用传输矩阵和谐振腔理论,

分析了一维缺陷光子晶体的光学传输特性和光子晶体及其缺陷的参数对光学传输的影响. 在此基础上, 根据两种介质的热光效应和热膨胀效应, 光子晶体的晶格常数和介质的折射率发生变化, 提出了一种一维缺陷光子晶体温度传感器. 理论分析得出温度的变化使得光子晶体缺陷峰产生漂移. 在此理论指导下, 实验研究了一维缺陷光子晶体的温度特性. 缺陷峰值波长漂移量与被测温度呈线性关系, 若采用相关的增敏措施, 可以进一步提高温度测量的灵敏度.

2. 一维缺陷光子晶体传输特性

一维光子晶体的不同介电材料只在一个方向上呈周期结构, 相当于不同介质组成的多层膜材料. 本文构造了形如(AB)^NA(BA)^NB 的光子晶体(如图 1 所示), A, B 是两种不同的介质, 折射率分别为 n_1 和 n_2 , 厚度分别为 a_1, a_2 , 缺陷层的折射率为 n_3 , 厚度为 a_3 .

设一维光子晶体的周期为 $\Lambda = a_1 + a_2$, 则根据 Floquet 定理, 其电场为

$$E(x, z) = E(x) e^{-i\beta z} e^{-ikx}, \quad (1)$$

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60377002)资助的课题.

[†] E-mail: tongkai0338@sina.com.cn



图 1 一维缺陷光子晶体示意图

其 Bloch 波的周期性条件为

$$\begin{pmatrix} a_n \\ b_n \end{pmatrix} = e^{-ik\Lambda} \begin{pmatrix} a_{n-1} \\ b_{n-1} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

可得 Bloch 波的列矢量满足的本征方程为

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_n \\ b_n \end{pmatrix} = e^{ik\Lambda} \begin{pmatrix} a_n \\ b_n \end{pmatrix}, \quad (3)$$

式中, $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = [D_1 P_1 D_1^{-1} D_2 P_2 D_2^{-1}]$, 且为么模矩

阵. 相位因子 $e^{ik\Lambda}$ 是矩阵 $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$ 的特征值, 即

$$e^{ik\Lambda} = \frac{1}{2}(A + D) \pm \sqrt{\left[\frac{1}{2}(A + D)\right]^2 - 1}. \quad (4)$$

令

$$e^{ik\Lambda} = \frac{1}{2}(A + D) + \sqrt{\left[\frac{1}{2}(A + D)\right]^2 - 1},$$

$$e^{-ik\Lambda} = \frac{1}{2}(A + D) - \sqrt{\left[\frac{1}{2}(A + D)\right]^2 - 1},$$

则特征向量为

$$a_{n\pm} = \frac{B}{\sqrt{B^2 + (e^{\pm ik\Lambda} - A)^2}},$$

$$b_{n\pm} = \frac{e^{\pm ik\Lambda} - A}{\sqrt{B^2 + (e^{\pm ik\Lambda} - A)^2}}.$$

由于有两个不同的特征值, 因此矩阵 $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}^N$ 可以

被对角化, 经计算分析可得^[8]

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}^N = \begin{pmatrix} \frac{A \sin Nk\Lambda - \sin(N-1)k\Lambda}{\sin k\Lambda} & \frac{B \sin Nk\Lambda}{\sin k\Lambda} \\ \frac{C \sin Nk\Lambda}{\sin k\Lambda} & \frac{D \sin Nk\Lambda - \sin(N-1)k\Lambda}{\sin k\Lambda} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

式中, $k\Lambda = \arccos\left[\frac{1}{2}(A + D)\right]$. 则对于具有 N 个周期的两种介质周期分布的一维光子晶体, 其传输矩阵为

$$M = [D_1 P_1 D_1^{-1} D_2 P_2 D_2^{-1}]^N, \quad (6)$$

因此, 若构造图 1 所示形如 $(AB)^N A (BA)^N B$ 的一维缺陷光子晶体时, 其总的传输矩阵为

$$M' = M^N M' M_1^N M_B, \quad (7)$$

式中, M_1 为 $(BA)^N$ 结构同理得到的; M' 为缺陷层传输矩阵; M_B 为介质 B 传输矩阵.

令 $M' = \begin{pmatrix} M'_{11} & M'_{12} \\ M'_{21} & M'_{22} \end{pmatrix}$, 则一维缺陷光子晶体左

右边界介质电场振幅的关系为

$$\begin{pmatrix} A_0 \\ B_0 \end{pmatrix} = M' \begin{pmatrix} A'_g \\ B'_g \end{pmatrix}. \quad (8)$$

假设一维缺陷光子晶体得左右边界介质为空气, 入射波与透射波和介质表面法线方向角为 0° , 即垂直入射和透射. 则其透射系数为

$$t = \frac{2p_1}{(M'_{11} + M'_{12}p_1)p_1 + M'_{21} + M'_{22}p_1}, \quad (9)$$

由于入射波与透射波和介质表面法线方向角为 0° , 所以上式中, $p_1 = \sqrt{\epsilon_1/\mu_1}$, $p_l = \sqrt{\epsilon_l/\mu_l}$ 分别由光子晶体左右边界介质决定.

图 2 为没有缺陷层的一维光子晶体透射谱, 在透射谱的禁带范围内没有缺陷峰. 图 3 为带有 1 个缺陷的一维光子晶体的透射谱. 带有缺陷层的一维

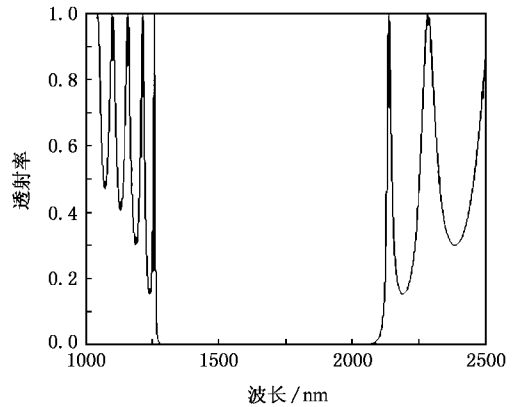


图 2 无缺陷层一维光子晶体透射谱

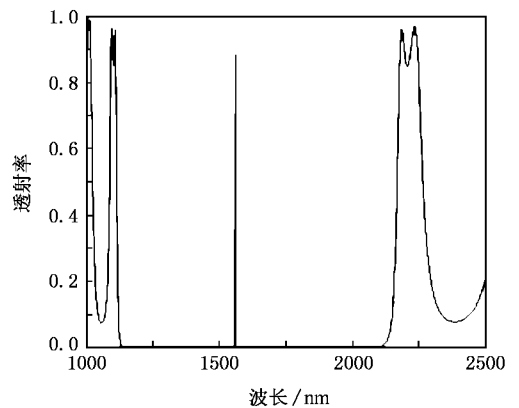


图 3 一维缺陷光子晶体透射谱

光子晶体的禁带中出现带宽极窄的缺陷模,与缺陷模频率相吻合的光子被局域在出现缺陷的位置,偏离缺陷位置时,光强呈现出指数衰减,这是因为缺陷的出现破坏了光子晶体的周期性.

3. 传感理论模型与温度测量系统

根据谐振腔的理论可知,谐振腔内电磁场只能以共振模的形式及其组合的形式存在,谐振腔所有可能的共振频率及其激发的方式构成了谐振腔的频谱,只有谐振模才能从一维缺陷光子晶体传输,形成缺陷模.而共振条件是电磁场在谐振腔内穿透一次的相位移动为 π 的整数倍,即

$$knL + \Delta = m\pi, \quad (10)$$

式中 k 为波数; n 为谐振腔的折射率; L 为谐振腔的长度; m 为整数,是共振模的横向指数; $\Delta = 2\pi q'$. 由上式可得

$$\frac{2nL}{\lambda} = m + 2q'. \quad (11)$$

假设谐振腔边界尺寸为无穷大的平面,则有 $q' = 0$, 因此,可得驻波条件为

$$\lambda = \frac{2nL}{m}, \quad (12)$$

因此,谐振模(即缺陷模)的波长与谐振腔的介质的光学厚度呈正比关系.

对于缺陷层,可以看作作为一个谐振腔,当 $m = 1$ 时,其谐振模的波长为

$$\lambda_1 = 2n_3 a_3. \quad (13)$$

对于一维周期结构光子晶体,根据 Bragg 条件,可得其谐振波长为

$$\lambda_2 = 2n_{\text{eff}} \Lambda, \quad (14)$$

式中 Λ 为一维光子晶体周期; n_{eff} 为其等效折射率.

因此对于一维缺陷光子晶体,只有当 $\lambda_1 = \lambda_2$ 时,才能透射出光子晶体,形成缺陷模,缺陷模波长为

$$\lambda = 2n_{\text{eff}} \Lambda = 2n_3 a_3. \quad (15)$$

(15) 式表征了一维缺陷光子晶体缺陷模波长与光子晶体周期结构、缺陷层的折射率和厚度间的关

系,因此,当上式各参数变化为微小量时,缺陷模波长漂移量为

$$\begin{aligned} \Delta\lambda &= 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda + 2\Lambda\Delta n_{\text{eff}} \\ &= 2n_3\Delta a_3 + 2a_3\Delta n_3, \end{aligned} \quad (16)$$

即

$$\Delta\lambda = 2n_3\Delta a_3 + 2a_3\Delta n_3. \quad (17)$$

当光子晶体所受的温度发生变化时,由于热膨胀效应和热光效应的影响,使得光子晶体各层介质厚度和折射率发生变化,使得缺陷峰波长漂移.在一定的温度范围内,可得缺陷模波长漂移量与被测温度间的表达式为

$$\begin{aligned} \Delta\lambda &= 2n_3\Delta a_3 + 2a_3\Delta n_3 \\ &= 2a_3 n_3(\alpha + \beta)\Delta T, \end{aligned} \quad (18)$$

式中 β 为介质的热光系数; α 为介质热膨胀系数; ΔT 为温度的变化量.

由(18)式可知,一维缺陷光子晶体缺陷峰中心波长的漂移量与被测温度的变化量呈线性关系,为设计基于光子晶体的温度测量奠定了理论基础.

本文设计的一维缺陷光子晶体温度测量实验系统如图 4 所示.由可调谐激光器发出激光,经偏振控制器使入射到光子晶体的光为偏振光,调节单模锥形光纤和准直器使入射到光子晶体的入射光为平行光,且垂直入射.单模锥形光纤和输出多模光纤固定在两个准直器上,通过观察光功率计来调节准直器的三个轴位置,直到光功率计得到最大功率时停止校正.当被测温度发生变化时,光子晶体透射谱中心波长产生漂移,通过光谱仪可以监测到此波长的漂移.

实验时,增加了一个显微镜用于初级校正光路中各元件和装置,系统中的准直器、可调谐激光器、偏振控制器等装置都是由计算机控制.

4. 实验与结果分析

实验中,为了得到 SiO_2 和 Si 介质周期分布的一维缺陷光子晶体,采用等离子体增强化学气相沉积法隔层沉积 Si 和 SiO_2 介质,通过严格控制沉积时间

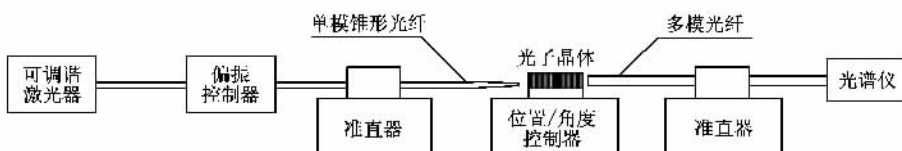


图 4 一维缺陷光子晶体温度测量实验系统

来得到不同厚度的介质层. 由于需要避免 SiO_2 的分解, 实验温度控制在 250°C , 在此温度下, SiO_2 的生长速度为 40 nm/s , Si 的生长速度为 20 nm/s , 缺陷层介质为 Si , 其沉积时间为周期结构中 Si 介质沉积时间的 2 倍. 制作光子晶体样品时, 选择 SiO_2 作为基底, 是因为一维光子晶体中传输时, 会产生多次反射影响了相干条件, 需要选择高透射率、低反射率的基底.

样品介质 Si 和 SiO_2 厚度分别为 120 nm 和 265 nm 左右, 缺陷层厚度为 240 nm ; 在测温范围内, Si 和 SiO_2 的热光系数分别为 $1.86 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ 和 $6.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$; 热膨胀系数分别为 $2.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 和 $0.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$. 两介质层光学厚度相等为 $n_1 a_1 = n_2 a_2 = \lambda_0/4$, 缺陷层光学厚度为 $na = \lambda_0/2$, 中心波长选择 1550 nm . 被测温度变化引起缺陷峰中心波长漂移, 图 5 所示为 $0, -20$ 和 60°C 时, 光谱仪测得的光子晶体透射谱图, 图中三条谱线作了简单处理.

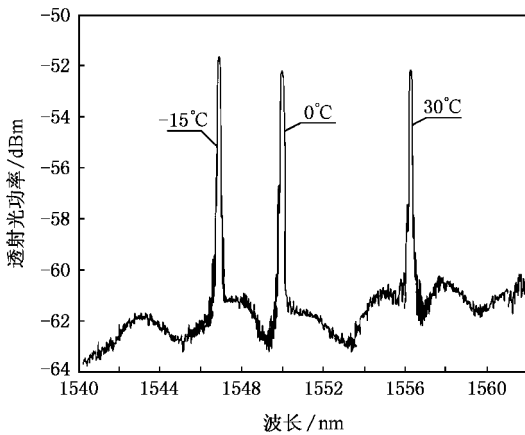


图 5 不同温度下光子晶体透射谱图

由图 5 可知, 0°C 时, 缺陷峰中心波长为 1550 nm ; -15°C 时, 缺陷峰向左漂移, 缺陷峰中心波

长为 1547.93 nm , 波长漂移量为 $\Delta\lambda = -2.07\text{ nm}$; 30°C 时, 缺陷峰向右漂移, 缺陷峰中心波长为 1556.19 nm , 波长漂移量为 $\Delta\lambda = 6.19\text{ nm}$. 实验中, 测量温度范围为 $-20\text{—}120^\circ\text{C}$, 温度每改变 10°C , 记录一次缺陷峰的中心波长, 得到温度与缺陷峰中心波长关系如图 6 所示.

由图 6 可以看出, 被测温度与一维缺陷光子晶体的缺陷峰中心波长间为线性关系, 这与式(18)是完全一致的, 测量的灵敏度 $k = \Delta\lambda/\Delta T = 0.207\text{ nm}/^\circ\text{C}$, 测温范围为 $-20\text{—}120^\circ\text{C}$.

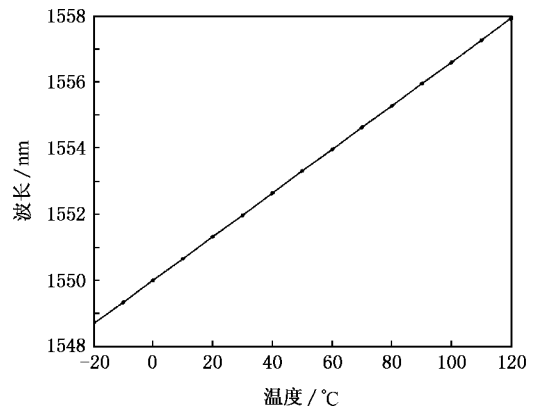


图 6 温度与缺陷峰中心波长的关系

5. 结 论

本温度测量实验系统中, 从构成一维缺陷光子晶体介质的热膨胀效应和热光效应出发, 得出被测温度的变化引起光子晶体缺陷峰的漂移, 而且缺陷峰中心波长与被测温度间呈线性关系. 因此, 可以通过测量缺陷峰中心波长来得到被测温度的大小. 本文给出的仅是一维缺陷光子晶体测量温度的实验方案, 若实际应用时, 应在光路设计、波长解调、实时测量及增敏结构等方面需要作进一步的工作.

[1] John S 1984 *Phys. Rev. Lett.* **53** 2169

[2] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486

[3] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059

[4] Zhang B 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5677 (in Chinese) [张波 2005 物理学报 **54** 5677]

[5] Liu X Y 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 189 (in Chinese) [刘新芽 2000 物理学报 **49** 189]

[6] Bai N F, Liu X, Xiao J B, Zhang M D, Sun X H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4933 (in Chinese) [柏宁丰、刘旭、肖金标、张明德、孙小菡 2005 物理学报 **54** 4933]

[7] Yu T B, Wang M H, Jiang X Q, Yang J Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1851 (in Chinese) [于天宝、王明华、江晓清、杨建义 2006 物理学报 **55** 1851]

[8] Feng Z F, Wang Y Q, Feng S, Cheng B Y, Zhang D Z 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1583 (in Chinese) [冯志芳、王义全、冯帅、程丙英、张道中 2005 物理学报 **54** 1583]

[9] Zhao Y T, Hou L T, Liu Z L, Wang W, Wei H Y, Ma J R 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2275 (in Chinese) [赵兴涛、侯蓝田、刘兆伦、王伟、魏红彦、马景瑞 2007 物理学报 **56** 2275]

- [10] Li S G , Liu X D , Hou L T 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1880 (in Chinese) [李曙光、刘晓东、侯蓝田 2004 物理学报 **53** 1880]
- [11] Xu Z Y , Zhang R J , Gong Y L 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 724 (in Chinese) [许震宇、张若京、龚益玲 2004 物理学报 **53** 724]

Temperature measurement with one dimensional defect photonic crystal^{*}

Tong Kai¹† Cui Wei-Wei¹ Wang Mei-Ting² Li Zhi-Quan¹

1) (College of Electrical Engineering , Yanshan University , Qinhuangdao 066004 , China)

2) (College of Continue Education , Yanshan University , Qinhuangdao 066004 , China)

(Received 28 March 2007 ; revised manuscript received 13 May 2007)

Abstract

Si and SiO₂ were used as materials to build the one-dimension (1D) defect photonic crystal and the medium of defect layer is Si. Using transfer matrix method , the optical transmission properties in 1D defect photonic crystals was analyzed , and the band gap property of 1D photonic crystal was obtained . Because of the defect , the defect peak appears in the transmission spectra . According to thermo-optical effect and thermal-expansion effect the optical depth and index of the materials and the defect of photonic crystal vary when the temperature changes . So the temperature can be measured by the wavelength shift value of the defect peak . Using 1D defect photonic crystal an experimentation system was set up for temperature measurement . The result showed that there is a linear relationship between the temperature of photonic crystal and the wave-length of the peak . And the sensitivity of this measuring system is 0.207 nm/°C and the measurement range is -20—120°C .

Keywords : temperature measurement , one dimensional photonic crystal , transfer matrix method , defect peak

PACC : 0720D , 4283

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60377002).

† E-mail : tongkai0338@sina.com.cn