

文章编号: 0258-7025(2007)06-0837-04

一维光子晶体的应变测量

童 凯, 崔卫卫, 李志全

(燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 采用 ZnSe 和 Na_3AlF_6 两种经典介质材料构造一维光子晶体, 缺陷层介质为 Na_3AlF_6 。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。分别数值研究了参考光子晶体以及应变前后测量光子晶体的透射谱, 分析结果表明光子晶体所受的纵向应变与其缺陷峰波长之间呈线性关系, 根据这种对应关系提出了一种新的测量应变的方法。由于粘贴光子晶体的基底与光子晶体的线膨胀系数不同, 且温度变化也会引起构成光子晶体材料折射率的变化, 导致光子晶体透射谱缺陷峰波长的漂移。为了消除温度误差, 在测量光路中设置了与测量光子晶体结构相同的参考光子晶体, 对温度的影响进行了补偿。实验表明, 测量系统的灵敏度为 $6 \times 10^{-4} \text{ nm}/\mu\epsilon$, 测量范围为 $0 \sim 2000 \mu\epsilon$ 。

关键词 光纤光学; 一维光子晶体; 传输矩阵法; 应变; 缺陷

中图分类号 TN 253 **文献标识码** A

Strain-Measurement of One-Dimensional Photonic Crystal

TONG Kai, CUI Wei-wei, LI Zhi-quan

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

Abstract ZnSe and Na_3AlF_6 as two classical materials are composed of one-dimensional (1D) photonic crystal, and the medium of the defect is Na_3AlF_6 . Using transfer matrix method, the optical transmission properties in 1D photonic crystals with defect is analyzed, and the band gap property of 1D photonic crystal is obtained. The transmission spectra of reference photonic crystal and measurement photonic crystal with or without adding strain is simulated numerically. The analysis shows that it is linear relationship between the longitudinal strain and wavelength of the peak of band gap. According to the corresponding relation, a new method of strain measurement is presented. The wavelength of the peak of band gap can shift because the linear expansion coefficient between substrate and photonic crystal is not equal and the medium reflection index varies along with the temperature. In order to compensate temperature error, a reference photonic crystal having the same structure as the measurement photonic crystal is introduced in the measurement system. And the temperature compensation with a reference photonic crystal is realized. The results show that the sensitivity of this measuring system is $6 \times 10^{-4} \text{ nm}/\mu\epsilon$ and the measurement range is $0 \sim 2000 \mu\epsilon$.

Key words fiber optics; one-dimensional photonic crystal; transfer matrix method; strain; defect

1 引言

光子晶体是介质或金属材料在空间呈周期性变化的新型微结构材料。周期性结构的存在, 使得光子晶体具有光子能带结构, 且带与带之间存在带隙^[1,2], 使得频率落在带隙内的电磁波无法继续传播^[3,4], 这是光子晶体的一个最基本的特征。

在光子晶体中掺入杂质或使其结构具有缺陷

时, 将在光子禁带中产生相应的缺陷能级, 在带隙中将出现局域态。

由于光子晶体能够控制光在其中的传播, 所以其应用十分广泛, 主要有高性能反射镜、宽带带阻滤波器、极窄带选频滤波器^[5]、光子晶体偏振片、光子晶体微腔、光子晶体光纤、光子晶体发光二极管、激光器等。本文提出了一种基于一维光子晶体的应变传感器, 利用传输矩阵法研究了纵向应变情况下光

收稿日期: 2006-11-06; 收到修改稿日期: 2006-12-31

作者简介: 童 凯(1973—), 男, 安徽人, 讲师, 目前研究方向为光电检测与光纤传感技术。

E-mail: tongkai0338@sina.com.cn

子晶体带隙特性随应变的变化。由于对基底直接施加应力,所以可视光子晶体的应变为均匀应变,而不用考虑弹性模量的影响。同时,引入了相同参数的一维光子晶体作为参考,消除温度以及其他因素引起的误差。

2 一维光子晶体的带隙结构

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。一维光子晶体具有设计简单、成本低、精度高的特点,可以将晶体的晶格常数做到可见光波长量级,且一维光子晶体也具有全方位的带隙结构。

实验中构造了形如 $(AB)^m A(AB)^m$ 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_1 ,厚度为 a_3 。

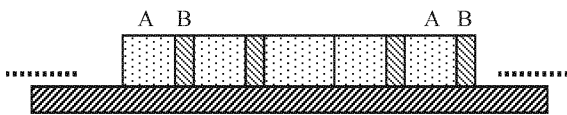


图 1 带缺陷的一维光子晶体示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 1D photonic crystal with defect

由光学传输矩阵理论可知,第 j 层的特征矩阵为

$$\begin{pmatrix} \cos\delta_j & -\frac{i}{p_j} \sin\delta_j \\ -ip_j \sin\delta_j & \cos\delta_j \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中 $p_j = \sqrt{\epsilon_j/\mu_j} \cos\theta_j$ 。一个基本周期的传输矩阵可表示为

$$\mathbf{M}_0 = \begin{pmatrix} \cos\delta_1 & -\frac{i}{p_1} \sin\delta_1 \\ -ip_1 \sin\delta_1 & \cos\delta_1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos\delta_2 & -\frac{i}{p_2} \sin\delta_2 \\ -ip_2 \sin\delta_2 & \cos\delta_2 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

对于图 1 中有一个缺陷层的光子晶体而言,整个光子晶体的传输矩阵可表示为

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_0^m \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_0^m = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

式中 \mathbf{M}_1 为缺陷层的特征矩阵。

由此可以得到该光子晶体的反射系数 r 及透射系数 t

$$r = \frac{m_{11} p_1 + m_{12} p_1 p_L - m_{21} - m_{22} p_L}{m_{11} p_1 + m_{12} p_1 p_L + m_{21} + m_{22} p_L}, \quad (4)$$

$$t = \frac{2 p_1}{m_{11} p_1 + m_{12} p_1 p_L + m_{21} + m_{22} p_L}, \quad (5)$$

式中 $p_1 = \sqrt{\epsilon_1/\mu_1} \cos\theta_1$, $p_L = \sqrt{\epsilon_L/\mu_L} \cos\theta_L$, $\epsilon_1, \mu_1, \epsilon_L, \mu_L$ 分别与为光子晶体的左右边界介质的介电常量和磁导率; θ_1 和 θ_L 分别为光子晶体的入射波和透射波方向与介质表面法线之间的夹角。

光子晶体的透射率为

$$T = |t|^2. \quad (6)$$

图 2 为带有一个缺陷的一维光子晶体的透射谱。带有缺陷的一维光子晶体的禁带中会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^[6]。当光子晶体受应变时,其晶格常数发生变化,引起各层介质厚度发生变化,使得缺陷峰波长漂移。

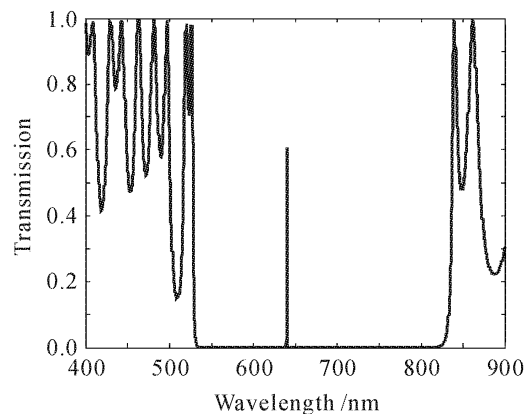


图 2 带有缺陷的一维光子晶体的透射谱

Fig. 2 Transmission spectrum of 1D photonic crystal with defect

3 测量系统实验结构

根据弹光效应,实验中施加的最大应变 $2000 \mu\epsilon$ 时,介质折射率变化为 10^{-4} 数量级,测量光子晶体透射峰中心波长漂移由于折射率变化引起的相对误差约为 0.7% 。因此可以假设光子晶体的介质 ZnSe 和 Na_3AlF_6 是各向同性的弹性材料,并且受应变后其介电性能不发生改变。

一维光子晶体应变测量实验系统如图 3 所示。ASE 为宽带光源,OSA 为光谱仪。在测量光路中布置两个相同参数的光子晶体,其中一个用于测量,同时受温度和应变影响;另一个用于温度补偿,只受温度影响,因为在 $0 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $0\% \sim 1\%$ 应变的测量范围内,忽略应变-温度交叉灵敏度影响,可以认

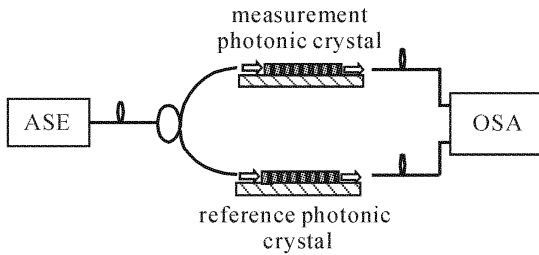


图 3 应变测量系统实验结构

Fig. 3 Experimental setup for strain measuring system

为应变和温度对波长的影响是独立的可以线性叠加的。

测量光子晶体粘贴在等强度梯形悬臂梁上,在自由端加上砝码,分析出粘贴光子晶体处的应变大小。由于光子晶体的几何尺寸非常小,因此,假定作用在光子晶体上的应变沿纵向是均匀的。参考光子晶体同样粘贴在同一温度场中的另一个悬臂梁上,不施加砝码,因此参考光子晶体仅受到温度的作用。

宽带光经耦合器分别作用在测量光子晶体和参考光子晶体上,测量光子晶体输出光波长受到被测应变和温度的作用产生漂移,参考光子晶体输出光波长仅受温度的影响产生漂移,经过光谱仪分析得到波长的变化,进而得出应变的大小。

4 实验及结果分析

实验中,选取 ZnSe 和 Na_3AlF_6 这两种介质材料制作一维光子晶体,其折射率分别为 2.58 和 1.35,取两介质层光学厚度相等为 $n_1 a_1 = n_2 a_2 = \lambda_0/4$ 。在硅基底上沉积几何厚度分别为 63 nm 和 120 nm 的 ZnSe 和 Na_3AlF_6 ,缺陷层介质为 Na_3AlF_6 ,厚度为 350 nm,中心波长选择 650 nm^[7]。假设材料为非磁性的,即 $\mu = 1$,且介质为均匀介质,入射波(TE 波)垂直入射。

在纵向均匀应变情况下,一维光子晶体透射谱的中心波长产生漂移,为了更清楚地观察波长的漂移,仅解调透射峰中心波长附近的透射谱。实验中,环境温度增加 10 °C,测量光子晶体所受的应变为 500 $\mu\epsilon$,光子晶体透射谱中心波长与应变间的关系如图 4 所示,测量光子晶体的透射谱中心波长产生的漂移远大于仅有温度作用的参考光子晶体透射谱中心波长的漂移。

在悬臂梁改变砝码的重量,从而达到改变测量光子晶体所受应变的目的。根据不同应变时,光子晶体透射谱中心波长的漂移,得到光子晶体所受应

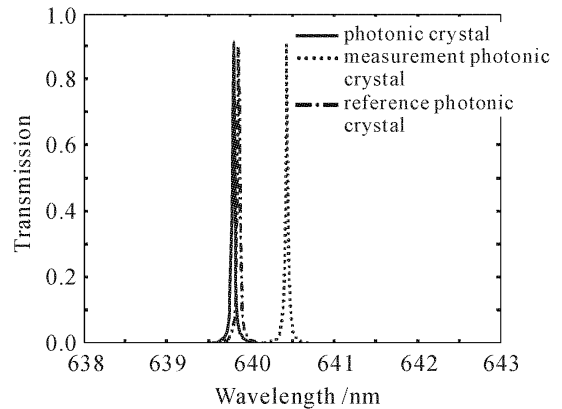


图 4 光子晶体透射谱

Fig. 4 Transmission spectra of photonic crystal

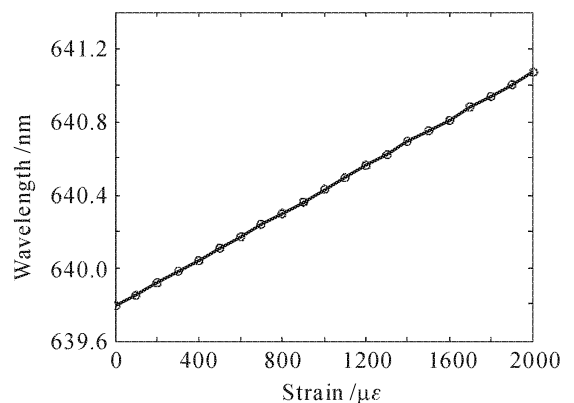


图 5 应变和缺陷峰对应波长的关系曲线

Fig. 5 Strain versus wavelength of peak of transmission spectra

变与中心波长间的关系,如图 5 所示。可知被测应变在 0~2000 $\mu\epsilon$ 范围内应变与缺陷峰对应的波长之间呈线性关系,且测量灵敏度为 6×10^{-4} nm/ $\mu\epsilon$,测量应变范围为 0~2000 $\mu\epsilon$ 。

5 结 论

本文系统中,应变作用使得输出光缺陷峰发生漂移,而且与缺陷峰对应波长之间呈线性关系,因此,可以通过测量对应波长来得到应变的大小。另外,传感器的测量范围受所选材料的限制,材料的介电常量比越大,禁带越宽,测量范围越大。在实际应用中,由于光谱仪的价格昂贵,并且只能给出某时刻光子晶体的输出光谱,不能对高频动态应变进行实时分析,因此,可采用可调滤波器对光子晶体输出光波长漂移量进行解调,这是需要进一步完成的工作。

参 考 文 献

- 1 Fang Yuntuan, Shen Tinggen, Tan Xilin. Study on one-dimensional photonic crystal with impurity defects [J]. *Acta*

Optica Sinica, 2004, **24**(11):1557~1560
方云团,沈廷根,谭锡林. 一维光子晶体掺杂缺陷模研究[J]. 光学学报, 2004, **24**(11):1557~1560

2 Gu Guochang, Li Hongqiang, Chen Hongtao *et al.*. Properties of light propagation in 1-D periodic dielectric structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(6):728~733
顾国昌,李宏强,陈宏涛等. 一维光子晶体材料中的光学传输特性[J]. 光学学报, 2000, **20**(6):728~733

3 Sajeev John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23):2486~2490

4 Eli Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20):2059~2062

5 Ouyang Zhengbiao, Li Jingzhen, Zhang Daozhong *et al.*. Investigations on multi-layer photonic-crystal optical-filters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1):79~84
欧阳征标,李景镇,张道中等. 多层光子晶体滤波器研究[J]. 光学学报, 2002, **22**(1):79~84

6 Lou Shuqin, Wang Zhi, Wang Muguang *et al.*. Research on the transmission properties of the photonic crystal and application in optical sensors [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2003, **14**(11):1152~1156
娄淑琴,王智,王目光等. 一维光子晶体传输特性及其在光传感器中的应用[J]. 光电子·激光, 2003, **14**(11):1152~1156

7 Xu Zhenyu, Zhang Ruojing, Gong Yiling. The principles of pressure sensors based on photonic crystal [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(3):724~727
许震宇,张若京,龚益玲. 光子晶体压力传感器的基本原理[J]. 物理学报, 2004, **53**(3):724~727



• 新书推荐

《科学研究的途径》——一个指导老师的札记

本书是作者作为一个指导教师在近 30 年的研究生指导实践中写下的有关研究生学习和科学方法的札记。诸凡青年学人,特别是研究生在学习与科学研究过程中的科学探索,为人与治学,以及论文写作方法等,著者都以亲身的经历阐述自己的认识和体会。其中很多内容都是应青年研究生的要求撰写的,非常符合青年学人的实际需要,能帮助初涉科研的青年学人较快地熟悉科研过程及方法,及早多出成果,出好成果。本书作为有志于从事科学研究的理工科大学生、研究生、青年教师和青年科技人员的一本参考书,将对青年学人成长为学者起到辅助作用,使他们在从事科学研究时少走些弯路。同时,它也是研究生指导教师交流指导心得的一个平台。另外,本书实际上也是一本论述科学方法的科普读物。

作者简介 周立伟,电子光学和光电子成像专家。北京理工大学首席专家、教授、博士生导师;中国工程院院士,俄罗斯联邦工程科学院外籍院士。长期在宽束电子光学、光电子成像领域从事教学与科研工作,研究成果曾多次获部和国家科技进步奖励。

本书由北京理工大学出版社出版,16 开,定价:25 元。

联系人:郑京华
地址:北京理工大学出版社人文社科事业部
邮编:100081
手机:13810624594
办公电话:010-68945381
电子邮件:caizhengjinghua@126.com

