

文章编号: 0258-7025(2010)11-2829-05

砷化镓石墨点阵柱状光子晶体传感器的应力特性

李 岩 傅海威 甄艳坤 李晓莉

(西安石油大学理学院, 陕西 西安 710065)

摘要 利用时域有限差分(FDTD)程序计算了二维砷化镓石墨点阵柱状光子晶体的能带。结果表明,这种二维石墨点阵柱状光子晶体在 0.53~0.58 的归一化频率区间有一个完全光子带隙。基于此,构造了一种二维砷化镓石墨点阵柱状光子晶体应力传感器的模型,利用 FDTD 方法,计算了传感器共振腔 TE_y 模的共振峰波长沿 x 轴方向和 y 轴方向应力变化的情况,以及共振峰波长随应力环境变化的情况。计算结果表明,传感器共振峰波长随应力环境变化具有很好的线性特性,其应力响应灵敏度为 0.0111 nm/MPa;这种石墨点阵柱状光子晶体传感器沿 x 轴方向和 y 轴方向的应力响应灵敏度相同。

关键词 传感器;弹光效应;光子晶体;时域有限差分法;砷化镓

中图分类号 TP212.14; O411.3 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103711.2829

Stress Characteristic of Photonic Crystals Sensor Made by GaAs Pillars in Air with Graphite Lattice

Li Yan Fu Haiwei Zhen Yankun Li Xiaoli

(School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract The photonic energy bands of the two-dimensional photonic crystal made by GaAs pillars in air with graphite lattice is calculated by finite difference time domain (FDTD) method. The result shows that there is a complete photonic band gap in the normalized frequency zone between 0.53 to 0.58 within this kind of photonic crystal. Based on it, a model of two-dimensional photonic crystals stress sensor made by GaAs pillars in air with graphite lattice is designed. The TE_y mode formant wavelength of the sensor resonant cavity changing along with x and y directions stress and the stress environment are calculated by FDTD method. The result shows that there is a good linear characteristic between the formant wavelength and the stress, the sensor sensitivity responding to stress is 0.0111 nm/MPa, meanwhile, it is found that the sensor sensitivities along x and y directions are the same.

Key words sensors; elasto-optical effect; photonic crystals; finite difference time domain method; GaAs

1 引 言

自 E. Yablonovitch^[1] 和 S. John^[2] 在 20 世纪 80 年代末提出光子晶体的概念后,这种人造结构材料所具有的独特性质引起了科研工作者的广泛关注,并在波导和低阈值激光器等领域得到了广泛的应用^[3~5]。随着研究工作的深入,这种人造材料的各种新特性及应用,如光子晶体在天线、滤波器、放大器、透镜和棱镜等方面的应用,也逐渐为科研工作者所发现^[6~11]。而随着近年来半导体制造技术的进

步,利用半导体的相关制备技术,如等离子体刻蚀和化学刻蚀等方法,科研工作者已能方便地制备光频范围内的二维光子晶体,这使得光子晶体这种新型材料更加具备了现实的意义。光子晶体传感器是近年来光子晶体的一个新的研究方向。利用光频范围内的光子晶体体积小、便于集成和高敏感光谱特性的优势,科研工作者讨论了这种新型传感器在生物学测量和应力应变测量等方面的应用^[12~18]。由于应力应变传感技术对石油工业中的井下压力监测、

收稿日期: 2010-04-27; 收到修改稿日期: 2010-07-20

基金项目: 西安石油大学博士启动基金(YS29030417)和陕西省自然科学基金(2010JM8006)资助课题。

作者简介: 李 岩(1967—),男,博士,副研究员,主要从事电磁场计算和光子晶体等方面的研究。

E-mail: liyan67@xsyu.edu.cn

长输管线应变监测有着特别重要的意义,而未来传感测量集成化和网络化的趋势则更使对这种新型光子晶体传感器的研究无论是在理论上还是在实践中都有着非常重要的意义。

本文建立了一种二维 GaAs 石墨点阵柱状结构的光子晶体应力传感器模型,在考虑材料的弹光效应及应变特性的情况下,利用时域有限差分(FDTD)方法讨论了这种传感器的共振波长随应力变化的情况。

2 模 型

二维石墨点阵柱状光子晶体是由 GaAs 柱按照石墨点阵的空间结构在空气背景的二维平面内周期排列构成的。由于光子晶体波导中传输的光波长为 1550 nm,因而,GaAs 的相对介电常数取为 $\epsilon_r = 12.18^{[19]}$ 。

图 1 中的 TM 图为二维石墨点阵柱状光子晶体 TM_y 模的能带图,即磁场平行于介质柱方向时的能带图,其中的插图为二维石墨点阵柱状光子晶体的单胞;而图 1 中的 TE 图为二维石墨点阵柱状光子晶体 TE_y 模的能带图,即电场平行于介质柱方向时的能带图。图中频率单位取 $\omega a / (2\pi c)$,其中 a 为光子晶体的点阵常数, c 为真空中的光速,GaAs 柱半径为 $r = 0.25a$ 。由图 1 可见,该二维石墨点阵柱状光子晶体有一个完全带隙。当 $a = 854.8 \text{ nm}$, $r = 213.7 \text{ nm}$ 时,该完全带隙处于 1479.1~1628.0 nm 之间。

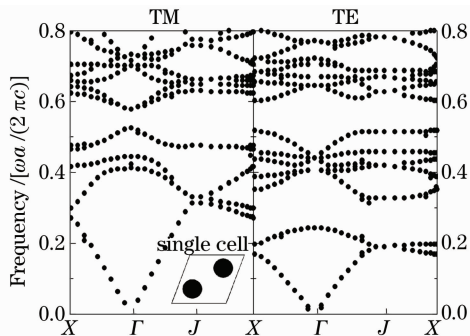


图 1 二维石墨点阵柱状光子晶体 TM 模和 TE 模能带图
Fig. 1 TM and TE mode photonic bands of two-dimensional pillars photonic crystals with graphite lattice

这样,利用上述点阵结构数据,可以构造一个在 1479.1~1628.0 nm 之间具有完全带隙的二维石墨点阵柱状光子晶体。而沿 Γ - J 方向取消 4 排 GaAs 柱则可以构造一个光子晶体波导。选择取消

4 排 GaAs 柱来构造直波导的原因在于,这种波导结构可以允许在 1479.1~1628.0 nm 波长之间有一个较宽的光谱通过范围。而光子晶体共振腔的构造则是通过在二维石墨点阵柱状光子晶体中加入一个半径 $r = 0.45a$ 的 GaAs 柱构成的,计算同样表明, $r = 0.45a$ 的 GaAs 柱所构成的共振腔具有较优越的共振模。这样,即可利用 GaAs 柱构成一个二维光子晶体传感器的模型,如图 2 所示。

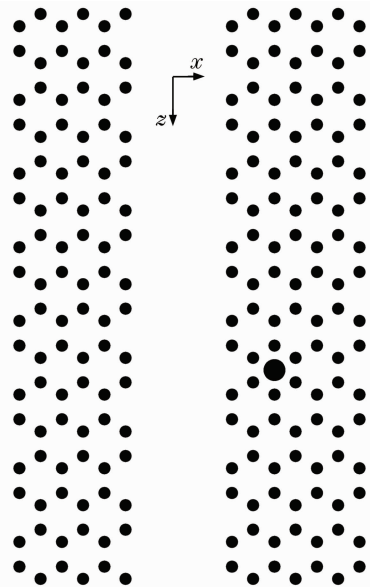


图 2 二维石墨点阵柱状光子晶体传感器模型
Fig. 2 Sensor model of the two-dimensional pillars photonic crystals with graphite lattice

3 理 论

当电磁波在线性、非磁性无耗电的平面各向异性介质中传输时,对于 TE_y 模,麦克斯韦方程组可以写成分量形式^[20]

$$\begin{cases} \frac{\partial E_y}{\partial z} = \mu_0 \frac{\partial H_x}{\partial t} \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} = -\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial t} \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} = \frac{\partial D_y}{\partial t} \end{cases}, \quad (1)$$

平面各向异性介质的电磁性质方程可以写为 $\epsilon_0 \mathbf{E} = \boldsymbol{\beta} \cdot \mathbf{D}$,其中 $\boldsymbol{\beta}$ 为平面各向异性介质的逆介电张量,它是一个二阶对称张量。

介质在受到应力作用时会产生应变。在直角坐标系下,应力及应变可用二阶对称张量表示,由胡克定律可知,应力和应变满足关系

$$\mathbf{S}_M = s_{MN} \mathbf{T}_N, \quad (M, N = 1, 2, \dots, 6) \quad (2)$$

式中 $T_1 = \sigma_x, T_2 = \sigma_y, T_3 = \sigma_z; S_1 = \epsilon_x, S_2 = \epsilon_y, S_3 = \epsilon_z$ 分别为沿 x, y, z 方向的正应力及正应变; $T_4 = \tau_{yz} = \tau_{zy}, T_5 = \tau_{xz} = \tau_{zx}, T_6 = \tau_{xy} = \tau_{yx}; S_4 = \gamma_{yz} = \gamma_{zy}, S_5 = \gamma_{xz} = \gamma_{zx}, S_6 = \gamma_{xy} = \gamma_{yx}$ 分别为剪应力及剪应变; 而 s_{MN} 为弹性顺服系数矩阵, 它们随晶体的对称操作的不同而不同。

介质在受到应力的作用时也会产生弹光效应。若仍用(2)式表示逆介电张量, 在一级近似下, 逆介

电张量的改变量与应力之间的关系表示为

$$\Delta\beta_M = \Pi_{MN} T_N, (M, N = 1, 2, \dots, 6) \quad (3)$$

式中若 β_M 和 β_M^0 分别为施加和未施加应力作用时的逆介电张量, 则 $\Delta\beta_M = \beta_M - \beta_M^0$ 。 Π_{MN} 为压光系数矩阵。

由文献[21]可知, 属于立方晶系的 GaAs, 其弹性顺服系数矩阵 s 和压光系数矩阵 Π 可以写为

$$s_{MN} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{12} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{12} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{12} & s_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} \end{bmatrix}, \Pi_{MN} = \begin{bmatrix} \Pi_{11} & \Pi_{12} & \Pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \Pi_{12} & \Pi_{11} & \Pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \Pi_{12} & \Pi_{12} & \Pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \Pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Pi_{44} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

由弹性劲度系数矩阵 C 与 s 之间的互逆关系, 以及压光系数矩阵和弹光系数矩阵与弹性顺服系数矩阵之间所满足的关系 $\Pi_{MN} = P_{MR} s_{RN}$, 可以得到 GaAs 的弹性顺服系数和压光系数, 如表 1 所示。

表 1 GaAs 弹性顺服系数和压光系数

Table 1 Elasticity obedience coefficient and piezo-optical coefficient of GaAs

	$M=N=1$	$M=1$ $N=2$	$M=N=4$
Elasticity obedience coefficient			
$s / (10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{N}^{-1})$	11.696	-3.641	16.835
Piezo-optical coefficient			
$\Pi / (10^{-13} \text{ N}^{-1})$	-9.102	-5.267	-12.121

4 计算及结果讨论

由于实际的二维石墨点阵柱状光子晶体传感器是通过在 GaAs 介质层上按石墨点阵的空间结构刻蚀出 GaAs 柱构成的, 而在模拟计算中仅取了该结构的一个二维平面, 如图 2 所示。这样, 当应力作用在 x 方向时, 实际仅作用在 GaAs 介质层上, 其结构的变化可按照(1)~(4)式给出。因此, 对于图 2 的二维光子晶体传感器模型的计算作如下的假定: 首先, 假定该传感器只受到了沿 x 和 y 方向正应力的作用, 而不考虑相应剪应力的作用; 其次, 假定传感器介质折射率椭球的主轴坐标系与图 2 的坐标系重合; 最后, 假定当传感器中 GaAs 柱受到沿 x 方向正应力的作用时, 这种应力作用会引起 GaAs 柱位置

的变化, 但不会引起 GaAs 柱形状的改变, 同时, 也不会引起 GaAs 柱的弹光效应; 而当传感器受到沿 y 方向正应力的作用时, 这种应力作用不但会引起 GaAs 柱位置的变化, 而且也会引起 GaAs 柱形状的改变, 同时, 该应力作用还会引起 GaAs 柱的弹光效应。

在上述条件下, 当给石墨点阵柱状光子晶体传感器加入高斯光束的调制高斯脉冲入射源时, 利用 FDTD 方法计算了传感器共振腔 TE_y 模的共振峰波长随应力变化的情况, 计算结果如图 3~5 所示。其中图 3, 4 的横轴分别为沿 x, y 方向应力的变化, 图 5 横轴为应力环境, 即外部应力同时作用于传感器的 x 和 y 方向, 图 3~5 的纵轴为共振峰的波长。图中的虚线为计算数据的线性拟合曲线。

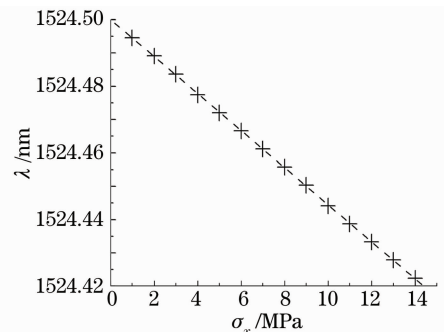


图 3 共振峰波长随 x 方向应力的变化

Fig. 3 Formant wavelength versus x direction stress

由图 3 的计算数据所得到的线性拟合曲线为 $\lambda = -0.00556\sigma_x + 1524.5001$, 其标准偏差为 0.0002。其中拟合直线斜率和截距的误差分别为 0.00002 和

0.0001。可见,传感器共振腔中共振峰的波长沿 x 方向的应力是线性变化的,且其线性度非常好。

由图 4 中的计算数据所得到的拟合曲线为 $\lambda = -0.00556\sigma_y + 1524.4786$,其标准偏差也为 0.0002,拟合直线斜率和截距的误差分别为 0.00002 和 0.0001。由此可以得到与图 3 同样的结论。而由线性拟合曲线的斜率不难发现,当应力作用于传感器上时,无论是沿 x 方向还是沿 y 方向,传感器的灵敏度均为 0.00556 nm/MPa。

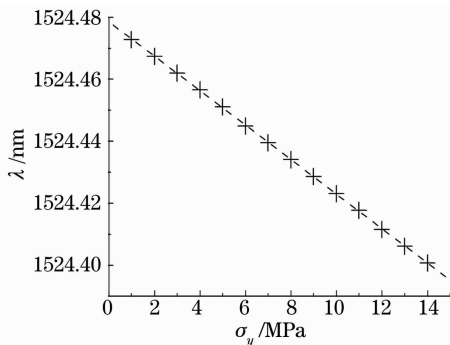


图 4 共振峰波长随 y 方向应力的变化

Fig. 4 Formant wavelength versus y direction stress

图 5 计算数据给出的线性拟合曲线为 $\lambda = -0.0111\sigma + 1524.5000$,其标准偏差为 0.0003,拟合直线斜率和截距的误差分别为 0.00002 和 0.0001。可见,共振腔共振峰的波长随外界应力也是呈线性变化的。而由线性拟合曲线的斜率可知,传感器的灵敏度为 0.0111 nm/MPa。

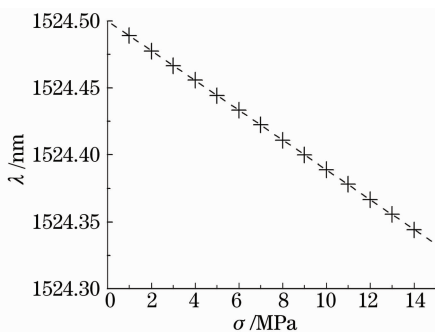


图 5 共振峰波长随应力环境的变化

Fig. 5 Formant wavelength versus circumstance stress

5 结 论

通过对 GaAs 石墨点阵柱状光子晶体能带的计算,构造了一种二维 GaAs 石墨点阵柱状光子晶体应力传感器的模型,利用 FDTD 方法,计算了这种应力传感器共振腔 TE_y 模的共振峰波长随应力变化的情况,计算结果表明,共振峰的波长随应力呈线性变化趋势,且这种传感器的 TE_y 模具有最大

0.0111 nm/MPa 的灵敏度,同时由计算发现,当应力单独作用于 x 方向或 y 方向时,传感器的应力灵敏度相同。

参 考 文 献

- E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- S. John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- J. D. Joannopoulos, P. R. Villeneuve, S. Fan. Photonic crystals: putting a new twist on light [J]. *Nature*, 1997, **386**(6621): 143~149
- Liu Jing, Zheng Zhiqiang, Feng Zhuohong *et al.*. Tunable optical filter based on two-dimensional heterostructure photonic crystal with neighboring dot-defects and curved waveguide [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 2034~2037
- 刘 璟, 郑志强, 冯卓宏 等. 二维异质结光子晶体中含近邻点缺陷的弯曲波导的可调谐滤波特性[J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 2034~2037
- Zhang Jun, Wei Zhiyi, Wang Zhaohua *et al.*. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber by femtosecond pulses laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4): 511~512
- 张 军, 魏志义, 王兆华 等. 利用光子晶体光纤产生超连续飞秒激光光谱[J]. *光学学报*, 2003, **23**(4): 511~512
- H. Boutayeb, T. A. Denidni, A. R. Sebak *et al.*. Design of elliptical electromagnetic bandgap structures for directive antennas[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2005, **4**: 93~96
- B. S. Song, T. Asano, Y. Akahane *et al.*. Multichannel add/drop filter based on in-plane hetero photonic crystals[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(3): 1449~1455
- P. Vodo, P. V. Parimi, W. T. Lu *et al.*. Focusing by planoconcave lens using negative refraction [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(20): 201108
- Liu Guiqiang, Liao Yubo, Liu Zhongmin. Fabrication and transmittance spectra of high quality three-dimensional photonic crystals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2400~2403
- 刘桂强, 廖昱博, 刘忠民. 高质量三维光子晶体的制备及其透射谱研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2400~2403
- Li Yiyu, Gu Peifu, Wang Baoqing *et al.*. Filling-factor graded wavelike two-dimensional photonic crystals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 169~173
- 厉以宇, 顾培夫, 王保清 等. 填充率渐变型波状结构二维光子晶体[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 169~173
- Dong Haixia, Jiang Haitao, Yang Chengquan *et al.*. Theoretical simulation and transmission properties of one-dimensional photonic quantum-well structure containing defect layers with negative refractive index[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2245~2249
- 董海霞, 江海涛, 杨成全 等. 含负折射率缺陷的光量子阱的透射特性及理论模拟[J]. *光学学报*, 2007, **27**(12): 2245~2249
- K. T. Posani, V. Tripathi, S. Annamalai *et al.*. Nanoscale quantum dot infrared sensors with photonic crystal cavity[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(15): 151104
- C. Lee, J. Thillaigovindan, C. C. Chen *et al.*. Si nanophotonics based cantilever sensor [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**(11): 113113
- T. Stomeo, M. Grande, A. Quattieri *et al.*. Fabrication of force sensors based on two-dimensional photonic crystal technology[J]. *Microelectronic Engineering*, 2007, **84**(5-8): 1450~1453
- Duan Dewen, Zhu Tao, Rao Yunjiang *et al.*. A miniature

- extrinsic Fabry-Pérot interferometer strain sensor based on hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 17~20
- 段德稳, 朱 涛, 饶云江 等. 基于空芯光子晶体光纤的微型非本征光纤法布里-珀罗干涉应变传感器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 17~20
- 16 Deng Hongyou, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. Photonic crystal fiber based Fabry-Pérot sensor fabricated by using 157 nm laser micromachining [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 255~258
- 邓洪有, 饶云江, 冉曾令 等. 用 157 nm 激光制作的光子晶体光纤法布里-珀罗传感器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 255~258
- 17 Deng Ming, Rao Yunjiang, Zhu Tao *et al.*. Refractive-index sensor based on photonic crystal fiber Fabry-Pérot interferometer with self temperature compensation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1790~1795
- 邓 明, 饶云江, 朱 涛 等. 基于光子晶体光纤法布里-珀罗干涉仪的温度自补偿折射率计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1790~1795
- 18 Wang Yufei, Qiu Yishen, Chen Xiyao *et al.*. Two-dimensional photonic crystal sensor based on Michelson interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 1083~1087
- 王宇飞, 邱怡申, 陈曦曜 等. 基于迈克耳孙干涉仪的二维光子晶体传感器[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 1083~1087
- 19 F. G. D. Corte, G. Cocorullo, M. Iodice *et al.*. Temperature dependence of the thermo-optic coefficient of InP, GaAs, and SiC from room temperature to 600 K at the wavelength of 1.5 μm [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(11): 1614~1616
- 20 Zheng Hongxing, Ge Debiao, Wei Bing. Two dimension anisotropic coated object RCS computed by FDTD algorithm [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2003, **25**(1): 4~6
- 郑宏兴, 葛德彪, 魏 兵. 用 FDTD 方法计算二维各向异性涂层目标的 RCS [J]. *系统工程与电子技术*, 2003, **25**(1): 4~6
- 21 Chen Gang, Liao Liji, Hao Wei. Foundation of Crystals Physics (Second Edition) [M]. Beijing: Science Press, 2007
- 陈 纲, 廖理儿, 郝 伟. 晶体物理学基础(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 2007