

石墨点阵柱状光子晶体共振腔的温度特性*

李岩[†] 傅海威 邵敏 李晓莉

(西安石油大学理学院, 西安 710065)

(2010年8月13日收到; 2010年9月12日收到修改稿)

构造了一种二维 GaAs 石墨点阵柱状光子晶体共振腔. 利用时域有限差分方法计算了这种光子晶体共振腔 TE_y 模的共振峰随温度变化的情况. 计算结果表明这种结构的光子晶体共振腔的共振峰主峰随温度呈分段线性变化趋势, 且具有 1.60 nm/°C 以上的温度响应灵敏度. 同时, 计算结果显示, 这种结构的光子晶体共振腔具有很好的频率开关特性. 最后, 利用计算结果解释了频率开关特性的成因.

关键词: 光子晶体, 温度, 共振腔, 开关

PACS: 42.70.Qs, 42.81.Pa, 78.20.Bh, 78.20.N-

1. 引言

光子晶体是一种周期结构的人造材料. 由于这种材料所具有的周期性, 使其具有了和普通晶体材料相类似的性质, 即当电磁波在这种周期结构材料中传播时, 也会形成能带和带隙结构, 因此这种人造材料能够很好地控制电磁波的传输^[1]. 由于光子晶体在控制电磁波方面所具有的一些特殊的性质^[2], 如光子晶体微腔可以很好地抑制自发辐射, 光子晶体波导在传输光的过程中具有极低的损耗等, 因而, 光子晶体的概念一经提出就引起了科技工作者的广泛重视, 虽经 20 多年的发展, 目前依然是科技界广泛关注的的一个焦点. 随着研究工作的深入, 光子晶体的各种新的特性和应用, 如光子晶体在天线, 滤波器, 波分复用器件等方面的应用^[3-5], 也逐渐为科研工作者所发现. 特别是随着近年来半导体技术的发展^[6], 利用目前已经成熟的半导体制备技术, 如等离子体刻蚀技术, 化学刻蚀技术等, 科研工作者已能够较方便地制备从红外到可见光频段的二维光子晶体, 加之这一频段的光子晶体所具有的体积小, 便于实现光集成的特点, 使得光子晶体这种人造材料就更加具备了现实意义.

光子晶体的各种应用是建立在对光子晶体各

种特性认识的基础之上的^[7-11]. 如对光子晶体负折射特性的认识使科研工作者制备了高效的光子晶体透镜和棱镜, 对光子晶体共振腔频率特性的认识使科研工作者可以制备各种光子晶体传感器, 因而, 在光子晶体的研究中, 对其各种新的特性的认识就具有了特别重要的意义.

在本文中, 我们给出了一种二维 GaAs 石墨点阵柱状结构的光子晶体共振腔模型, 在考虑材料的弹光效应, 热光效应以及应变特性的情况下, 利用时域有限差分方法讨论了这种共振腔所具有的温度特性.

2. 模型

考虑到实际的二维石墨点阵柱状光子晶体, 这里的光子晶体模型是按照如下方法构成的: 当 GaAs 柱按照石墨点阵的空间结构从衬底上生长出来后, 我们沿垂直于柱的方向截取一个平面, 这样就构成了一个 GaAs 柱在空气背景中按照石墨点阵排列的二维周期结构模型. 由于我们所使用的入射光波的中心波长为 1550 nm, 因而, GaAs 的相对介电常数取为^[12] $\epsilon_r = 12.18$.

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 of 二维石墨点阵柱状光子晶体的

* 陕西省自然科学基金研究计划项目(批准号:2010JM8006)资助和课题.

[†] E-mail: liyan67@xysu.edu.cn

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的能带图. 图 1 中频率单位为 $\omega a/(2\pi c)$, 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 $r = 0.25a$.

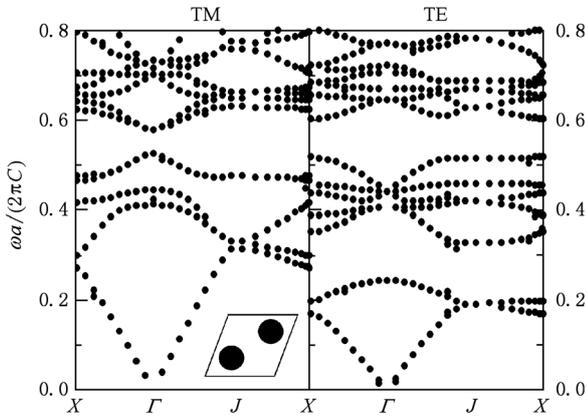


图 1 二维石墨点阵柱状光子晶体 TM 模和 TE 模能带图(插图 为光子晶体单胞)

由图 1 不难看出,该二维石墨点阵柱状光子晶体有一个完全带隙. 当光子晶体的点阵常数 $a = 854.8 \text{ nm}$, 柱半径为 $r = 213.7 \text{ nm}$ 时,该完全带隙处于 1479.1 nm 到 1628.0 nm 之间.

利用上述点阵结构数据,可以构造一个在 1479.1 nm 到 1628.0 nm 之间具有完全带隙的二维 GaAs 石墨点阵柱状光子晶体. 为了在 1479.1 nm 到 1628.0 nm 波长之间有一个较宽的光谱通过范围,我们选择沿 $\Gamma-J$ 方向取消 4 排 GaAs 柱来构造一个光子晶体波导. 而光子晶体共振腔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,同样,计算表明, $r = 0.45a$ 的 GaAs 柱所构成的共振腔具有较好的共振模. 这样,我们就利用 GaAs 柱构成了一个二维光子晶体共振腔的模型,如图 2 所示.

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,Maxwell 方程可以写为如下的分量形式^[13]:

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = \mu_0 \frac{\partial H_x}{\partial t},$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial t},$$

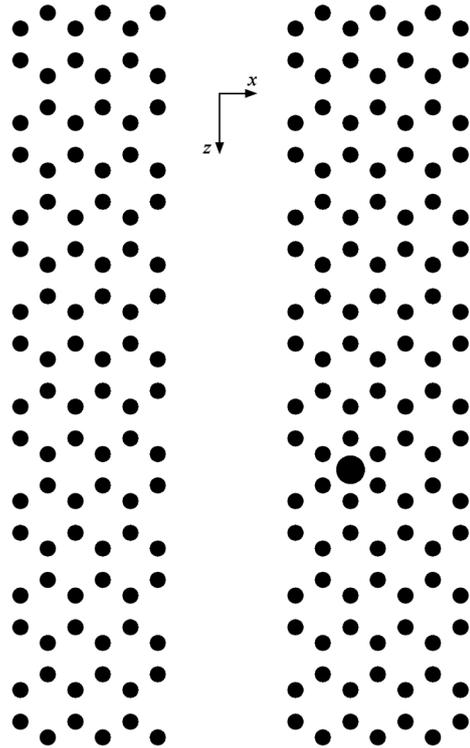


图 2 二维石墨点阵柱状光子晶体共振腔模型

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} = \frac{\partial D_y}{\partial t},$$

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.

当上述 GaAs 二维石墨点阵柱状光子晶体共振腔出现温度变化时,这种温度变化会引起共振腔模型的热膨胀效应,热光效应以及由热膨胀效应所导致的弹光效应.

对于热膨胀效应,由文献[14]可知,这种温度变化所引起的介质应变是各向同性的,即同一点的每个方向产生的应变是一样的,且没有剪应变. 由此可知,热膨胀效应会引起图 2 模型中 GaAs 介质柱位置和形状的改变,不过这种位置和形状的改变应是均匀的. 若温度改变量为 ΔT , GaAs 介质的热膨胀系数为^[15] $\alpha = 6.0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 则应变表示为

$$S_1 = S_2 = S_3 = \alpha \Delta T,$$

$$S_4 = S_5 = S_6 = 0,$$

其中, S_1, S_2, S_3 分别为沿 x, y, z 方向的正应变, S_4, S_5, S_6 分别为剪应变.

由文献[16]可知,所谓热光效应是指当温度发生改变时晶体折射率发生改变的现象. 若温度变化

为 ΔT ,则在一级近似下,热光效应表示为

$$\Delta\beta^{(0)} = \mathbf{b}\Delta T,$$

其中, \mathbf{b} 为热光系数张量. $\Delta\beta^{(0)}$ 为热光效应引起的逆介电张量的改变量,它表示为 $\Delta\beta^{(0)} = \beta - \beta_0$, β_0 为常温自由状态时的逆介电张量. 由于在常温自由状态下, GaAs 的介电椭球可以近似看作是一个球体,因而,在其主轴坐标系下, GaAs 的折射率椭球方程为 $\beta_0^1 x_1^2 + \beta_0^2 x_2^2 + \beta_0^3 x_3^2 = 1$, 这样,其逆介电张量 β_0 表示为

$$\beta_0 = \begin{bmatrix} \beta_0^1 & & 0 \\ & \beta_0^2 & \\ 0 & & \beta_0^3 \end{bmatrix},$$

其中 $\beta_0^1 = \beta_0^2 = \beta_0^3 = \frac{1}{\epsilon_r}$.

另外,温度改变所引起的热膨胀效应也会导致介质折射率的改变,即出现所谓的弹光效应. 同样,由文献[16]可知,这种由热膨胀效应引起的逆介电张量的改变量可表示为下述的矩阵形式:

$$\Delta\beta_M^{(T)} = P_{MN} S_N, \quad (M, N = 1, 2, \dots, 6),$$

其中, P_{MN} 为介质的弹光系数矩阵, $\Delta\beta_M^{(T)}$ 为由热膨胀效应引起的逆介电张量的改变量.

由文献[16,17]可知,属于立方晶系的 GaAs,其弹光系数矩阵 P 和热光系数张量 \mathbf{b} 的矩阵表示可以写为

$$[P_{MN}] = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{12} & & & \\ P_{12} & P_{11} & s_{12} & & & 0 \\ P_{12} & P_{12} & P_{11} & & & \\ & & & P_{44} & & \\ & & & & P_{44} & \\ & & & & & P_{44} \end{bmatrix},$$

$$[b_{MN}] = \begin{bmatrix} b_{11} & & 0 \\ & b_{11} & \\ 0 & & b_{11} \end{bmatrix}.$$

对于 GaAs 的热光系数,我们采用文献[12]的表述方式,即

$$b_{11} = \frac{\partial n}{\partial T} = -1.86 \times 10^{-10} T^2 + 3.49 \times 10^{-7} T + 1.47 \times 10^{-4} (\text{K}^{-1}),$$

而 GaAs 的弹光系数为 $P_{11} = -0.165, P_{12} = -0.140, P_{44} = -0.072$.

4. 计算及结果讨论

考虑到图 2 的 GaAs 二维石墨点阵柱状光子晶

体共振腔的体积很小,因此,对于图 2 模型的计算我们作如下的假定,首先,假定模型内各点的温度相同. 其次,假定当温度发生改变时,模型内各点可以很快达到热平衡. 最后,假定模型的介质折射率椭球的主轴坐标系与图 2 的坐标系重合.

在上述条件下,当给图 2 模型加入高斯光束的调制高斯脉冲入射源时,我们利用时域有限差分方法计算了共振腔 TE_y 模共振峰的主峰波长随温度变化的情况,计算结果如图 3 所示. 图 3 横轴为温度,纵轴为波长. 由图 3 的计算结果我们不难发现,这种 GaAs 二维石墨点阵柱状光子晶体共振腔 TE_y 模共振峰的主峰波长随温度的变化呈现分段线性的特点,基于这一特点,我们将计算数据分成了 4 组,如图例中所标注的 1,2,3,4. 图中的虚线分别为每组数据的线性拟合曲线. 由此可以得到 4 条拟合曲线的方程分别为

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= -1.78T_1 + 1559, & T_1 &\in [20, 40], \\ \lambda_2 &= -1.7T_2 + 1662, & T_2 &\in [50, 110], \\ \lambda_3 &= -0.96T_3 + 1658, & T_3 &\in [120, 140], \\ \lambda_4 &= -1.60T_4 + 1835, & T_4 &\in [150, 200], \end{aligned}$$

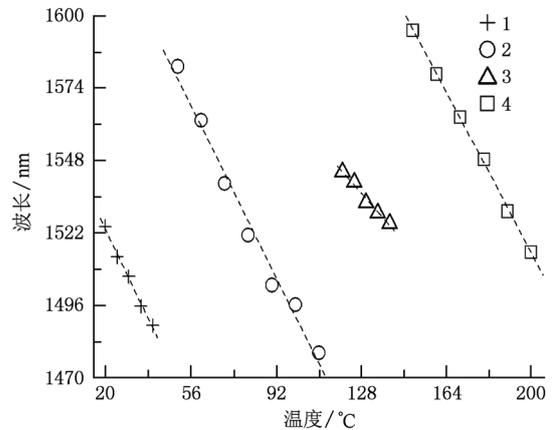


图 3 共振腔 TE_y 模共振峰的主峰波长随温度的变化

上述 4 条拟合曲线方程中,因变量波长的单位均为 nm,自变量温度的单位均为摄氏度. 4 条曲线的斜率误差,截距误差和标准偏差如表 1 所示

表 1 拟合曲线 1—4 的误差

	斜率误差/(nm/°C)	截距误差/nm	标准偏差/nm
曲线 1(+)	0.08	2	1
曲线 2(O)	0.1	8	5
曲线 3(Δ)	0.08	9	1
曲线 4(□)	0.02	4	1

由表 1 中的数据可以看出 GaAs 二维石墨点阵柱状光子晶体共振腔 TE_y 模共振峰的主峰波长随温度的变化是近似线性的,且由表 1 中的斜率误差及标准偏差可以看出,随着温度的提高,拟合曲线的线性度逐渐变好. 同时,由拟合曲线方程也可以看出,拟合曲线 1,2,4 近似平行. 最后,由拟合曲线的斜率可以看出,这种二维石墨点阵柱状光子晶体共振腔 TE_y 模的灵敏度在 0.96—1.78 nm/°C 之间,且 4 条拟合曲线中的 3 条灵敏度大于 1.60 nm/°C,表明这种结构的共振腔具有非常高的温度响应灵敏度.

由图 3 我们也可以看出,在这种光子晶体共振腔 TE_y 模共振峰的主峰波长随温度的变化过程中,当温度变化到区间 [40,50], [110,120], [140,150] 时,在这些区间内,TE_y 模共振峰的主峰波长随温度的变化出现了急剧的跳跃,即 TE_y 模共振峰的主峰波长呈现出一种频率开关效应. 为了理解这种开关效应,我们作了进一步的计算. 计算结果如图 4,图 5 所示. 其中,图 4 横轴为温度,纵轴为波长. 图 4 (a), (b), (c) 分别为温度变化到区间 [40, 50], [110,120], [140,150] 时的计算结果. 图 5 (a)—(c) 分别为图 4(a)—(c) 的温度波长强度三维图.

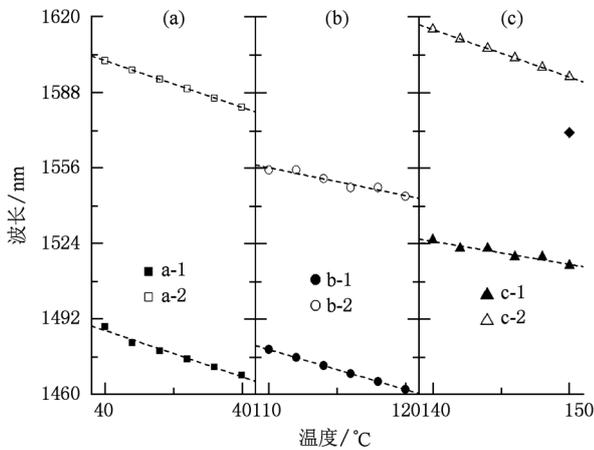


图 4 共振腔 TE_y 模共振峰波长随温度的变化

由图 4 的计算结果我们可以看到,在 [40, 50] 和 [110,120] 温度区间内,这种光子晶体共振腔 TE_y 模的共振峰出现了双峰结构,见图 4(a) 和 (b). 而在 [140,150] 温度区间内,共振峰出现了三峰现象,但我们发现共振峰的变化仍然主要取决于 c-1 和 c-2 这两个共振峰,第 3 个峰由于只在 150°C 时才表现的比较强,故而,图中我们只标出了 150°C 时的一个点,如图 4(c). 由图 4 可以看出,图 4 中的双共振峰

也呈现出一种线性变化的趋势,如图 4(a) 的 a-1 和 a-2 组计算结果,图 4(b) 的 b-1 和 b-2 组计算结果以及图 4(c) 的 c-1 和 c-2 组计算结果,为此,我们将每组数据进行了线性拟合,如图 4 中的虚线所示. 其中温度在 $T \in [40,50]$ 区间内的曲线 a-1 和 a-2 的拟合方程分别为

$$\lambda_{a-1} = -2.0T + 1566,$$

$$\lambda_{a-2} = -1.988T + 1681.1.$$

温度在 $T \in [110,120]$ 区间内的曲线 b-1 和 b-2 的拟合方程为

$$\lambda_{b-1} = -1.695T + 1665.5,$$

$$\lambda_{b-2} = -1.2T + 1690.$$

温度在 $T \in [140,150]$ 区间内的曲线 c-1 和 c-2 的拟合方程为

$$\lambda_{c-1} = -1.0T + 1660,$$

$$\lambda_{c-2} = -2.019T + 1897.5.$$

上述拟合曲线方程中,因变量波长的单位和自变量温度的单位与上述情况相同. 曲线的斜率误差,截距误差和标准偏差如表 2 所示

表 2 拟合曲线误差

	斜率误差/(nm/°C)	截距误差/nm	标准偏差/nm
曲线 a-1 (■)	0.1	7	1
曲线 a-2 (□)	0.004	0.2	0.03
曲线 b-1 (●)	0.003	0.3	0.02
曲线 b-2 (○)	0.1	2 × 10	1
曲线 c-1 (▲)	0.1	2 × 10	1
曲线 c-2 (△)	0.004	0.5	0.03

由表 2 中的数据可以看出这种光子晶体共振腔 TE_y 模共振峰波长随温度的变化仍然是近似线性的. 而对比拟合曲线方程 λ_{a-1} 与 λ_1 ; λ_{a-2} , λ_{b-1} 与 λ_2 ; λ_{b-2} , λ_{c-1} 与 λ_3 以及 λ_{c-2} 与 λ_4 的斜率可以看出,这些曲线之间是近似平行的,如在 λ_2 曲线的 50°C 和 110°C 处, λ_{a-2} 与 λ_{b-1} 曲线的斜率与 λ_2 曲线的斜率近似相等,这说明在温度变化的临界点处共振峰波长随温度的变化只是近似线性的. 同时,对比曲线 λ_{a-1} 与 λ_{a-2} ; λ_{b-1} 与 λ_{b-2} ; λ_{c-1} 与 λ_{c-2} 的斜率可以看出,这些曲线之间也只是近似平行的,且随着温度的升高,这些曲线间的平行度会变差. 同时,曲线 λ_{a-1} 与 λ_{a-2} ; λ_{b-1} 与 λ_{b-2} ; λ_{c-1} 与 λ_{c-2} 之间的平均间隔分别为 114 nm, 80 nm, 85 nm, 说明这种光子晶体共振腔共振峰的频率开关现象是非常明显的. 而这种频率开关效应的形成从图 5 (a)—(c) 可以看得更清楚.

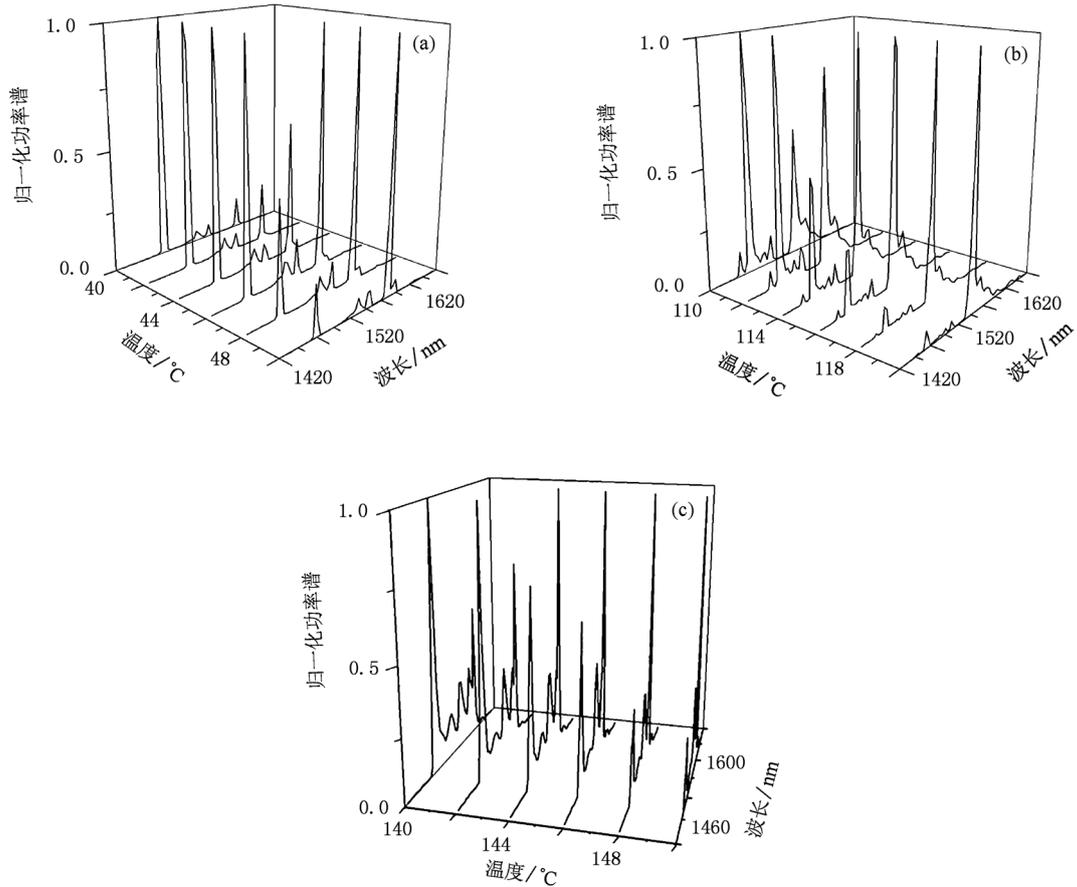


图5 (a)共振腔 TE_y 模共振峰波长随温度变化的三维图;(b)共振腔 TE_y 模共振峰波长随温度变化的三维图;(c)共振腔 TE_y 模共振峰波长随温度变化的三维图

图5(a)一(c)的横轴为温度,单位为摄氏度;纵轴为波长,单位为nm;z轴为光子晶体共振腔 TE_y 模共振峰的归一化功率谱. 由图5(a)可以看出,图5(a)中有两组明显的功率谱峰值,其中,靠近1470nm处的一组功率谱峰值对应图4中的 λ_{a-1} 曲线,而靠近1582nm处的一组功率谱峰值对应图4中的 λ_{a-2} 曲线,由这两组功率谱峰值的变化可以看出,随着温度的增加,对应 λ_{a-1} 曲线的功率谱峰值在迅速减小,而对应 λ_{a-2} 曲线的功率谱峰值在迅速增大,因此,随着温度的变化,这种光子晶体共振腔中的共振峰迅速由一个频率跳跃到另一个频率,由此完成了频率的开关过程. 图5(b)功率谱峰值的变化情况与图5(a)类似. 而在图5(c)中,除了有与图5(a)和(b)相似的功率谱峰值外,在这两组功率谱峰值之间,还可以看到一组较为明显的功率谱峰值,只是该组功率谱峰值随温度的变化远不如另外两组的剧烈.

5. 结 论

通过对GaAs石墨点阵柱状光子晶体能带的计算,我们构造了一种二维GaAs石墨点阵柱状光子晶体共振腔模型,利用时域有限差分方法,我们计算了这种光子晶体共振腔 TE_y 模的共振峰波长随温度的变化情况,计算结果表明,这种光子晶体共振腔 TE_y 模共振峰的主峰波长随温度的变化呈现出较好的分段线性关系,且这种共振腔 TE_y 模具有很高的温度灵敏度,在我们的计算范围内,其温度灵敏度多超过 $1.60 \text{ nm}/^\circ\text{C}$. 同时,计算表明,在温度变化的临界点处,共振腔中会出现双共振模或三共振模,且随着温度的变化,共振腔中的两组主要共振模的峰值会呈现出相反的变化趋势,从而完成频率开关过程. 由此,这种共振腔结构不但可以用作温度传感器,而且可以应用于频率开关器件.

- [1] Joannopoulos J D, Villeneuve P R, Fan S H 1997 *Nature* **386** 143
- [2] Prather D W, Shi S Y, Murakowski J, Schneider G J, Sharkawy A, Chen C H, Miao B L 2006 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **12** 6
- [3] Martínez A, Piqueras M A, Martí J 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 131111
- [4] Boutayeb H, Denidni T A, Sebak A R, Talbi L 2005 *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* **4** 93
- [5] Niemi T, Frandsen L H, Hede K K, Harpøth A, Borel P I, Kristensen M 2006 *IEEE Photonics Tech. Lett.* **18** 226
- [6] Ni P G 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 340 (in Chinese) [倪培根 2010 物理学报 **59** 340]
- [7] Lu Zh L, Murakowski J A, Schuetz C A, Shi S Y, Schneider G J, Prather D W 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 153901
- [8] Lee Ch K, Thillaigovindan J, Chen Ch Ch, Chen X T, Chao Y T, Tao Sh H, Xiang W F, Yu A B, Feng H H, Lo G Q 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 113113
- [9] Stünner T, Stichel T, Kwon S H, Schlereth T W, Höfling S, Kamp M, Forchel A 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 261112
- [10] Cui Y L, Hou L T 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2571 (in China) [崔艳玲、侯蓝田 2010 物理学报 **59** 2571]
- [11] Liu Q N 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2551 (in Chinese) [刘启能 2010 物理学报 **59** 2551]
- [12] Della Corte F G, Cocorullo G, Iodice M, Rendina I 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 1614
- [13] Zheng H X, Ge D B, Wei B 2003 *Systems Engineering and Electronics* **25** 4 (in Chinese) [郑宏兴、葛德彪、魏兵 2003 系统工程与电子技术 **25** 4]
- [14] Chen M X 2007 *Elasticity and Plasticity* (Beijing: Science Press Book) (in Chinese) [陈明祥 2007 弹塑性力学(北京:科学出版社)]
- [15] Liu N K, Zhu B Sh, Luo J Sh 1994 *Semiconductor Physics* (Beijing: National Defence Industry Press Book) (in Chinese) [刘恩科、朱秉升、罗晋生 1994 半导体物理学(北京:国防工业出版社)]
- [16] Chen G, Liao J L, Hao W 2007 *Foundation of Crystals Physics* (Second Edition) (Beijing: Science Press Book) (in Chinese) [陈纲、廖理儿、郝伟 2007 晶体物理学基础(第二版)(北京:科学出版社)]
- [17] NYE J F 1960 *Physical Properties of Crystals* (Oxford: Oxford University Press Book)

Temperature characteristic of photonic crystals resonant cavity composed of GaAs pillars with graphite lattice^{*}

Li Yan[†] Fu Hai-Wei Shao Min Li Xiao-Li

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

(Received 13 August 2010; revised manuscript received 12 September 2010)

Abstract

A model of two-dimensional photonic band gap structure resonant cavity composed of GaAs pillars with graphite lattice is proposed. The variation of its TE_y mode formant wavelength with temperature is calculated by finite difference time domain method. The results show that there is a sectional linear characteristic between the main formant wavelength and temperature for this kind of photonic crystal resonant cavity, and the sensitivity responding to temperature is more than $1.60\text{nm}/^\circ\text{C}$. At the same time, the results show that this kind of resonant cavity possesses an excellent characteristic of frequency switching. Finally, the cause for its switching characteristic is explained by the calculated results.

Keywords: photonic crystal, temperature, resonant cavity, make-and break key

PACS: 42.70.Qs, 42.81.Pa, 78.20.Bh, 78.20.N-

^{*} Project supported by the Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province, China (Grant No. 2010JM8006).

[†] E-mail: liyan67@xsyu.edu.cn