

掺杂缺陷层的异质双周期光子晶体的磁光效应

牛永宾¹, 许丽萍¹, 温廷敦^{1,2}, 陈磊³, 李红梅^{1,2}

- (1. 中北大学 理学院 物理系, 山西 太原 030051;
2. 中北大学 微米纳米技术研究中心, 山西 太原 030051;
3. 中北大学 信息与通信工程学院, 山西 太原 030051)

摘要: 通过在掺杂缺陷层的异质双周期光子晶体的表面添加一层具有 Voigt 效应的磁光半导体层, 使该光子晶体结构的缺陷模透过率对外磁场产生响应。首先研究磁光半导体层的介电常数(折射率)随外磁场的变化规律, 进而利用传输矩阵法研究该结构缺陷模的透射率随外磁场的变化规律。研究表明: 在选取合适的材料参数和结构参数条件下, 可实现缺陷模透射率与磁场的相关性, 获得受磁场调控的缺陷模透射率, 从而该结构可以应用于窄带滤波器的磁控开关。

关键词: 光子晶体; 缺陷层; 传输矩阵法; 磁光效应

中图分类号: O431 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)02-0483-05

Magneto-optical effect of dual-periodical photonic crystal heterostructures doped by impure layer

Niu Yongbin¹, Xu Liping¹, Wen Tingdun^{1,2}, Chen Lei³, Li Hongmei^{1,2}

- (1. Department of physics, School of Science, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. The Center of Micro/Nano Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;
3. Information and Communication Engineering College, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: By applying a magneto-optical semiconductor layer of which has the Voigt effect to the surface of a dual-periodical photonic crystal heterostructures doped by impure layer, the transmittance of the defect mode of this photonic crystal makes a response to the external magnetic field. The variation of dielectric constant (refractive index) of the magneto-optical semiconductor surface accompanied with the external magnetic field was studied firstly. And then, the variation of transmittance of the defect mode with a external magnetic field was explored via using transfer matrix method. The results show that under the conditions of selecting a appropriate structural parameters and material parameter, it can realize the correlation between the transmittance of defect mode and the magnetic field, and obtain the transmittance of defect mode controlled by an external magnetic field. Therefore, the photonic crystal with such structure can be applied to the magnetic switch of the narrowband filter.

Key words: photonic crystal; defect modes; transmission matrix; magneto-optical effect

收稿日期: 2013-06-05; 修订日期: 2013-07-08

基金项目: 国家自然科学基金(60776062, 50730009)

作者简介: 牛永宾(1989-), 男, 硕士生, 主要从事纳米功能材料及应用等方面的研究。Email: niuyongbin3@126.com

导师简介: 许丽萍(1958-), 女, 教授, 博士, 主要从事纳米功能材料及应用等方面的研究。Email: lpxu@sina.com

0 引言

自 1987 年 Yablonovitch^[1]和 John^[2]分别提出一个新的物理概念—光子晶体后,光子晶体便逐渐被人们认识。光子晶体是一种不同电介质按一定周期排列而成人工晶体,光子晶体主要的特征就是光子晶体具有和半导体禁带结构相类似的光子禁带,光子被禁止在光子禁带中传播。光子晶体这种特有的性质具有广阔的应用前景,最近几年成为竞相研究的热点^[3-5]。在光子晶体中,如果原有的对称性或周期性遭到破坏,在原有的光子禁带中就会产生极窄的缺陷模透射峰,称之为光子局域态^[6]。将给非线性光学和激光技术等方面的未来发展指明一条新的方向,如光子晶体谐振腔、光子晶体滤波器以及无阈值激光器等。产生光子局域态的通常方法就是在光子晶体结构中掺杂一种新的材料。

如果在光子晶体表面层添加一层具有 Voigt 效应^[7]的磁光半导体层,在垂直于电磁波传播方向上加外磁场,则磁光半导体层的介电常数将会随着外磁场和入射光的角频率的变化而变化,进而改变磁光半导体层的折射率,改变入射光通过磁光半导体层的光程,最终改变光子晶体的光学传输特性。因此,利用 Voigt 效应,可以实现对光子晶体光学传输特性的磁场调控^[8]。

文中研究的光子晶体结构是:在掺杂缺陷层的异质双周期光子晶体的表面层添加一层具有 Voigt 效应的磁光半导体层。由于掺杂缺陷层,将会在中心波长处产生极窄的缺陷模透射峰,由于添加了一层具有 Voigt 效应的磁光半导体层,当在垂直于电磁波传播方向上加外磁场,利用传输矩阵法研究缺陷模透射率与外磁场的变化规律,从而实现对光子晶体缺陷模的磁场调控。

1 结构模型和理论基础

如图 1 所示,由材料 1 和材料 2 两种不同材料不同光学厚度沿轴方向交替生长形成的一维异质双周期光子晶体结构为 $(A_m B_n)^N$,其中 A 和 B 是两种不同的结构单元。A 的结构分别由折射率为 n_1 和 n_2 、物理厚度为 d_1 和 d_2 的两种介质构成;B 的结构分别由折射率为 n_1 和 n_2 、物理厚度为 d_3 和 d_4 的介质构

成, m 为 A 的周期数, n 为 B 的周期数。在此光子晶体的基础上,在 A 中添加一层由折射率为 n_3 、物理厚度为 d_5 的介质组成的缺陷层,在表面层添加一层物理厚度为 d_s 具有 Voigt 效应的磁光半导体层,在垂直于电磁波传播的方向上加外磁场 B ,研究该光子晶体的缺陷模的光学传输特性。

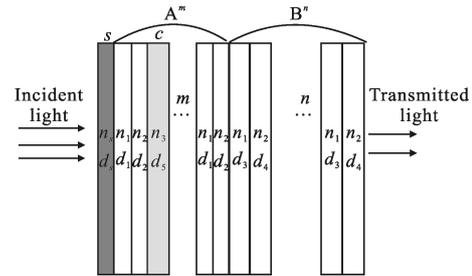


图 1 一维光子晶体示意图

Fig.1 Model of 1D photonic crystal

下面介绍关于传输矩阵的理论,当电磁波从空气中以入射角 ϕ_0 入射到该光子晶体时,第 z 层的特征矩阵(传输矩阵)表示如下:

$$M_z = \begin{bmatrix} \cos \delta_z & -\frac{i}{U_z} \sin \delta_z \\ -i U_z \sin \delta_z & \cos \delta_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\delta_z = (2\pi/\lambda)n_{(1,2,3)}d \cos \phi_0$ 为介质的相对厚度, $n_{(1,2,3)}$

分别表示材料 1,2,3 的折射率。 $U_z = \begin{cases} n_{(1,2,3)} \cos \phi_0 & \text{垂直分量} \\ n_{(1,2,3)} / \cos \phi_0 & \text{平行分量} \end{cases}$

它取决于入射辐射的偏振方向是平行于入射面还是垂直于入射面,文中只研究偏振方向垂直于入射面的情况,即 TM 模的入射光。逐层应用公式(1),就能得到整个光子晶体的传输矩阵:

$$M = M_1 M_2 M_3 \cdots M_N = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

光的透射系数表示如下:

$$t = \frac{2n_0 \cos \phi_0}{(M_{11} + M_{12} n_0 \cos \phi_l) n_0 \cos \phi_0 + M_{21} + M_{22} n_0 \cos \phi_l} \quad (3)$$

式中: n_0, n_l 分别为入射介质和出射介质的折射率; ϕ_0, ϕ_l 分别为入射角度和出射角度。当光子晶体置于空气中时,可以取 $n_0 = n_l = 1, \phi_0 = \phi_l$ 。

则透射率为:

$$T = |t|^2 \quad (4)$$

当外加磁场方向垂直于电磁波的传播方向时,由此半导体材料构成的磁光层具有 Voigt 效应,单层介质的介电常数^[7]可以表示为:

$$\epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_1 & 0 & i\epsilon_2 \\ 0 & \epsilon_3 & 0 \\ -i\epsilon_2 & 0 & \epsilon_1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中:

$$\epsilon_1 = \epsilon_0 \left(1 + \frac{\omega_p^2}{\omega_c^2 - \omega^2} \right) \quad (6)$$

$$\epsilon_2 = \epsilon_0 \frac{\omega_c \omega_p}{\omega(\omega_c - \omega^2)} \quad (7)$$

$$\epsilon_3 = \epsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right) \quad (8)$$

当 TM 波型的电磁波从空气中以垂直于光子晶体的角度入射时,半导体磁光层的介电常数为:

$$\epsilon(\omega) = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{\epsilon_1} \quad (9)$$

将公式(6)、(7)带入到公式(9)中,可以得到如下结果:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_0 \left(1 + \frac{\omega_p^2}{(\omega_c^2 - \omega^2)} - \frac{\omega_p^4 \omega_c^2}{\omega^2 (\omega_c^2 - \omega^2) (\omega_c^2 - \omega^2 + \omega_p^2)} \right) \quad (10)$$

式中: ω 为入射光的角频率; ϵ_0 为静态介电常数; ω_p 为等离子振荡角频率; $\omega_p^2 = \sum_i 4\pi n_i e^2 / m_i^* \epsilon_0^{[9]}$, m_i^* 为电子和空穴的有效质量, n_i 为导带和价带中电子和空穴的密度; ω_c 为回旋频率, $\omega_c = eB/m^*$, 其中 e 是电子电荷, B 是外加磁场大小, m^* 是电子的有效质量, 即介电常数与磁场的相关性最终表现在 ϵ 与 ω_c 的函数关系。

2 模拟计算及分析

2.1 不同磁场调制下磁光层介电常数随波长的变化规律

取材料 1 为折射率 $n_1=2.96$ 的 TiO_2 。取材料 2 为折射率 $n_2=1.46$ 的 SiO_2 。杂质层材料三取折射率 $n_3=1.77$ 的 Al_2O_3 。中心波长分别取处于红外波段的 $\lambda=500 \mu\text{m}$, $\lambda'=700 \mu\text{m}$ 。介质层的光学厚度满足 $n_1 d_1 = n_2 d_2 = n_3 d_3 = \lambda/4$ 、 $n_1 d_3 = n_2 d_4 = \lambda'/4$ 。研究发现:当周期数增多时,禁带宽度和位置几乎不变^[3]。所以,文中采用 $N=1$, $m=n=10$ 。磁光层材料取半导体 InSb , 其静态介电常数 $\epsilon_0=17.7$, $u=0$, 有效质量 $m^*=1.366 \times 10^{-32}(\text{kg})^{[9]}$, 在室温下等离子频率 $\omega_p=1.6 \times 10^{13}(\text{rad/s})^{[10]}$ 。

根据公式(10)可以得出:磁光层半导体的介电常数不仅和外磁场 B 有关, 还和入射光的角频率 ω

有关系。因此,对于给定的外磁场 B ,随着入射光角频率的改变,磁光层的介电常数将发生改变,不考虑半导体的吸收效应,只研究电磁波垂直入射的情况,不同磁场调制下磁光层介电常数与入射光波长的关系如图二所示。从图中可以得出:当 $\omega_c=0$ (即 $B=0$) 时,随着入射光波长的增大,磁光层介电常数单调递减,当入射波长 λ 较小($\omega > \omega_p$)时,磁光层折射率为正值,当 $\omega = \omega_p$ 时, $\epsilon=0$, 当入射波长 λ 增大($\omega < \omega_p$)时,磁光层折射率为负值,此时磁光半导体层相当于电单负材料。当加上外磁场后,磁光层介电函数出现新的共振区域,磁光层介电常数从单调递减曲线变为类双曲线,并且随着外磁场的逐渐增大,准线左侧的曲线变化越来越剧烈,而准线右侧的曲线变化越来越缓慢。因此,在不改变结构组分的情况下,通过改变外加磁场的大小,可实现对磁光层材料介电常数的改变,进而改变该光子晶体的光学传输特性。

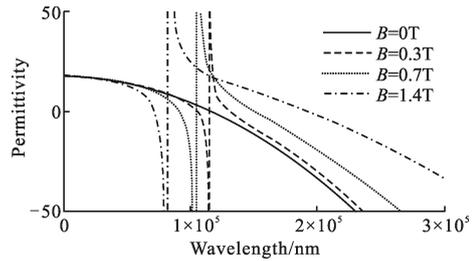


图 2 不同磁场调制下磁光层介电常数与入射光波长的关系
Fig.2 Relationship between permittivity and wavelength of incident light under conditions of different magnetic fields

2.2 磁场的改变对磁光层折射率的影响(取缺陷模处,即 $\lambda=506\ 058 \text{ nm}$)

当入射光的角频率确定,通过改变外磁场就可实现对磁光层折射率的调制。磁光层折射率随外磁场的变化规律如图 3 所示(实线表示实数,点线表示虚数),从图中可以看出磁光层折射率与磁场的关系曲线关

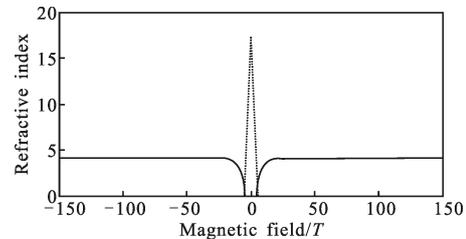


图 3 磁光层折射率随外磁场的变化规律

Fig.3 Variation of refractive index with external magnetic field

于原点对称,并且当磁场 $B \in (-6.0, 6.0)T$ 时磁光层折

射率进入复数区,当 B 属于其他范围时磁光层折射率进入实数区。当磁场 $B \in (-12, -6.0)T$ 和 $(6.0, 12)T$ 时,磁光层折射率随磁场变化剧烈;当磁场 $B \in (-\infty, -12)T$ 和 $(12, +\infty)T$ 磁光层折射率趋于稳定于 4.2 左右。得出的结论为:磁光层的折射率对较小的外磁场比较敏感,当外磁场很大时,磁光层的折射率基本不再随着外磁场的变化而变化,即当 B 在 $(12, +\infty)T$ 范围内变化时,缺陷模透射率基本不改变,如图 4 所示。

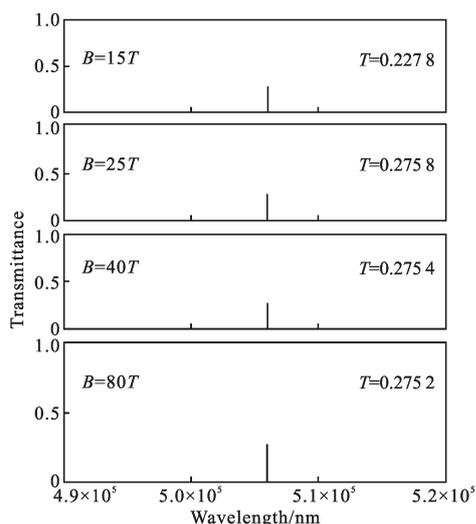


图 4 $B \in (12, +\infty)T$ 时,缺陷模透射率变化规律

Fig.4 Variation of defect mode transmittance($B \in (12, +\infty)T$)

2.3 外磁场对缺陷模透射率的调控规律

根据公式(10)可知,当外磁场发生改变时,将会改变半导体磁光层的介电常数,进而改变半导体的折射率,半导体的折射率的变化改变入射光通过磁光层时的光程,进而改变光子晶体的传输特性,最终通过缺陷模透射率改变体现外磁场的变化,缺陷模透射率随外磁场的变化规律如图 5 所示。外磁场的大小分别取 $-5T, -1.5T, -0.8T, 0, 0.8T, 1.5T, 5T$ 相对称的七个点,从图 3 已经得出磁光层折射率与磁场的关系曲线关于原点对称,因此得到的缺陷模透射率也关于 $B=0T$ 对称。从图 5 可以看出:当外磁场 $B=0T$ 时,缺陷模透射峰峰值为 0.734 5,随着外磁场的增大缺陷模透射率随着减小,当外磁场 $B=5T$ 时,缺陷模透射峰峰值为 0.302 2;并且缺陷模的位置基本不发生移动。结果表明:缺陷模透射峰峰值和外磁场存在一定的相关性,通过改变外磁场的大小可实现对缺陷模透射峰峰值的调控。

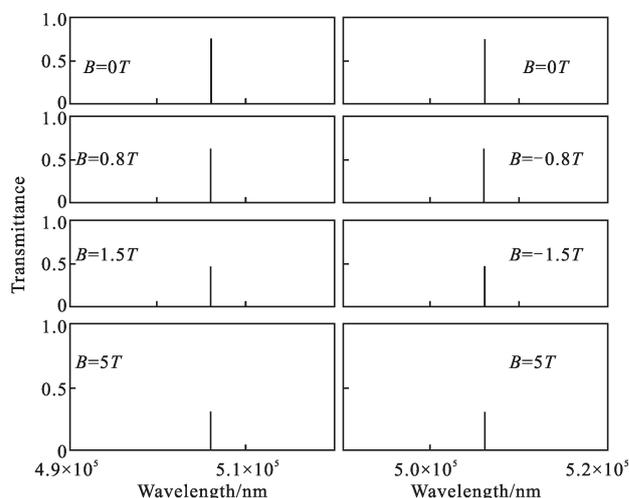


图 5 缺陷模透射率随外磁场的变化规律

Fig.5 Variation of defect mode transmittance with different magnetic field

3 结论

由于磁光半导体层的折射率不仅和外磁场有关,还和入射光的角频率有关,因此,文中首先研究了在给定不同的磁场条件下磁光层的折射率随入射光角频率的变化规律,得出结论:当加上外磁场后,磁光层介电常数从单调递减曲线变为类双曲线,并且随着外磁场的增大,准线左侧的曲线变化越来越剧烈,而准线右侧的曲线变化越来越缓慢。然后,在给定入射光角频率的情况下,研究磁光层折射率随磁场变化规律,得出磁光层折射率与磁场的关系曲线关于原点对称,在磁场 $B \in (-6.0, 6.0)T$ 时,磁光层折射率进入复数区,在其他区间磁光层折射率进入实数区,随着外磁场趋向正无穷大(负无穷大)磁光层折射率最终趋于稳定。当外磁场改变时,缺陷模透射率的也随之改变,随着外磁场增大,缺陷模透射率明显减小,从而实现了对缺陷模透射率的磁场调控,进一步调整参数可以继续提升可调率的数值,令该光子晶体结构应用于窄带滤波器的磁控开关。

参考文献:

- [1] Yabonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 58(20): 2059-2062.
- [2] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 58(23): 2486-

- 2489.
- [3] Li Jiao, Wen Tingdun, Xu Liping. Optical characteristics of dual-periodical photonic crystal heterostructures [J]. *Chin J Lumin*, 2012, 33(3): 305–310.
- [4] Li Wensheng, Huang Haiming, Fu Yanhua, et al., Properties of one-dimensional photonic crystal tunneling mode containing single-negative materials with symmetrical structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 69–72. (in Chinese)
李文胜, 黄海铭, 付艳华, 等. 含单负材料对称型一维光子晶体隧穿模的特性 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 69–72.
- [5] Xi Xiaoming, Sun Guilin, Chen Zilun, et al. Photonic crystal fibers tapering based on the conventional taper rig [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1481–1484. (in Chinese)
奚小明, 孙桂林, 陈子伦, 等. 利用普通熔融拉锥机实现光子晶体光纤拉锥 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6): 1481–1484.
- [6] Yang Yuanhong, Duan Weiqian, Ye Miao, et al. Technology of photonic crystal fiber gyroscope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6): 1143–1147. (in Chinese)
杨远洪, 段玮倩, 叶淼, 等. 光子晶体光纤陀螺技术 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(6): 1143–1147.
- [7] Zhang Yan. Study on the transmission properties of 1D photonic crystals under an applied magnetic field [D]. Nanchang: Nanchang University, 2007. (in Chinese)
张燕. 外磁场作用下一维光子晶体的光传输特性研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2007.
- [8] Xu C, Hu X H, Li Y Z, et al. Semiconductor-based tunable photonic crystals by means of an external magnetic field [J]. *Phys Rev B*, 2003, 68: 193–201
- [9] Kittel C. Introduction to Solid Physics [M]. 7th ed. New York: Wiley, 1976.
- [10] Halevi P. Tunable photonic crystal with semiconducting constituents [J]. *Phy Rev Lett*, 2000, 85: 1875–1878.