

缺陷态透射率可调的三缺陷层的一维光子晶体

刘丹东¹ 陈光德¹ 李普选¹ 孙中禹²

(1 西安交通大学理学院, 西安 710049)

(2 空军工程大学信息工程学院, 西安 710077)

摘要 利用传输矩阵方法, 从理论上研究了三缺陷层一维光子晶体的光学性质. 在缺陷层间距足够大以致于出现缺陷态简并的情况下, 调节第一或第三个缺陷层的光学厚度, 光子晶体缺陷态的透射率会发生最大程度的变化. 这种结构可同时具有窄带滤波器和光开关的功能, 据此提出了一种低阈值光开关的设计. 把折射率可调的向列型液晶作为晶体的第三个缺陷层, 并用 4×4 传输矩阵方法计算了其缺陷态透射率与电场电压的关系.

关键词 光子晶体; 缺陷态; 光开关; 滤波

中图分类号 O734 **文献标识码** A

0 引言

光子晶体是一种折射率按周期性分布的人工微结构材料, 在一定频率范围内的光波不能在光子晶体内传播, 即存在光子带隙结构^[1,2]. 在光子晶体中引入缺陷, 就会在带隙中产生缺陷态^[3~5]. 把介电常量可调的非线性材料或向列型液晶引入到光子晶体中, 可使光子带隙宽度发生变化^[6,7]或缺陷态移动^[8,9]. 光子晶体的这些特性具有广泛的应用前景.

光开关是一种重要的光学器件. 光子晶体光开关主要有三种机制. 调制多缺陷层光子晶体缺陷层的周期, 在缺陷带的中央会出现带隙, 以频率在带隙范围内的短脉冲入射, 就能形成高效率的光开关; 对于在带边附近较窄或缺陷态附近极窄频率范围内的人射光, 通过光子晶体带边的移动或带隙中缺陷态的移动, 可改变其透射率^[7,10]. 这些光开关都对入射光的频率范围有比较严格的限制, 如果入射光的频率范围较宽, 这些结构就只能起到滤波器的功能.

光子晶体的计算方法有平面波法^[11,12]、时域差分法^[13]和传输矩阵法^[14]等. 对于一维光子晶体, 传输矩阵法具有计算简单, 计算结果与实际相符等优点, 因此被广泛应用. 本文用 4×4 和 2×2 传输矩阵法, 分别研究了带有和不带有液晶缺陷层的光子晶体的光学性质. 提出了一种新的光开关的设计. 在一维光子晶体中引入三个缺陷层, 以向列型液晶作为第一个或第三个缺陷层, 当缺陷层间距足够大以致出现缺陷态简并时, 利用外加电场调节向列型液晶缺陷层的光学厚度, 可使缺陷态的透射率发生最大程度的改变. 即使入射光的频率范围与晶体的带隙宽度相同, 利用这种结构, 不仅能够获得带宽极

窄的透射光, 同时还可调节透射光的强度. 这种结构可同时具有窄带滤波器和光开关的功能.

1 带有三个缺陷层的一维光子晶体的性质

本文采用的一维光子晶体由 Te 和 PS 两种介质层交替排列形成, 晶体的周期为 Λ , Te 层的折射率 $n_H = 4.6$, 厚度 $d_H = 0.258\Lambda$; PS 层的折射率 $n_L = 1.6$, 厚度 $d_L = 0.742\Lambda$. 在光子晶体中引入三个厚度都等于 $2.5d_H$ 的 Te 缺陷层, 其结构是, 空气 $\rightarrow (Te/PS)_{N_1} \rightarrow Te$ 缺陷层 $\rightarrow PS \rightarrow (Te/PS)_{N_2} \rightarrow Te$ 缺陷层 $\rightarrow PS \rightarrow (Te/PS)_{N_2} \rightarrow Te$ 缺陷层 $\rightarrow PS \rightarrow (Te/PS)_{N_1} \rightarrow$ 空气, N_1, N_2 是光子晶体周期的数目, 且 $N_1 = 2$.

在光垂直入射的情况下, 第一个光子带隙的无量纲频率范围从 0.135 到 0.28. N_2 较小时, 由于缺陷态间的耦合较强, 在带隙中出现三个缺陷态, 随着 N_2 的增大, 耦合减弱, 缺陷态的频率间隔减小; 当 N_2 等于或大于 6 个周期时, 三个缺陷态简并, 其频率为 0.1816, $N_2 = 4$ 和 6 两种情况下的透射谱如图 1 中的虚线.

三缺陷层的光子晶体可看作是由三个光子晶体组合而成的, 三个晶体各有一个缺陷层. 当三个晶体缺陷模相同时, 整个结构缺陷模的透射率为 1; 当一侧晶体的缺陷模与中央晶体缺陷模不同时, 对于在中央晶体缺陷模内的光波, 这侧光子晶体会禁止它的传播, 因此, 中央晶体缺陷模内的光波在整个结构中的传播受到阻碍.

在三个晶体缺陷态都相同的情况下, 调节第一或第三个缺陷层的光学厚度, 带隙中透射峰的高度就会发生变化. 利用这种机理可设计出窄带光开关.

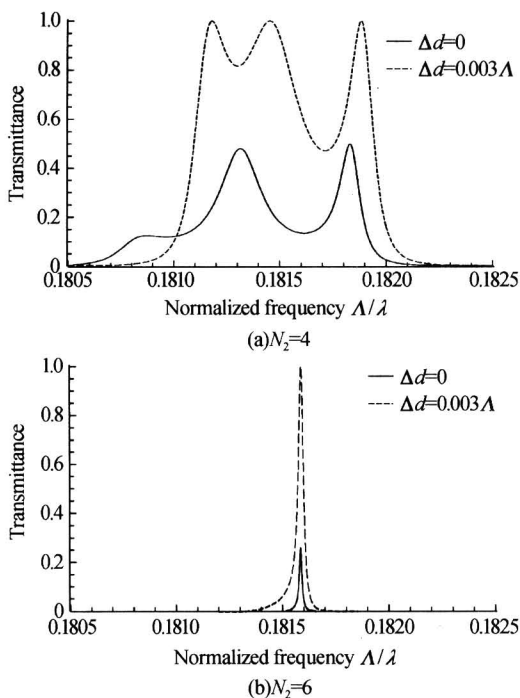


图 1 第三个缺陷层度变化 $\Delta d=0.003\Delta$ 前后, 一维光子晶体的透射谱
 Fig. 1 Transmission spectra for a one-dimensional photonic crystal with 3 defects at $\Delta d=0$ and $\Delta d=0.003\Delta$ represents thickness of the third defect layer

图 1 中的实线是第三个缺陷层的光学厚度变化 $\Delta d=0.003\Delta$ 时, $N_2=4$ 和 6 两种情况下的透射谱. 在 $N_2=6$ 即缺陷态简并的情况下, 透射峰的高度变化最大. 缺陷态的透射率对第三个缺陷层光学厚度的敏感, 是获得高效率光开关的必要条件.

图 1 表明, 缺陷态透射率的改变除了取决于缺陷层光学厚度的变化外, 还与缺陷层的间距 N_2 有关. $\Delta d=0.003\Delta$ 时, 缺陷态透射率最大值与 N_2 的关系如图 2. 可以看出, $N_2 \geq 6$ 时, 透射率趋近于一个极小值, 说明在缺陷态简并情况下, 透射率对第三个缺陷层光学厚度的变化最敏感, 可以获得高效率的光开关.

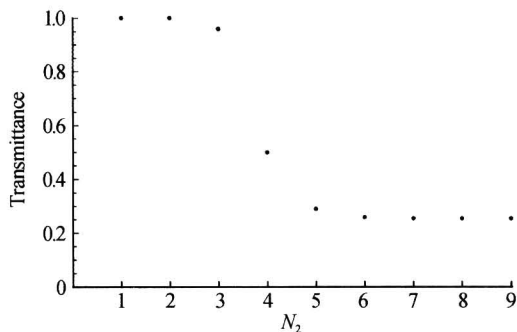


图 2 $\Delta d=0.003\Delta$ 时, 缺陷态的最大透射率与 N_2 的关系
 Fig. 2 Maximum transmittance of defect modes as a function of N_2 at $\Delta d=0.003\Delta$

在出现缺陷态简并的情况下, 通过改变第一或

第三个缺陷层的光学厚度, 可使频率为 0.1816 的缺陷态的透射率发生最大程度的减小, 得到一种高效率的窄带滤波光开关. 如以复色光入射这种结构, 输出光的带宽较窄, 半高宽不超过 3×10^{-5} , 同时还能调节它的强度.

2 引入向列型液晶作为第三个缺陷层

向列型液晶属于单轴晶体, 折射率随外加电场而变化. 在室温下, 向列型液晶 (5BC) 的 o 光和 e 光折射率分别为 $n_o=1.54$, $n_e=1.75$, 折射率之差为 0.209. 以向列型液晶作为第三个缺陷层, 如图 3. 在没有外加电场时, 液晶的长分子轴平行介质界面, 沿 x 轴方向. 施加沿 z 轴方向的电场且在电压大于液晶的阈值电压 V_c 后, 液晶分子的排列发生变化, 长分子轴向 z 轴偏转, 电压越大, 偏转角越大, 直到长分子轴与 z 轴方向平行.

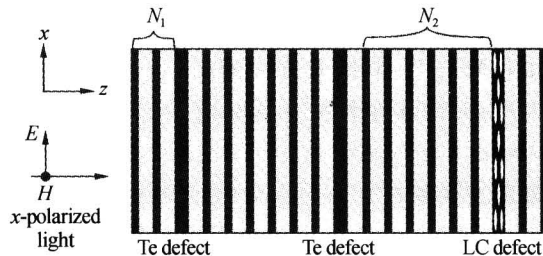


图 3 带有三个缺陷层的一维光子晶体的结构
 Fig. 3 Structure of a one-dimensional photonic crystal containing two Te defects and a nematic liquid crystal defect

2.1 液晶缺陷层厚度的确定

当组成整个结构的三块光子晶体的缺陷态频率都相同时, 整个结构对于在缺陷态频率范围内的光是透明的. 液晶缺陷层的厚度为 0.312Δ , 在无外加电场影响的情况下, 缺陷态的透射率为 1.

2.2 外电场对缺陷态透射率的调节

光矢量沿 x 轴方向的线偏振光垂直入射光子晶体, 在外加电场电压小于 V_c 时, 线偏振光在液晶层中的折射率为 1.75. 随着外加电场的增强, 液晶的长分子轴会向外电场方向 (z 方向) 偏转, 使线偏振光在液晶中的折射率由 1.75 开始变化, 直到 1.54, 相应的缺陷态的透射率会由 1 减小到 3.7%.

向列型液晶是非均匀的各向异性晶体, 用 4×4 传输矩阵法^[6,14] 对这种结构的透射谱进行计算. 图 4 给出了外电场电压 V 与缺陷态透射率 T 的关系. $V/V_c \leq 1$ 时, 缺陷态的透射率为 1; $V/V_c = 5.24$ 时, 透射率减小到 5.0%; $V/V_c = 10.47$ 时, 透射率为 4.4%, 接近于 3.7% 的最小值. 缺陷态的透射率为 1 时, 透射峰的半高宽仅为 3×10^{-5} .

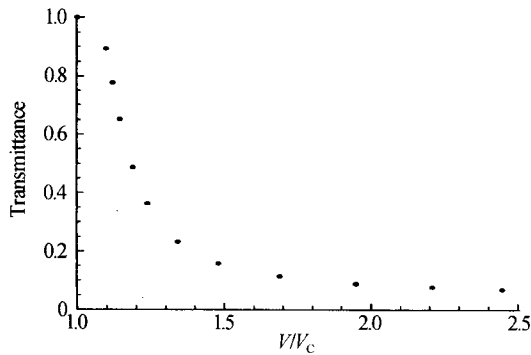


图4 $N_2=6$ 时,缺陷态透射率与液晶上所加电压的关系
Fig. 4 Calculated transmittance of defect mode in the photonic crystal containing a nematic liquid crystal defect for $N_2=6$ as a function of V/V_c

2.3 光开关的阈值

若以透射率达到 5% 作为形成光开关的标准,把透射率达到 5% 时的电压称为光开关的阈值. 在 $N_1=2$ 的情况下, $N_2=6$ 和 $N_2=7$ 时,光开关的阈值电压都为 $5.24V_c$,说明在缺陷态简并的情况下,增大 N_2 并不会减低光开关的阈值; $N_2=5$,电压为 $18.05V_c$ 时,透射率为 5.3%,电压继续增大,透射率变化非常缓慢,光开关阈值比缺陷态简并情况下的阈值大得多.

如果要进一步减小光开关的阈值,就必须增大 N_1 . 例如,在 $N_1=3$ 的情况下, $N_2=7$ 时缺陷态简并,其透射率在 1 到 0.09% 之间变化,光开关的阈值电压仅为 $1.09V_c$.

3 结论

以液晶作为光子晶体的第一或第三个缺陷层,通过外加电场改变向列型液晶的折射率,缺陷态的透射率会发生变化. 在缺陷态发生简并的情况下,其透射率可以得到最大程度的调节,从而获得低阈值的光开关. 它不仅可用作窄带滤波器,得到带宽较窄的透射光,同时还能对其强度进行调节. 这种结构同时兼具滤波器和低阈值光开关的功能.

参考文献

- 1 John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. *Phys Rev Lett*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 2 梁华秋,冯尚申. 在高频区存在巨带隙的长方晶格二维光子晶体. *光子学报*, 2005, **34**(5): 781~784
Liang H Q, Feng S S. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(5): 781~784

- 3 安丽萍,刘念华. 一维光子晶体中多缺陷耦合导致的杂质带. *光子学报*, 2003, **32**(9): 1083~1085
An L P, Liu N H. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9): 1083~1085
- 4 孙志红. 由光子晶体局域模对称关系分析其简并性. *光子学报*, 2005, **34**(3): 468~472
Sun Z H. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 468~472
- 5 Lee H T, Yao T. Design and evaluation of omnidirectional one-dimensional photonic crystals. *Journal of Applied Physics*, 2003, **93**(2): 819~830
- 6 Ha Y K, Yang Y C, Kim J E. Tunable omnidirectional reflection bands and defect modes of a one-dimension photonic band gap structure with liquid crystals. *Appl Phys Lett*, 2001, **79**(1): 15~17
- 7 Scalora M, Dowling J P. Optical limiting and switching of ultrashort pulses in nonlinear photonic band gap materials. *Physical Review Letters*, **73**(10): 1368~1371
- 8 Ozaki R, Matsui T. Electro-tunable defect mode in one-dimension periodic structure containing nematic liquid crystal as a defect layer. *Jan J Appl Phys*, 2002, **41**(12B): L1482~L1484
- 9 Ozaki R, Matsuhisa Y. Electrically tunable lasing based on defect mode in one-dimensional photonic crystal with conducting polymer and liquid crystal defect layer. *Appl Phys Lett*, 2004, **84**(11): 1844~1846
- 10 Jiang H T, Chen H. Engineering photonic crystal impurity bands for multiple channeled optical switches. *Chinese Physics Letter*, 2004, **21**(1): 101~103
- 11 Villeneuve P R, Fan S. Microcavities in photonic crystals: mode symmetry, tenability, and coupling efficiency. *Phy Rev B*, 1996, **54**(11): 7837~7842
- 12 Kee C S, Kim J E. Defect modes in a two-dimensional square lattice of square rods. *Phy Rev E*, 1998, **58**(6): 7908~7912
- 13 Kuzmiak V, Maradudin A A. Distribution of electromagnetic field and group velocities in two-dimensional periodic systems with dissipative metallic components. *Phy Rev B*, 1998, **58**(11): 7230~7251
- 14 Berreman D W. Optics in smoothly anisotropic planar structure: Application to liquid-crystal twist cells. *Journal of The Optical society of America*, 1973, **63**(11): 1374~1380

Tunable Transmittance of Defect Modes in One-dimensional Photonic Crystal with 3 Defects

Liu Dandong¹, Chen Guangde¹, Li Puxuan¹, Sun Zhongyu²

¹ School of Sciences, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

² School of Telecommunication Engineering of AFEU., Xi'an 710077

Received date: 2005-06-07

Abstract By propagation matrix method, the property of one-dimensional photonic crystals with 3 defects was analyzed. On condition that the distance between adjacent defects in the photonic crystals was long enough for a degenerate defect mode to be produced, transmittance of the degenerate defect mode can be tuned to the full extent by a change of the optical path of one of defect layers in the photonic crystal. Nematic liquid crystal was introduced as one of the defect layers. As a result, the transmittance of the degenerate defect mode in the structure can be tuned by a change of the refractive index of the liquid crystal upon the application of an electric field. For the system, the maximum of transmittance was 1 and the minimum approachd 0, which were calculated by 4×4 propagation matrix. Possible applications of this system were discussed, especially in the field of communication where a optic switch can be produced.

Keywords Photonic crystal; Defect mode; Optical switch; Filter



Liu Dandong was born in 1968, in Shanxi. He received the M. S. degree from Xi'an Institute of Optics and Precision mechanics of Chinese Academy of Sciences in 1995. His main research interest is in the field of photonic band-gap structure.