

一维含单负材料光子晶体塔姆态的偏振特征

李文胜, 张 琴, 黄海铭, 付艳华

(湖北汽车工业学院 理学院, 湖北 十堰 442002)

摘 要: 用磁单负材料 A 和电单负材料 B 组成了 $(ABBA)^N$ 型一维光子晶体, 利用传输矩阵法计算表明: 在 4 500~7 500 nm 间出现了 3 个塔姆态。这些塔姆态有如下特性: 入射角增加, 其透射率不变, 但半峰全宽度变窄, 位置发生蓝移; 在同一入射角时, TM 波塔姆态的蓝移量大于 TE 波的。两介质的几何厚度同时增加时, TE 波和 TM 波塔姆态的透射率和半峰全宽度均保持不变, 但其位置都发生了红移。A 介质的介电常数 ϵ_A 增加, TE 波和 TM 波塔姆态的透射率均保持不变, 但位置都发生了红移, 其半峰全宽度都是先变窄再变宽。

关键词: 单负材料; 光子晶体; 塔姆态; 偏振

中图分类号: O434 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)05-1600-05

Polarization properties of Tamm state of one-dimensional photonic crystal containing single-negative materials

Li Wensheng, Zhang Qin, Huang Haiming, Fu Yanhua

(School of Science, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002, China)

Abstract: An $(ABBA)^4$ -type one-dimensional photonic crystal was made from magnetic single -negative material A and electric single-negative materials B. Numerical calculation results indicate that there are three Tamm states in the range of 4 500-7 500 nm with following characteristics. When the incident angle increases, the transmittance of Tamm states remain the same, but their location blue shifts. The shift rate of TE wave's Tamm states is larger than TM wave's at same incident angle. When geometric thickness of two media increases at the same time, the transmittance and the full-width half-maximum of Tamm states of TE and TM wave remain the same, but their location red shifts. When permittivity of A medium ϵ_A increases, the transmittance of Tamm states of TE and TM wave remain the same, but their location red shifts, and their full-width half-maximum will be narrowed and then widened.

Key words: single-negative material; photonic crystal; Tamm state; polarization

收稿日期: 2013-09-04; 修订日期: 2013-10-07

基金项目: 湖北省教育厅科学技术研究项目(Q20122307)

作者简介: 李文胜(1955-), 男, 教授, 主要从事光子晶体方面的研究。Email: liwensheng200099@sina.com

0 引言

塔姆态是前苏联物理学家Tamm于1933年提出的,它实质上是晶体的周期性势场在表面处发生中断而引起的一种附加能级。2005年Vinogradov等人提出了一种由于光子晶体异质结的界面隧穿效应而产生的光学局域态——光学塔姆态^[1-3]。光学塔姆态是由传统的塔姆态类比而来,它是一种界面局域态,即增强的场局域在不同材料的交界处。它并不是基于布拉格散射机制,而是布洛赫波矢实部为零的点被打开而形成的布洛赫波矢为零的带隙^[4]。和传统的塔姆态相比,光学塔姆态可由TE或TM偏振态的光直接激发。由于光学塔姆态在传感器、滤波器、极化激光器、光开关等方面存在着广泛的应用前景^[5-7],因此,含特异材料光子晶体的光学塔姆态引起了人们的广泛关注。为进一步研究塔姆态的偏振特征,构造了由磁单负材料A和电单负材料B组成的(ABBA)⁴型一维光子晶体。并利用传输矩阵法讨论了入射角、磁单负材料的介电常数、电单负材料磁导率和两介质的几何厚度变化时,在特定波长范围内,该光子晶体塔姆态的偏振特性,为其进一步的理论研究提供参考。

1 物理模型

组成光子晶体的A、B两材料分别为磁单负材料和电单负材料,设磁单负材料的介电常量为 ϵ_A ,其磁导率满足^[8]:

$$\mu_A = 1 - (\omega_{mp}^2 / \omega^2) \quad (\omega < \omega_{mp}) \quad (1)$$

电单负材料的磁导率为 μ_B ,其介电常数满足^[9]:

$$\epsilon_B = 1 - (\omega_{ep}^2 / \omega^2) \quad (\omega < \omega_{ep}) \quad (2)$$

式中: ω_{mp} 和 ω_{ep} 分别是磁等离子体频率和电等离子体频率。设A、B两介质的几何厚度分别为a、b。

采用传输矩阵法,上述光子晶体的总传输矩阵为:

$$M = \prod_k^N T_{kA} T_{kB} \cdot \prod_k^N T_{kB} T_{kA} \quad (3)$$

式中: T_{kA} 和 T_{kB} 分别是第k周期中A、B介质的特征矩阵; N 为周期数。对于第k周期中的j(j分别取A、B)介质层,其特征矩阵 T_{kj} 的具体表示是^[10]:

$$T_{kj} = \begin{bmatrix} \cos \delta_{kj} & i \sin \delta_{kj} / \eta_j \\ i \eta_j \cos \delta_{kj} & \cos \delta_{kj} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $\delta_{kj} = 2\pi d_j n_j \cos \theta_j / \lambda$; η_j 是j介质的导纳,对TE波, $\eta_j = \sqrt{\epsilon_j / \mu_j} \cos \theta_j$,而对TM波, $\eta_j = \sqrt{\epsilon_j / \mu_j} / \cos \theta_j$; ϵ_j 、 μ_j 和 θ_j 分别为第k周期中j介质的相对介电常数、相对磁导率和电磁波在此介质层中的折射角。

2 计算结果及分析

设光子晶体两外侧都是空气,电磁波的入射角为 θ 。对磁单负材料A,取 $\epsilon_A = 5$, μ_A 由公式(1)得到,对电单负材料B取 $\mu_B = 1.5$, ϵ_B 由公式(2)得到。A、B两介质的几何厚度分别取 $a = 2.00 \mu m$, $b = 1.87 \mu m$,磁等离子体频率 ω_{mp} 和电等离子体频率 ω_{ep} 均取 10^9 Hz。

2.1 入射角不同时 TE、TM 波的塔姆态

为讨论入射角不同时TE、TM波的塔姆态,其他参数保持不变,当入射角 θ 从 0° 增加到 60° 时,上述光子晶体TE、TM波的透射谱如图1所示。从图中可见,电磁波垂直入射时,TE、TM波的透射谱完全相同:4500~7500 nm间有一禁带,但其间有3个尖锐的透射峰。这3个透射峰对应(ABBA)⁴型光子晶体中3个“AA”界面处因隧穿效应而产生的局域态即塔姆态。这3个塔姆态以6000 nm为中心且呈对称分布,中间的塔姆态较宽,而两侧的较窄。入射角 θ 增加时,TE、TM波的塔姆态均发生蓝移,且移动有如下规律:入射角相同, TM波塔姆态的蓝移量大于TE波的;无论是TE波还是TM波,长波处塔姆态的蓝移量大于短波处的。入射角越大,上述特征越明显。

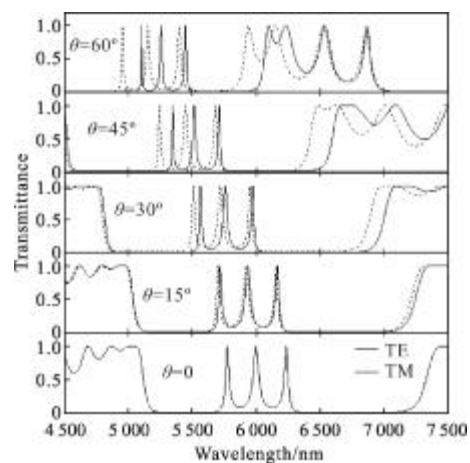


图 1 入射角不同时 TE 和 TM 波的塔姆态

Fig.1 Tamm states of TE and TM waves at different incident angles

2.2 介质材料厚度不同时 TE、TM 波的塔姆态

为探讨介质材料的几何厚度对塔姆态的影响,入射角取 40° ,保持其他参数不变。当 A、B 两介质材料的几何厚度同时从 $1.0 \mu\text{m}$ 增加到 $3.0 \mu\text{m}$ 时,TE、TM 波塔姆态的变化分别如图 2 中(a)、(b)所示。

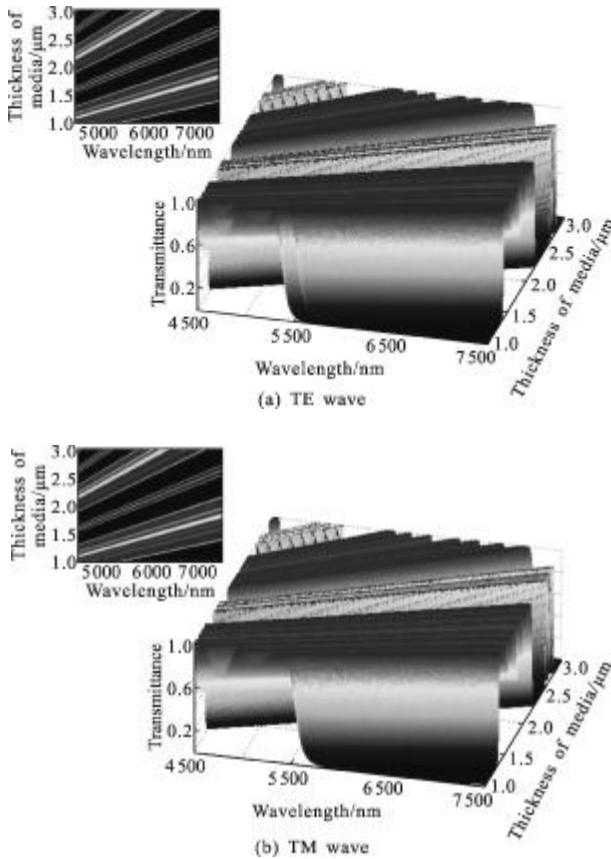


图 2 介质的几何厚度不同时 TE 波和 TM 波的塔姆态
Fig.2 Tamm states of TE and TM waves at different thickness of media

从图 2 中可见,两介质材料的几何厚度同时变化不影响各塔姆态的透射率和其半峰全宽度,只影响它们各自的位置。从图(a)可见,两介质的几何厚度同时增加时,TE 波各塔姆态的位置均发生了红移,且移动率都为常量。从图中进一步计算可得,从短波到长波各塔姆态中心位置对材料几何厚度的红移率 $\Delta\lambda/\Delta d$ 分别为 1.83、1.93 和 1.98。从图(b)可见,TM 波的塔姆态随两介质几何厚度的变化规律与 TE 波的不同,各对应的红移率分别为 1.87、1.93 和 1.98。

2.3 磁导率不同时 TE、TM 波的塔姆态

为探讨电单负材料的磁导率不同时,上述塔姆态的变化情况,光子晶体的各参数保持不变,仅是 B

介质的磁导率 μ_B 变化。数值计算表明,当入射角为 40° , μ_B 从 1 增加到 4 时,上述塔姆态的变化情况如图 3 所示。

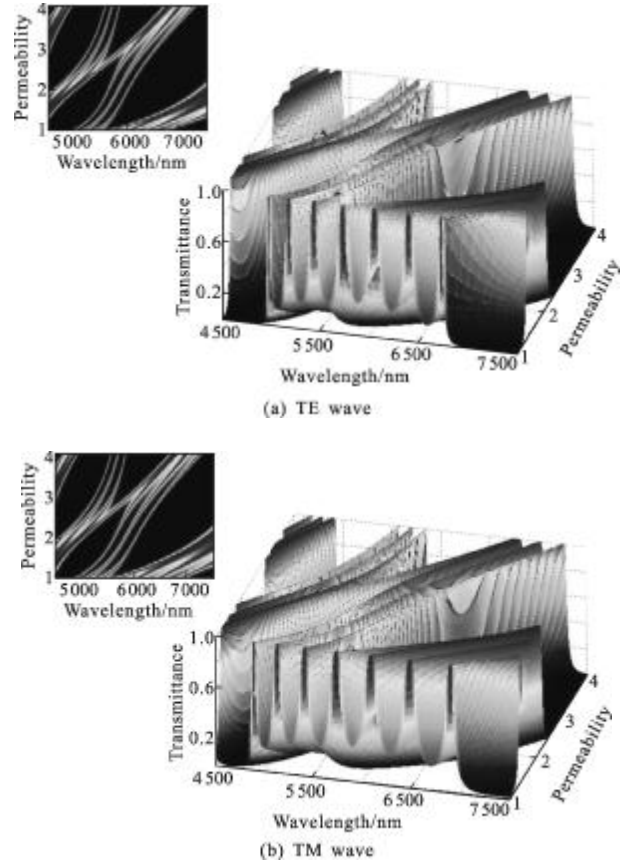


图 3 介质的磁导率不同时 TE 波和 TM 波的塔姆态
Fig.3 Tamm states of TE and TM waves at different permeability

从图 3(a)可见,在上述条件下,磁导率增加时,各塔姆态的透射率保持不变,但各态中心位置均发生红移,且对应的半峰全宽度也变化不一。从附图可进一步看出,塔姆态中心位置对磁导率的移动率为变量,磁导率增加时,各塔姆态的半峰全宽度都是先变窄再变宽,塔姆态中心的波长越长,其半峰全宽度的上述变化越明显。磁导率增至 3.2 时,短波端塔姆态增宽和原禁带分裂出的透射峰合成一较宽的塔姆态。TM 波塔姆态随磁导率的变化与 TM 波的相同。

2.4 介电常数不同时 TE、TM 波的塔姆态

为探讨磁单负材料的介电常数不同时,上述塔姆态的变化情况,光子晶体的各参数保持不变,仅是 A 介质的介电常数 ϵ_A 变化。数值计算表明,当入射角为 40° , ϵ_A 从 3 增加到 7 时,上述塔姆态的变化情况如图 4 所示。

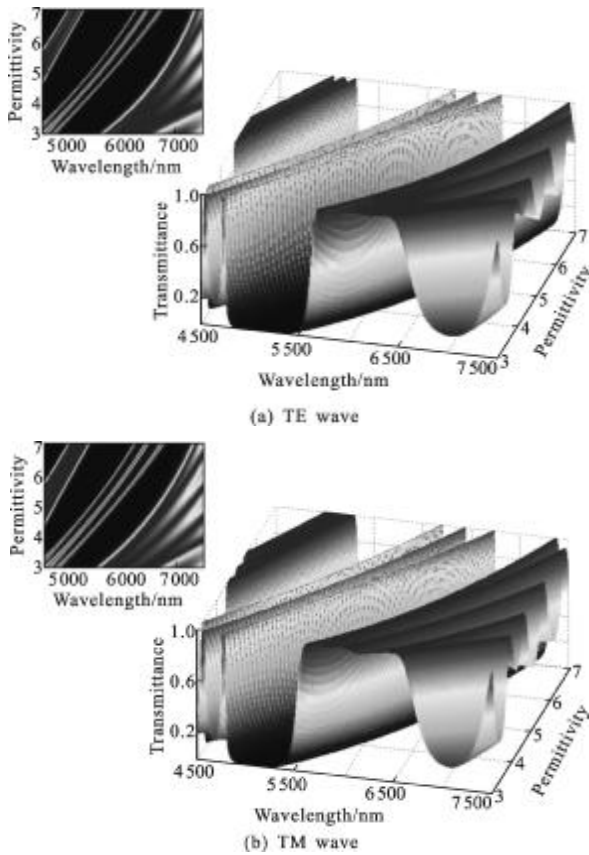


图 4 介质的介电常数不同时 TE 波和 TM 波的塔姆态
Fig.4 Tamm states of TE and TM waves at different permittivity

从图 4(a)可见,在上述条件下,介电常数增加时,各塔姆态的透射率保持不变,但各态中心位置均发生红移。从附图可见,各塔姆态中心位置与介电常数间呈非线性关系,介电增加时,各塔姆态的半峰全宽度都是先变窄再变宽。TM 波塔姆态随介电常数的变化与 TM 波的相同。

3 理论分析

对于上述光子晶体的塔姆态分别随入射角、材料的几何层厚度、介质的磁导率和介电常数的变化规律,可以从理论上作一简要分析。依一维光子晶体及传输矩阵法的特点,把两层介质作为一个基本的传输单元,从左到右共有 AB 和 BA 两种传输单元。设 AB 传输单元的传输矩阵为:

$$T_A T_B = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{21} \\ T_{12} & T_{22} \end{bmatrix} \quad (5)$$

则第二类切比雪夫多项的综量^[11]为:

$$\chi = \frac{T_{11} + T_{22}}{2} \quad (6)$$

由公式(4)及 A、B 层介质的特点,计算可得

$$\chi = \cos \delta_A \cos \delta_B - \frac{\eta_A^2 + \eta_B^2}{2\eta_A \eta_B} \sin \delta_A \sin \delta_B \quad (7)$$

其中,

$$\delta_A = 2\pi \sqrt{\epsilon_A \mu_A} a \cos \theta_A / \lambda \quad (8)$$

$$\delta_B = 2\pi \sqrt{\epsilon_B \mu_B} b \cos \theta_B / \lambda \quad (9)$$

由切比雪夫多项式的性质^[12]可知,当 $\chi=1$ 时,单元的传输矩阵 $T_A T_B$ 是单位矩阵,对于 BA 传输单元也可作完全相同的分析,因而上光子晶体的总传输矩阵也是单位阵。此时的透射率 $T=1$,对应透射谱中的塔姆态的中心。由公式(7)可知,当 $\delta_A = \delta_B = 2k\pi$ 时,切比雪夫多项的综量满足 $\chi=1$ 。由公式(8)、(9)有:

$$\sqrt{\epsilon_A \mu_A} a \cos \theta_A = k\lambda \quad (10)$$

$$\sqrt{\epsilon_B \mu_B} b \cos \theta_B = k\lambda \quad (11)$$

由 Snell 定律可知,两介质中的折射角 θ_A 和 θ_B 满足

$$\theta_A = \arcsin(n_0 \sin \theta / \sqrt{\epsilon_A \mu_A}) \quad (12)$$

$$\theta_B = \arcsin(n_0 \sin \theta / \sqrt{\epsilon_B \mu_B}) \quad (13)$$

由公式(12)、(13)可见,入射角 θ 增加,两介质中的折射角 θ_A 和 θ_B 也增加,由公式(10)、(11)可见,介质厚度 a 、 b 一定,满足公式(10)、(11)的波长 λ 变短。这就是入射角增加,塔姆态发生蓝移的简单解释。由公式(10)或(11)直接可知,入射角 θ 一定,介质的几何厚度 a 、 b 增加,满足公式(10)或(11)的波长变长,且两者有线性关系。这就是介质的厚度增加,塔姆态红移,且移动率为常数的解释。同理,不难解释 ϵ_A 或 μ_B 增加时,塔姆态红移且移动量与介电常数间呈非线性关系的现象。

4 结论

由以上讨论可知,用磁单负材料 A 和电单负材料 B 组成的(ABBA)^N型一维光子晶体,在 4 500~7 500 nm 间出现了 3 个塔姆态。这些塔姆态有如下特性:(1) 入射角增加,其透射率不变,但半峰全宽度变窄,位置发生蓝移;入射角相同, TM 波塔姆态的蓝移量大于 TE 波的。(2) 两介质的几何厚度同时增加时, TE 波和 TM 波塔姆态的透射率和半峰全宽度均保持不变,但其位置都发生了红移。从短波到长波 TE 波 3 个塔姆态的红移率 $\Delta\lambda/\Delta d$ 分别为 1.83、1.93 和 1.98;

TM 波的塔姆态相应的红移率分别为 1.87、1.93 和 1.98。(3) 仅是 B 介质的磁导率 μ_B 从 1 增加到 4 时, TE 波和 TM 波塔姆态的透射率均保持不变,但位置都发生了红移,其半峰全宽度都是先变窄再变宽。(4) 仅是 A 介质的介电常数 ϵ_A 从 3 增加到 7 时, TE 波和 TM 波塔姆态的透射率均保持不变,位置都发生了红移,移动率为变数。各塔姆态的半峰全宽度都是先变窄再变宽。光子晶体塔姆态的上述偏振特性对其理论和实验研究具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission solid state physics and electronics [J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 58(20): 2059-2062.
- [2] Lindell I V, Tretyakov S A, Nikoskinen K I, et al. BW-media with negative parameters capable of supporting backward wave[J]. *Microw and Opt Tech Lett*, 2001, 31(2): 129-133.
- [3] Belov P A. Backward wave and negative refraction in uniaxial dielectrics with negative dielectric permittivity along the anisotropy axis [J]. *Microw and Opt Tech Lett*, 2003, 37(4): 259-263.
- [4] Zhang Zhengren, Long Zhengwen, Yuan Yuqun, et al. The band structure of symmetrical structured 1-D photonic crystal with single-negative materials [J]. *Acta Physica Ainica*, 2010, 59(1): 587-591. (in Chinese)
张正仁, 隆正文, 袁玉群, 等. 对称型单负交替一维光子晶体的能带结构[J]. *物理学报*, 2010, 59(1): 587-591.
- [5] Wang Chong, Peng Tongjiang, Duan Tao. Preparation and band-gap properties of heterostructure photonic crystal [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2010, 39(2): 474-480. (in Chinese)
王充, 彭同江, 段涛. 异质结构光子晶体的制备与带隙特性研究[J]. *人工晶体学报*, 2010, 39(2): 474-480.
- [6] Li Wensheng, Fu Yanhua, Shi Dufang. Study of transmission propertier of quasi-periodic 1-D photonic crystal containing left-hanged materials [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2009, 3(6): 274-278. (in Chinese)
李文胜, 付艳华, 是度芳. 含左手材料的一维准周期光子晶体的透射特性[J]. *量子光学学报*, 2009, 3(6): 274-278.
- [7] Li Wensheng, Luo Shijun, Huang Haiming, et al. Tunneling mode in symmetrical one-dimensional photonic crystal of single-negative material [J]. *Acta Physica Ainica*, 2012, 61(17): 174101. (in Chinese)
李文胜, 罗时军, 黄海铭, 等. 由单负材料组成的一维对称型光子晶体中的隧穿模 [J]. *物理学报*, 2012, 61(17): 174101.
- [8] Dong Lijuan, Jiang Haitao, Yang Chengquan, et al. The transmission properties of pairing structure of negative permittivity and negative permeability materials [J]. *Acta Physica Ainica*, 2007, 56: 4657. (in Chinese)
董丽娟, 江海涛, 杨成全, 等. 介电常数材料与负磁导率材料双层结构的透射特性[J]. *物理学报*, 2007, 56: 4657.
- [9] Ruppin R. Surface polaritons of a left-handed material slab [J]. *Phys Condens Matter*, 2001, 13: 1811.
- [10] Li Wensheng, Zhang Qin, Huang Haiming, et al. Application of photonic crystal containing liquid-crystal[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1542-1546. (in Chinese)
李文胜, 张琴, 黄海铭, 等. 含液晶层光子晶体的应用研究[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(6): 1542-1546.
- [11] Li Wensheng, Huang Haiming, Fu Yanhua, et al. Polarization properties of photonic crystal tunneling mode containing single-negative materials [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 67. (in Chinese)
李文胜, 黄海铭, 付艳华, 等. 含单负材料光子晶体隧穿模的偏振特性[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(8): 67.
- [12] Lin Yongchang, Lu Weiqian. Principle of Optical Thin Films [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1990: 40-44. (in Chinese)
林永昌, 卢维强. 光学薄膜原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1990: 40-44.