

基于 Thue-Morse 序列准周期光子晶体的全光二极管现象

陈宪锋 薛峰 汪萨克 唐斌

(常州大学数理学院, 江苏 常州 213164)

摘要 利用传输矩阵法研究了 Thue-Morse 序列准周期光子晶体的传播特性。线性结构的共振谱具有自相似的分形结构,共振模在晶体中的电场分布也具有类似的自相似结构。对于具有 Kerr 非线性的奇数阶 Thue-Morse 序列结构,由于其内部电场分布的不对称性,可以导致正反向入射时不同的双稳态现象。通过额外的抽运光激励,可以实现某光强的光单向透射,使得结构真正体现全光二极管的功能。

关键词 非线性光学;传输矩阵;自相似;双稳态;光学二极管

中图分类号 O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.011901

All-Optical Diode Action in Quasi-Periodic Photonic Crystals Based on Thue-Morse Sequence

Chen Xianfeng Xue Feng Wang Sake Tang Bin

(School of Physics and Mathematics, Chanzhou University, Changzhou, Jiangsu 213164, China)

Abstract The propagation of light waves in quasi-periodic photonic crystals based on the Thue-Morse sequence is investigated by the transfer matrix method. The linear transmission spectrum of such photonic structures exhibits a fractal nature of self-similar pattern, so as the electric field distribution. If the order number of Thue-Morse sequence is odd, the electric-field profile in the quasicrystal is asymmetric. In the case of Kerr nonlinearity, this will result in different bistability sensitive to the propagation direction. Under a certain condition, the light wave can unidirectionally transmit with external pump-assisting. This provides the realization of all-optical diode.

Key words Nonlinear optics; transfer matrix; self-similar; bistability; optical diode

OCIS codes 190.4360; 190.1450; 190.3270

1 引言

理想的光学二极管具有单向导通性,即只让单一方向的某频率的光信号通过。这是一种重要的非线性光学器件,可用于光隔离器和全光控制过程。这类光学二极管大多利用磁光效应^[1],或者非线性光学效应来实现。前者需要外加磁场,后者是将非线性材料设计成非对称结构。如可以递增组成光子晶体的两种介质的折射率或厚度,利用带边共振模局域在高或低折射率层内引起不同的非线性效应来实现非互易传输^[2];可以引进结构不对称的非线性缺陷,利用缺陷两侧反射镜透射率的不同来实现光传输的各向异性^[3];也可以采用多个不同共振腔的耦合模来实现^[4]。这类不对称的结构虽然能够实现非互易的光传输,但是正向的透射率都不太高,正反向透射率的对比度也不是很大,Lin 等^[5]提出利用抽运激发可提高正反向的透射率对比度。

准周期晶格是按一定的迭代规律生成的结构,是介于无序晶体和周期光子晶体之间的一种中间态。不同的迭代规律可形成不同的序列结构,如 Fibonacci、Thue-Morse (ThM)、Rudin-Shapiro、Cantor 序列等。Fibonacci 序列由于其 Fourier 空间谱的自相似性,在非线性光学如三次谐波产生中有着重要的应用^[6]。事

收稿日期: 2012-07-03; **收到修改稿日期**: 2012-09-24; **网络出版日期**: 2012-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(61107055)和江苏省自然科学基金(BK2011229)资助课题。

作者简介: 陈宪锋(1970—),男,硕士,副教授,主要从事非线性光学方面的研究。E-mail: cxf@cczu.edu.cn

实上,其他序列的准晶体也有一些潜在的应用^[7~9]。本文基于 ThM 序列,利用奇数阶 ThM 本身所具有的空间不对称性,来研究其全光开关特性,实现光学二极管的单向传输。

2 模型与理论

设 A、B 代表两种不同性质的基元, ThM 序列晶格按以下规律生成: $A \rightarrow AB, B \rightarrow BA$ 。令起始层为 $S_0 = A$, 则其他的 ThM 序列为: $S_1 = AB, S_2 = ABBA, S_3 = ABBABAAB, \dots$ 。可以发现, n 阶 ThM 序列 (ThM_{*n*}) 是由两个简单块构成, $S_n = S_{n-1} \tilde{S}_{n-1}$, 其中 S_{n-1} 为 $(n-1)$ 阶 ThM 序列, 而 \tilde{S}_{n-1} 为 S_{n-1} 的共轭块, 是 S_{n-1} 中基元 A、B 互换而得。

若 A、B 代表不同的介质层, 设 A 层介质为聚苯乙烯, 折射率 $n_A = 1.59$, 非线性系数 $n_{2A} = 1.14 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{MW}$ ^[10], 厚度 $d_A = 236 \text{ nm}$; B 层介质为 TiO₂, $n_B = 2.45$, $n_{2B} = 1.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{MW}$, $d_B = 153 \text{ nm}$; 中心波长 $\lambda_0 = 1.5 \mu\text{m}$ 。按上述的迭代规律可以得到一维的 ThM_{*n*} 序列准周期光子晶体, 当 n 为偶数时晶体是一对称结构, 而当 n 为奇数时结构不对称。

对于这样一个 ThM 序列结构, 计算其线性透射率时, 正入射下第 j 层介质的传输矩阵为

$$\mathbf{M}_j = \begin{pmatrix} \cos \delta_j & -\frac{i}{n_j} \sin \delta_j \\ -in_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{pmatrix},$$

式中相位 $\delta_j = \frac{\omega}{c} n_j d_j$ 。整个序列的总传输矩阵为 $\mathbf{M} = \prod_j \mathbf{M}_j$, 若结构置于空气中, 则其透射率为 $T = \frac{4}{|m_{11} + m_{12} + m_{21} + m_{22}|^2}$, 分母中各项为 \mathbf{M} 的矩阵元。

若考虑每层介质的 Kerr 非线性效应, 则 A 层折射率为 $n_1 = n_A + n_{2A} I$, B 层折射率 $n_2 = n_B + n_{2B} I$, 这时应采用逆向递推传输矩阵算法^[11]来进行, 即通过给定的输出光强 I_t 得到唯一的输入光强 I_i , 从而可以获得输入-输出特性曲线来研究双稳态特性。

3 结果与讨论

3.1 线性介质的共振模

利用传输矩阵理论研究了线性 ThM_{*n*} 系列结构的透射谱, 发现共振峰的位置具有一定的规律。随着阶数 n 的增大, 除了出现前一阶 ThM 系列的共振峰外, 还在它们的任两个共振峰之间出现一个新的共振峰, 共振模谱具有分形结构, 如图 1(a) 所示, 该分布结构与用迹图^[12]得到的相一致。图 1(b) 则给出了 ThM₇ 的透射谱, 以供比较。

由图 1 可以发现, ThM 系列的透射谱是以 $\omega/\omega_0 = 2$ 为周期, 在该周期内呈对称分布。更进一步的研究发现, 若 A、B 介质层的相位比 $\delta_A/\delta_B = m/n$ (m, n 为最小互质数), 则透射谱以 $\omega/\omega_0 = (m+n)$ 为周期, 其共振模谱与图 1(a) 相似, 同样具有自相似的分形结构。

为了弄清楚共振模在 ThM 结构中的传播形为, 研究了不同共振模在晶体中的电场强度 $|E|^2$ 分布。图 2 绘出了共振模 $\omega/\omega_0 = 0.7085$ [在图 1(a) 中用箭头标注] 在 ThM₇ (128 层)、ThM₈ (256 层) 和 ThM₉ (512 层) 中的电场分布图像。从图 2 可以看到, 电场分布同样具有一种自相似结构。

若将 ThM₇ 中的电场分布图像看成两块, 左边一块 (64 层) 中的电场分布视为块 A, 右边 64 层中的电场

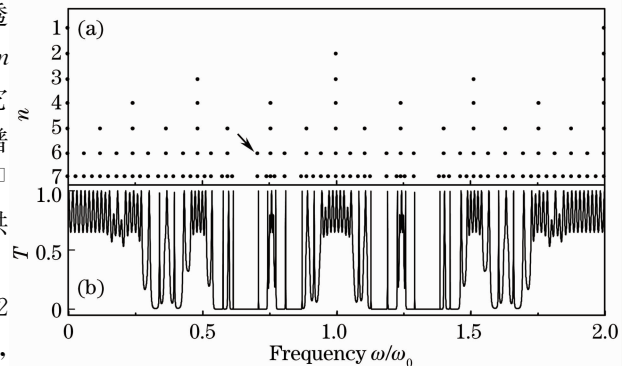


图 1 ThM_{*n*} 序列的透射谱。(a) 不同阶数 n 的共振模谱; (b) ThM₇ 的透射谱

Fig. 1 Transmission spectrum for ThM_{*n*} sequence. (a) Resonant mode spectra for different orders n ; (b) transmission spectrum for ThM₇ sequence

分布视块 B, 则 ThM_7 中的电场分布结构可视为 AB, 而 ThM_8 、 ThM_9 、…… 中的电场分布可视为 ABBA、ABBABAAB、……, 这种结构类似于 ThM'_1 、 ThM'_2 、 ThM'_3 、…… 序列。对于其他的共振模, 也有类似的自相似结构: 若该共振模首次出现的低阶 ThM 序列的阶数为 m , 则该模在高阶 ThM_l 中的电场分布结构类似于 $\text{ThM}_{(l-m)}$ 序列。

而且研究还发现, 若共振模首次出现的 ThM 序列的阶数 n 为偶数, 则该模在高阶 ThM 序列中的电场分布图像划分的两个块 A、B 差异较大, 如图 2 所示; 若是首次出现的阶数 n 为奇数, 则它的高阶 ThM 序列中电场分布图像划分的两个块 A、B 的差异性降低(在此没有画出)。

要实现明显的光传输的各向异性, 必须利用结构的不对称性来实现, 如电场强度分布的不对称性将导致不同方向的光产生不同的非线性效应^[13]。ThM 序列的共振模具有一些独特的性质: 除了自相似的分形结构外, 处于赭带隙(这样称谓是由于其不满足平移对称性)中的最早在偶数阶 ThM 序列中出现的共振模, 不仅其透射率为 1(完美透射), 而且其高阶奇数阶 ThM 序列中的电场分布具有明显的不对称性。这些特点非常适合于研究光学二极管效应。

3.2 非线性特性

基于上述研究, 选取线性共振模 $\omega_r/\omega_0 = 0.7085$, 准周期结构为 ThM_7 序列, 入射光的频率为 $\omega/\omega_0 = 0.7080$ 。考虑各层介质的 Kerr 非线性, 利用逆向递推传输矩阵算法来研究 ThM_7 序列的双稳态特性, 如图 3 所示。

从图 3 可以发现, 正、反向入射的光, 其双稳态曲线并不相同, 这是由于结构不对称所致。在图 3 中, 正向入射时双稳态的上下阈值分别为 7.22 MW/cm^2 和 3.98 MW/cm^2 , 而反向入射时双稳态的上下阈值分别为 11.22 MW/cm^2 和 8.12 MW/cm^2 。因此可将图 3 划分为 5 个区域, 如图所示。对于 I、V 区域, 正、反向的透射率同时处于低支(I 区)或高支(V 区), 不适宜实现单向透射。IV 区由于反向入射时存在两个透射态, 也不太适宜使用。III 区可以实现在正、反向传输时处于不同的透射态, 一般的二极管就是工作在这一状态下^[2~4]。当入射光的能量处于该区域时, 不需要额外的抽运光, 仅依靠自身能量(自诱作用)就可以实现单向透射。但是在该状态下工作的二极管, 正、反向透射率一般都不高。如若入射光能量为 7.3 MW/cm^2 时, 正向透射率 $T_+ = 0.62$, 其正反向透射率比 $C \approx 6.9$, 因此实用价值不高。

对于 II 区, 反向入射光处于低透射支, 而正向入射光却有两个状态, 仅靠入射光的自诱作用无法达到高透射态。正如文献[5]所述, 如果采用额外的抽运光激励, 使其达到高透射态, 那么即使抽运作用消失, 入射光也可以稳定在高透射支, 这样可大大提高正反向的透射率比。如对于能量为 4.0 MW/cm^2 的入射光, 抽运激发后正向透射率 $T_+ = 0.91$, 而反向透射率 $T_- = 0.062$, 透射率比 $C = T_+/T_- = 14.7$ 。这样的工作状态, 真正实现了二极管单向透射的特性, 当然这是属于需要控制信号的逻辑操作。

4 结 论

研究了 ThM 系列准周期光子晶体的透射谱, 发现其共振谱具有自相似的分形结构, 共振模在晶体中的电场分布也具有类似的自相似结构。利用奇数阶 ThM 序列结构, 实现了正、反向不同的双稳态特性, 通过额外的抽运激发实现了全光二极管单向透射的功能。

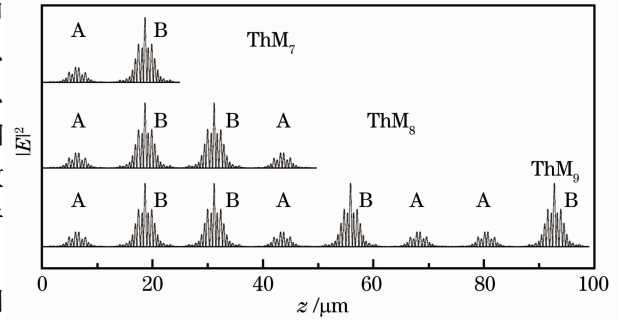


图 2 ThM_n 序列结构中的电场分布

Fig. 2 Electric-field distribution in the structure of ThM_n sequence

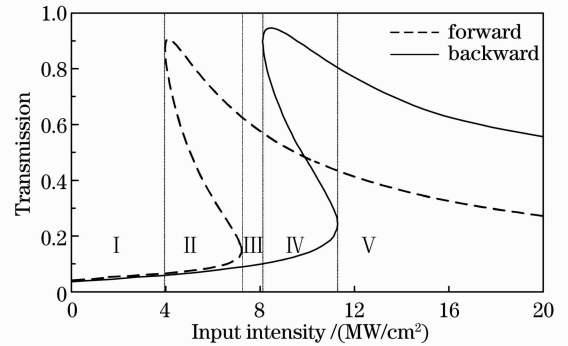


图 3 ThM_7 序列的双稳态曲线

Fig. 3 Bistability curve for ThM_7 sequence

参 考 文 献

- 1 Z. Yu, Z. Wang, S. Fan. One-way total reflection with one-dimensional magneto-optical photonic crystals[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(12): 121133
- 2 M. D. Tocci, M. J. Bloemer, M. Scalora *et al.*. Thin-film nonlinear optical diode[J]. *J. Appl. Phys.*, 1995, **66**(18): 2324~2326
- 3 Li Wenhai, Chen Lixue, Ding Weiqiang *et al.*. Optical diode behavior of photonic crystal structure with asymmetric Kerr defect[J]. *J. Harbin Institute of Technology*, 2007, **14**(4): 545~547
- 4 X. S. Lin, W. Q. Wu, H. Zhou *et al.*. Enhancement of unidirectional transmission through the coupling of nonlinear photonic crystal defects[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(6): 2429~2439
- 5 X. S. Lin, J. H. Yan, L. J. Wu *et al.*. High transmission contrast for single resonator based all-optical diodes with pump-assisting[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(25): 20949~20954
- 6 S. N. Zhu, Y. Y. Zhu, N. B. Ming. Quasi-phase-matched third-harmonic generation in a quasi-periodic optical superlattices[J]. *Science*, 1997, **278**(5339): 843~846
- 7 Feng Yaping, Zhou Jun, Yang Mingyang *et al.*. Fabrication and optical properties of two-dimensional Thue-Morse quasicrystals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0423001
冯亚萍, 周 骏, 阳明仰 等. 二维 Thue-Morse 型准周期光子晶体的制作与光学特性[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0423001
- 8 V. Grigoriev, F. Biancalana. Bistability and stationary gap solitons in quasiperiodic photonic crystals based on Thue-Morse sequence[J]. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 2010, **8**(4): 285~290
- 9 Chen Heming, Wang Guodong. Design of new photonic crystal all-optical switching based on dynamical shift of defect mode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0323006
陈鹤鸣, 王国栋. 一种新型缺陷模迁移光子晶体全光开关设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0323006
- 10 Y. Liu, F. Qin, F. Zhou *et al.*. Ultrafast and low-power photonic crystal all-optical switching with resonant cavities[J]. *J. Appl. Phys.*, 2009, **106**(8): 083102
- 11 Chen Lixue, Ding Weiqiang, Li Wenhui *et al.*. Transfer matrix algorithm of one-dimensional inhomogeneous Kerr medium [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4): 497~500
陈历学, 丁卫强, 李文惠 等. 一维非均匀 Kerr 介质的传输矩阵算法[J]. *光子学报*, 2004, **33**(4): 497~500
- 12 N. Liu. Propagation of light waves in Thue-Morse dielectric multilayers[J]. *Phys. Rev. B*, 1997, **55**(6): 3543~3547
- 13 F. Biancalana. All-optical diode action with quasiperiodic photonic crystals[J]. *J. Appl. Phys.*, 2008, **104**(9): 093113