

文章编号: 1001-3806(2007)01-0068-03

含非线性缺陷的光子晶体异质结构中的光学响应

郝清海, 许玉龙, 苏希玉*, 王 梅

(曲阜师范大学 物理工程学院, 曲阜 273165)

摘要: 为了得到非线性介质中的光学响应, 考虑了光通过含有非线性缺陷的一维光子晶体异质结构的情况, 对缺陷层的介电函数采取 δ 函数近似的方法, 得到了具有非线性缺陷的一维光子晶体异质结构中的光学响应表达式。结果表明, 非线性缺陷存在时, 在光学响应中会出现双稳态、多稳态等特性。讨论了双稳态及其多稳态的形成条件, 并与考虑缺陷层厚度时的结论进行了比较, 为构造零阈值的激光器和非线性光学器件的初步设计提供了有益的理论参考。

关键词: 非线性光学; 光子晶体; 双稳态; 缺陷; 光学响应

中图分类号: O437 文献标识码: A

Optical response of photonic crystal heterjunction structure with a nonlinear defect

HAO Qing-hai, XU Yu-long, SU Xiyu, WANG Mei

(College of Physics and Engineering, Qufu Normal University, Qufu 273165, China)

Abstract In order to optical response in nonlinear material, considering the general problem of electromagnetic wave propagation through one dimensional photonic crystal heterjunction structure with a nonlinear defect, an expression for the optical response of such dielectric superlattice is obtained when the nonlinear impurity dielectric constant is in δ function approximation. The simulation results show that once the nonlinear medium sandwiched between two photonic crystals and the system exhibits bistability and multistability. Then the conditions for the onset of bistability and multistability are discussed. Comparison proves the δ function approximation and the nonlinear layer of finite width displays qualitatively similar behavior which might supply a beneficial reference for the design zero threshold laser and nonlinear optical elements.

Key words nonlinear optics; photonic crystal; bistability; defect; optical response

引 言

在过去的 20 年中, 人们从理论和实验上对光子晶体进行了深入的研究^[1-3]。光子晶体是一种介电函数周期变化的人工微结构材料, 其典型结构为一个折射率周期变化的三维物体, 光子在这类材料中的行为类似电子在凝聚态物质(半导体)中的行为。它具有光子带隙, 频率在带隙内部的光被禁止传播, 使得控制光子的运动成为可能。为了得到更高性能的光子晶体, 人们在光子晶体中引入缺陷, 特别是非线性缺陷^[4-7], 光子局域是光子晶体中引入缺陷后在禁带中出现的缺陷模, 与该缺陷模频率共振的光可以隧穿过光子晶体, 这一性质可用于光学延迟器件的设计。由于缺陷模频率处的电磁波模式态密度非常大, 当缺陷为非线性介质时, 较强的局域光场有利于非线性效应的产生。特

别是缺陷层的介电函数具有克尔非线性时, 系统在光学响应中能够出现双稳态、多稳态及光学限制等特性^[8-11]。光学双稳态系统在光学数字技术中应用非常广泛, 可用于制作光学逻辑元件、存储元件及光学晶体管等^[12-15]。

本文中对于含有非线性缺陷的一维光子晶体异质结构, 对缺陷层的介电函数采取 δ 函数近似, 得到了具有非线性缺陷的一维光子晶体异质结构中的光学响应表达式, 并讨论了双稳态及其多稳态的形成条件。

1 光学非线性响应

考虑一个由一维光子晶体 A (r_A, t_A) 和 B (r_B, t_B) 连接而成的光子晶体异质结构, 在 A 和 B 的连接处插入一非线性 δ 层(见图 1), r_A, t_A, r_B, t_B 分别为光子晶

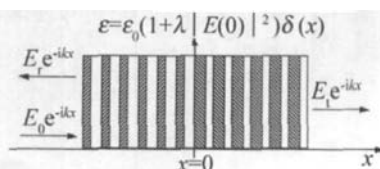


Fig 1 One dimension photonic crystal heterjunction structure with a nonlinear defect

作者简介: 郝清海(1980-), 男, 硕士研究生, 主要从事光子晶体理论和非线性光学方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: xiyust@sina.com

收稿日期: 2005-11-07; 收到修改稿日期: 2006-03-15

体 A 和 B 的反射幅度和透射幅度。假设 x 轴的方向为从左向右, δ 层的位置定为原点 O , 电磁波由轴 x 方向进入该系统。

假设 δ 层的介电函数具有克尔非线性形式, 即介电函数依赖于 δ 层局域光场的强度, 则:

$$\varepsilon(x) = \varepsilon_0(1 + \lambda|E(x)|^2)\delta(x) \quad (1)$$

式中, $\varepsilon_0\lambda$ 为非线性克尔系数, 先考虑一平面波 E_0e^{ikx} 通过 δ 层的情况, 反射波为 $E_r e^{-ikx}$, 相应的透射波为 $E_t e^{ikx}$, $k = \omega/c$ 为平面波波数。 δ 层附近的麦克斯韦方程为:

$$\frac{d^2 E(x)}{dx^2} + k^2 \varepsilon_0(1 + \lambda|E(x)|^2)\delta(x)E(x) = 0 \quad (2)$$

在原点附近利用 $E(x)$ 的连续性, 得:

$$E(O^+) = E(O^-) \quad (3)$$

$$E'(O^+) - E'(O^-) = -k^2 \varepsilon_0(1 + \lambda|E(0)|^2) \quad (4)$$

令 $Y = |E_0|^2, X = |E_t|^2$, 由 (2) 式 ~ (4) 式可得 δ 层的光学响应表达式为:

$$Y = X[1 + \tau(1 + \lambda X)^2] \quad (5)$$

式中, $\tau(\tau = \varepsilon_0^2 k^2 / 4)$ 与相应的线性系统 ($\lambda = 0$) 的透射系数 $|T_0|^2$ 的关系是:

$$\tau = \frac{1 - |T_0|^2}{|T_0|^2} \quad (6)$$

如果 Y 是 X 的非单调函数, 则对于任意一个特定的输入频率, 有两个或两个以上的输出, 则系统会表现双稳态或多稳态的性质。令 $dY/dX = 0$ 当 $\lambda < 0$ 和 $\tau > 3$ 时得:

$$X_{\pm} = \frac{2 \pm \sqrt{1 - 3\tau}}{3|\lambda|} \quad (7)$$

$Y_{\pm} = Y(X_{\pm})$ 分别对应的是系统的上限开关阈值和下限开关阈值。保持 λ 的大小不变, 输入强度和输出强度的关系如图 2 所示, 图 2a 中曲线 1, 2, 3 分别对应的

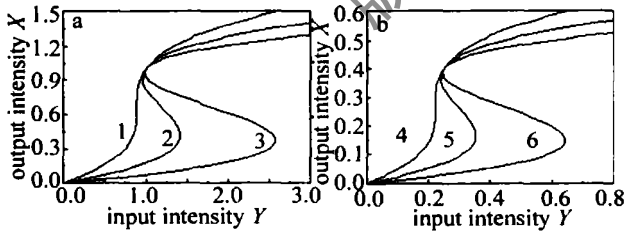


Fig 2 Transmitted intensity vs incident intensity

线性系统 ($\lambda = 0$) 的透射系数 $|T_0|^2$ 为 0.5, 0.25 和 0.125 图 2b 中曲线 4, 5, 6 为考虑非线性层厚度时输入强度与输出强度的关系, 它们对应的线性系统 ($\lambda = 0$) 的透射系数 $|T_0|^2$ 也分别为 0.5, 0.25 和 0.125 取非线性层的厚度 $d = 0.6\lambda$, λ_c 为线性系统 ($\lambda = 0$) 时介电膜层对应的中心波长。从图中可以看出两种情况下上、下限开关阈值都随 τ 的增大而变小, 即随着线性透射率的减小而减小, 而两开关阈值的间距变大。但是考虑非线性层的厚度时, 系统的上、下限

开关阈值都小于不考虑非线性层的厚度时的情况。随着 τ 的增大, $Y_{-} \rightarrow 1/|\lambda|$, 同时 $Y_{+} \rightarrow \tau/|\lambda|$ 。如果保持 τ 不变, 显然开关阈值随着 $|\lambda|$ 的增大而减小, 也就是随着非线性调制的增强, 系统的非线性开关阈值将要变得更小, 可以利用这一点来构造零阈值的激光器。

接着考虑平面波 $E_0 e^{ikx}$ 沿 x 方向入射到图 1 所示的系统, 透射波为 $E_t e^{ikx}$, 反射波为 $E_r e^{-ikx}$ 。令 $Y' = |E_0|^2, X' = |E_t|^2$, 则系统的光学响应:

$$Y' = X'[1 + \tau'(1 + \lambda X')^2] \quad (8)$$

很容易看出 (5) 式与 (8) 式具有相同的结构, 两式比较可得各个参数的对应关系, $\tau \rightarrow \tau', \lambda \rightarrow \lambda'$, 其中:

$$\tau' = \frac{1/(|T|^2|T_0|^2) - \text{Re}[1/(T^* T_0)]}{|1/T_0 - 1/T|^2} \quad (9)$$

$$\tau' = \frac{\{1/(|T_0|^2 - \text{Re}[1/(T^* T_0)])\}^2}{|1/T_0 - 1/T|^2} \quad (10)$$

$$\lambda' = \frac{\lambda|1/k - r_A^*/k|^2|1/T_0 - 1/T|}{\sqrt{\tau}} \quad (11)$$

式中, T 是不含函数 δ 的线性系统 ($\varepsilon_0 = 0$) 的透射幅度:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{t_A t_B} + \frac{r_A^* r_B}{t_A^* t_B} \quad (12)$$

同理, T_0 是含有函数 δ 的线性系统 ($\lambda = 0$) 的透射幅度:

$$\frac{1}{T_0} = \frac{1}{T} - i \frac{k \varepsilon_0}{2} \left(\frac{1}{t_A} - \frac{r_A^*}{t_A} \right) \left(\frac{1}{t_B} + \frac{r_B}{t_B} \right) \quad (13)$$

出现双稳态的条件 (7) 式现在可以写为:

$$\tau' < 1/3 \quad (14)$$

$$\lambda' < 0 \quad (15)$$

如果令 $1/T_0 = R e^{i\theta}$, 可以很方便的利用变量 R 和 θ 来表示双稳态的产生条件:

$$\frac{\sin^2 \theta}{(R - \cos \theta)^2} \leq \frac{1}{3} \quad (16)$$

$$\text{sign}(\lambda) \left(1 - \frac{\cos \theta}{R} \right) < 0 \quad (17)$$

图 3 是双稳态的出现条件与变量 R 和 θ 的关系相图,

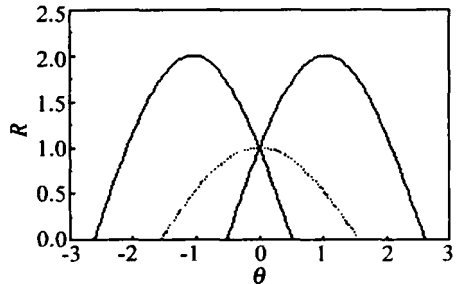


Fig 3 The phase diagram for the onset of bistability

很容易可以看出来: 两条实线以下除去它们相交的区域以外, 系统不会出现双稳态; 但是, 在实线以外的区域, 非线性克尔系数大于 0 时, 系统会出现双稳态。这显然与光只通过 δ 层时的要求不同。因而在含有非线性

性缺陷的一维光子晶体异质结构中, 双稳态的出现不一定要系统的负的非线性克尔系数。双稳态的产生不仅依赖于 T , 还依赖于 T_0 的大小。

2 结 论

考虑了光通过含有非线性缺陷的一维光子晶体异质结构的情况, 对非线性层的介电函数采用 δ 函数近似, 不考虑它的厚度, 给出了系统的非线性光学响应的表达式。因而对于以一定强度入射的光, 会有两种或者更多的出射光强度, 即表现出光学双稳态的性质, 系统的双稳态响应是由局域模频率受到光强的非线性调制移动而引起的。当考虑非线性层的厚度时, 得到结论与 δ 近似时大致相同。该项研究为构造零阈值的激光器和非线性光学器件的初步设计提供了有益的理论参考。

参 考 文 献

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. Phys Rev Lett 1987, 58(20): 2059~2062
- [2] JON S. Strong localization of photons in certain disordered physics dielectric superlattices [J]. Phys Rev Lett 1987, 58(23): 2486~2489
- [3] FANG Y T, SHEN T G, LIN G H. Photowave propagation in one-dimensional random photonic crystal [J]. Laser Technology, 2004, 28(2): 153~155(in Chinese).
- [4] CHEN W, MILLS D L. Gap solitons and the nonlinear optical response of superlattice [J]. Phys Rev Lett 1987, 58(2): 160~163.

(上接第 36页)

4 结 论

介绍了一种使用胶片分析和测量微米量级光束截面的方法, 通过实验证明了该方法具有简单可行、成本低廉的特点。而胶片的感光面积、空间分辨能力和宽容度都远远大于光束分析仪, 可以和光束分析仪形成优势互补。选用不同类型的胶片, 该方法可对可见光、红外和紫外波长光束空间能量分布做精确分析。在后续的实验, 该方法已被证明可以对 1Hz 调 Q 单脉冲 YAG 激光进行测量, 在改变衰减系数测量多次之后, 不仅精确测量出零阶贝塞尔光束截面中心亮斑的半径, 还获得了调 Q 单脉冲 YAG 激光贝塞尔光束截面能量分布的精细图样, 这是常规光束分析仪做不到的, 因此, 该方法对低重复率超短脉冲激光光束空间能量分布测量具有更加广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] ZHOU X L, CAO D H, WU Y B. The software and hardware design of laser beam parameters analyzer based on CMOS image sensor [J].

- [5] MILLS D L, TRULLINGER S E. Gap solitons in nonlinear periodic structures [J]. Phys Rev, 1987, B36(2): 947~952
- [6] HUANG X Q, CUI Y P. Study on the third harmonic generation induced by the second-order cascading in nonlinear photonic crystal [J]. Laser Technology, 2004, 28(4): 363~365(in Chinese).
- [7] CHRISTODOULIDES D N, JOSEPH R I. Slow Bragg solitons in nonlinear periodic structures [J]. Phys Rev Lett 1989, 62(15): 1746~1749
- [8] WENFULL H G, MARBURGER J H, GARMIRE E. Theory of bistability in nonlinear distributed feedback structures [J]. A P L, 1979, 35(5): 379~381
- [9] CHEN W, MILLS D L. Optical response of a nonlinear dielectric film [J]. Phys Rev 1987, B35(2): 524~532
- [10] GIBBS H M, CAPINSKI S, VENKATESCANT N C. Differential gain and bistability using a sodium-filled Fabry-Perot interferometer [J]. Phys Rev Lett 1976, 36(19): 1135~1138
- [11] XU B, MING N B. Experimental observations of bistability and instability in a two-dimensional nonlinear optical superlattice [J]. Phys Rev Lett 1993, 71(24): 3959~3962
- [12] WANG R Z, DONG J M, XING D Y. Dispersive optical bistability in one-dimensional doped photonic band gap structures [J]. Phys Rev 1997, E55(5): 6301~6304
- [13] LDORKE S E, SOKOULIS C M. Pulse-driven switching in one-dimensional nonlinear photonic band gap materials: a numerical study [J]. Phys Rev, 2000, E61(5): 5825~5829
- [14] ZHU S H, LU N H, ZHENG H *et al*. Time delay of light propagation through defect modes of one-dimensional photonic band gap structures [J]. Opt Commun, 2000, 174: 139~144
- [15] KNIGHT J C, BIRKST A, CREGAN R F *et al*. Photonic crystals as optical fibres: physics and applications [J]. Optical Materials 1999, 11(2): 143~151.

Optical Instruments 2004, 26(3): 38~42(in Chinese).

- [2] CAO Y L, GAO Ch Q. Analysis on the accuracy of beam parameter measurement by using CCD array [J]. Optical Technique 2004, 30(5): 583~586(in Chinese).
- [3] TAN J T. Analysis of efficiency of image formation and prediction of future of color film and digital still camera [J]. Photographic Science and Photochemistry 2001, 19(1): 48~70.
- [4] FU S L, YUE J L, U S W. Preparation and investigation of the AgBr/1 nanometer grains emulsion [J]. Photosensitive Materials 1987, 15(3): 14~20(in Chinese).
- [5] GORIE, GUATTARIG, PADOVANI C. Bessel-Gaussian beams [J]. Opt Commun, 1987, 64: 491~495
- [6] LÜ B D. Propagation and control of high-power lasers [M]. Beijing National Defence Industry Press 1999, 174~175(in Chinese).
- [7] ZHANG B, LÜ B D. Propagation of non-diffracting beams [J]. Laser Technology 1996, 20(1): 14~19(in Chinese).
- [8] ARLT J, DHALAKIA K, ALLEN L *et al*. Efficiency of second-harmonic generation with Bessel beams [J]. Phys Rev, 1999, A60(3): 2438~2441.
- [9] LÜ B D, ZHANG B, CAI B W *et al*. Study on the properties of the aperture non-diffracting beams [J]. Chinese Science Bulletin 1994, 39(2): 125~128(in Chinese).
- [10] WU J H. A new generation of Kodak E series color reversal films [J]. Photographic Technique 2001(4): 20(in Chinese).