

文章编号: 2095-0411 (2011) 04-0067-04

单负材料对系统光学双稳态的影响^{*}

王 光, 汪萨克, 杨 焯, 陈宪锋

(常州大学 数理学院, 江苏 常州 213164)

摘要: 研究了单负材料对光子晶体微腔系统光学双稳态的影响。若是腔中介质为散焦型的 Kerr 介质, 晶体最外层单负材料厚度的增加, 可以有效降低系统双稳态的开关阈值, 最佳的单负材料层厚度约为 30nm。但是对于聚焦型 Kerr 介质, 单负材料层的存在反而不利于系统双稳态开关阈值的有效降低。

关键词: 单负材料; 光学双稳态; Bragg 微腔; 开关阈值

中图分类号: O 437

文献标识码: A

Effects of Single—Negative Material on the Optical Bistability

WANG Guang, WANG Sa—ke, YANG Ye, CHEN Xian—feng

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

Abstract: The effects of single—negative material on the optical bistability of a photonic crystal microcavity were studied. If material in microcavity is defocusing Kerr medium, and the thickness of single—negative material in the outermost of the crystal increases, the bistable switch threshold will be reduced effectively. The thickness of the best single—negative material layer is about 30 nm. If the system is composed of focusing Kerr medium, the existence of single—negative material will not be conducive to the reduction of bistable switch threshold.

key words: single—negative materials; optical bistability; Bragg microcavity; switch threshold

光学双稳态是一种重要的非线性光学现象, 在全光通信、全光计算机等高科技领域有着重要的应用前景^[1]。光子晶体是具有周期性的介电结构, 具有光子带隙和光子局域特性^[2]。如果在光子晶体中引入具有非线性的缺陷层, 就构成了非线性的光子晶体微腔, 可使系统在光学响应中出现双稳态、多稳态及光学限制等特性^[3]。

近年来利用单元结构的局域响应机制构造出了一种新型的材料—特异材料^[4], 主要有单负材料和双负材料。单负材料是介电常数 ϵ 和磁导率 μ 中有一个取负值的材料, 其中 $\mu < 0$ 的材料称为负 μ 材

料 (MNG), 而 $\epsilon < 0$ 的材料则称为负 ϵ 材料 (ENG); 双负材料则是 ϵ 、 μ 同时为负值。

把特异材料引入光子晶体将出现一些奇异的现象, 如出现负折射现象^[4]、存在全向共振模^[5]、全向反射带^[6]、巨侧向漂移^[7]等等, 有力地拓展了光子晶体的研究领域。本文设计了一个非线性的光子晶体微腔, 在其中插入单负材料层, 来研究单负材料对系统光学双稳态的影响。

1 模型与结构

先设计一个 Bragg 微腔。微腔两侧的 Bragg 镜

* 收稿日期: 2011-06-13

作者简介: 王光 (1981—), 男, 湖南浏阳人, 硕士生; 通讯联系人: 陈宪锋。

为一维光子晶体 $(AB)^N$ 。其中 A 为 ZnO, 折射率为 $n_1 = 2.35$, 厚度 $d_1 = 55$ nm, 而介质 B 为 SiO_2 , 折射率为 $n_2 = 1.45$, 厚度 $d_2 = 90$ nm。利用介质 A、B 的周期性排列构成一维光子晶体 $(AB)^N$ 。

利用传输矩阵理论易知^[8,9], 该光子晶 $(AB)^N$ 在可见光区存在着一个禁带 (高反射带)。正入射时的禁带范围为 450 ~ 610 nm, 波长位于该区域内的光波不能在晶体中传播。利用这一特性, 我们将两块相同的光子晶体作为高反射镜, 在中间夹一非线性介质 D 构成一个非线性的 Bragg 微腔, 其结构简写为 $(AB)^N D (BA)^N$, 这样的一种结构可以出现双稳态特性^[10]。

单负材料有两类 ENG 和 MNG, 无论是哪一类单负材料层, 对入射波具有高反射特性。如果将这样的单负材料引入 Bragg 微腔中, 预期将会对系统的光学双稳态特性产生一定的影响。为此设计以下 3 种结构: 将两块相同的单负材料层 C 对称地插入到微腔的两侧的结构 $(AB)^N CDC (BA)^N$, 或插入在 Bragg 镜中的结构 $(AB)^{N_1} C (AB)^{N_2} D (BA)^{N_2} C (BA)^{N_1}$, 或放置在系统外侧的结构 $C (AB)^N D (BA)^N C$ 。在本文的研究中, 单负材料层为 ENG 材料, 其物质参数形式为^[11,12]:

$$\epsilon_4 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)}, \quad \mu_4 = 1$$

其中: ω_p 为等离子体频率, γ 为阻尼振荡频率 (引起材料的吸收与损耗)。此处取^[12] $\omega_p = 1.32 \times 10^{16} \text{ s}^{-1}$, $\gamma = 5 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$ 。

2 结果与讨论

2.1 单负材料层厚度对系统腔模的影响

先不考虑腔中介质的非线性, 利用传输矩阵理论^[9]研究上述 3 种结构中, 单负材料层 (C 层) 的厚度 d_4 对线性系统腔模的影响。取腔中介质 D 的折射率为 $n_3 = 2$, 厚度 $d_3 = 130$ nm。

研究表明, 这样一个线性 Bragg 微腔 $(AB)^N D (BA)^N$, 可以在禁带中出现局域共振模, 共振膜波长为 $\lambda = 520$ nm。若在这样的系统中引入单负材料层 C 层, 则其腔模波长会出现变化, 图 1 给出了传输矩阵法得到的 3 种结构中腔模波长随单负材料层厚度 d_4 的变化规律。

从图 1 (a) 可以发现, 对于 $(AB)^5 CDC (BA)^5$ 结构, 随着单负材料层厚度 d_4 的增加, 腔模的影响非常大。单负材料层的厚度不仅明显减小

腔模的波长, 而且由于单负材料层损耗的存在, 使得腔模透射率明显降低。当厚度 d_4 增大到 15 nm 时, 局域模就已经移出了禁带区域。

对于单负材料层位于 Bragg 镜中的结构 $(AB)^3 C (AB)^2 D (BA)^2 C (BA)^3$, 单负材料层厚度 d_4 的增加, 腔模波长的蓝移速度大为减慢。从图 1 (b) 可以看出, 当 d_4 从 0 增大到 30 nm 时, 腔模波长从原来的 520 nm 减小到 498 nm, 变化幅度为 22 nm; 但是损耗的存在, 使腔模的透射率下

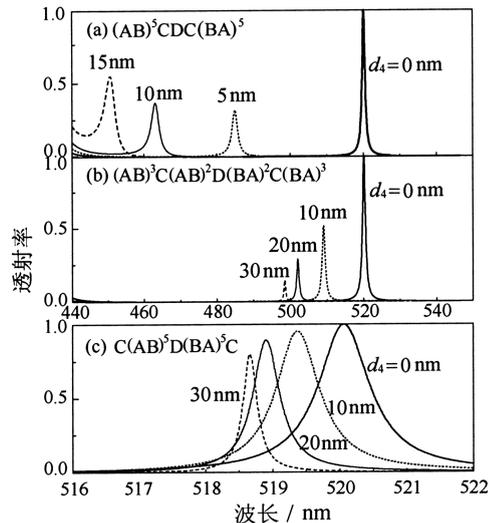


图 1 单负材料层厚度对腔模的影响

Fig. 1 Effects of the thickness of single-negative material on cavity mode

降明显, 从原来的 1 降为 0.15。而对于单负材料层位于系统外侧的结构 $C (AB)^5 D (BA)^5 C$, 单负材料层厚度 d_4 的影响最小, 见图 1 (c)。当 d_4 从 0 增大到 30 nm 时, 腔模的蓝移量仅为 1.3 nm, 透射率下降的幅度仅为 0.2。图 2 画出了结构 $C (AB)^5 D (BA)^5 C$ 中腔共振模在晶体中的电场分布。图 2 中从下到上的四条曲线分别对应于 $d_4 = 0, 10, 20, 30$ nm。从图 2 可以看出, 在微腔内部电场强度 E 的最大值出现在微腔的边缘。这就能理解对于将单负材料层置于微腔两侧的第一种结构, 单负材料层吸收的明显增强将导致腔模透射率下降明显; 而第二种结构损耗的存在对腔模透射率的影响其次; 对于第三种结构, 损耗的影响最小。从图 2 还可以发现, 随着单负材料层厚度 d_4 的增加, 尽管使腔模的透射率略有下降, 但是腔中电场强度还是出现明显的增强效应 (随 d_4 呈指数增大)。这很容易理解, 对于微腔两侧的反光镜, 单负材料层厚度的增大, 电磁波的穿透能力更小, 使得电磁波在腔中停留的时间更长, 有效地提高了腔中的电场。

在以下的研究中采用最后一种结构 C (AB)⁵D (BA)⁵C, 来研究单负材料层对系统非线性效应的影响。

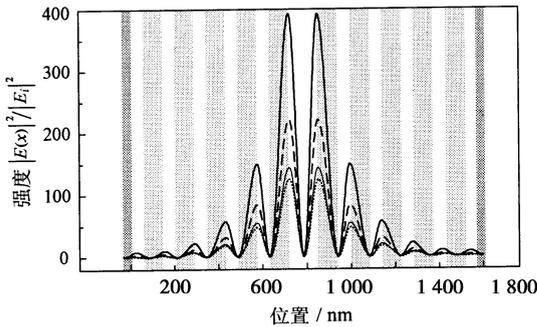


图 2 腔模在晶体中的电场分布

Fig. 2 Electric field distribution of resonant mode

2.2 散焦型系统的光学双稳态

若腔中介质 D 为 Kerr 介质, 其三阶电极化率为 $\chi^{(3)} = -2 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \text{ V}^{-2}$, 其他参数不变。对于这种散焦型 Kerr 介质, 我们知道要产生光学双稳态, 必须对入射光预置一定的蓝移量^[13]。此处取入射光波长为 518nm。利用非线性介质传输理论^[14-16], 来计算 C (AB)⁵D (BA)⁵C 系统的光学双稳态。

图 3 给出了单负层厚度 d_4 对系统光学双稳态的影响。从图 3 可发现, 随 d_4 的增大系统产生双稳态特性的上下阈值在不断减小。可以这样理解: 根据图 2 随 d_4 的增大, 腔中的局域电场不断增强, 导致腔中 Kerr 介质的非线性效应增强。而 Kerr 介质的折射率 $n = n_3 + \frac{\chi^{(3)}}{2n_3} |E|^2$, 将随 $|E|^2$ 的增大而减小。根据微腔理论, 腔模波长将随 n 的减小

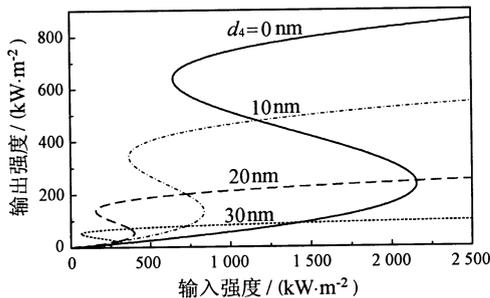


图 3 单负层厚度对系统双稳态的影响

Fig. 3 Effects of the thickness of single-negative layer on system bistability

而减小, 于是入射光波长靠近蓝移后的腔模波长, 导致透射率增大, 有效减低了开关阈值, 因此出现双稳态的上下阈值随 d_4 增大而降低的现象。

图 4 绘出了单负材料层厚度对系统双稳态现象出现的上阈值 I_1 和下阈值 I_2 的影响。从图 4 可以发现随着 d_4 的增加, 双稳态出现的上下阈值光强在不断减小, 可同时参阅图 3。但是当 d_4 增加到一定厚度 (约为 30nm) 后, 开关阈值就不再同时减小, 特别是上开关阈值 I_1 , 当 $d_4 > 30\text{nm}$ 后反而有一定程度的提高。

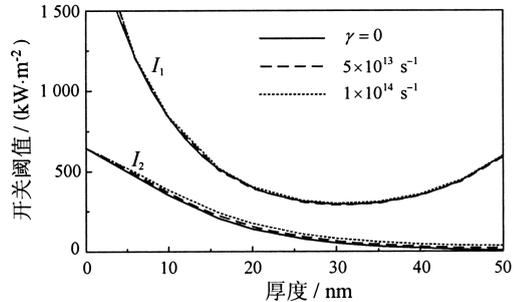


图 4 单负层厚度对系统开关阈值的影响

Fig. 4 Effects of the thickness of single-negative layer on system switch threshold

由此可见, 要有效降低系统双稳态的开关阈值, 不能一味地增加单负层的厚度 d_4 。须知单负层厚度的增加, 将使单负层的吸收越来越明显, 两种作用相互抗衡, 在一定程度上反而阻碍了系统双稳态阈值的降低。由于单负材料不可避免地存在着损耗, 损耗对系统双稳态的影响如图 5 所示。在图 5 中我们固定单负材料层的厚度 $d_4 = 30\text{nm}$, 而单负材料的阻尼频率 $\gamma = 0, 5 \times 10^{13}, 1 \times 10^{14}, 5 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$, 其他相关参数不变。从图 5 可以发现,

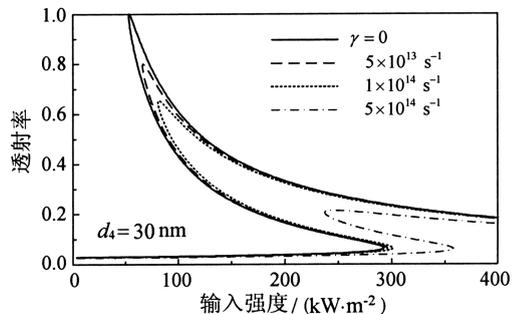


图 5 损耗对系统双稳态的影响

Fig. 5 Effects of loss on system bistability

当损耗较小 ($\gamma < 10^{14} \text{ s}^{-1}$) 时, 系统双稳态的上开关阈值 I_1 变化甚微, 而下开关 I_2 略有增大, 同时由于损耗的增大使入射光的透射率下降 (特别是下开关阈值 I_2 处的透射率)。实际上, 我们在图 4 中同时绘制了不同损耗时双稳态开关阈值的变化规律。可见当损耗较小时, 损耗对系统的双稳态特性的影响不是太大, 但较大的损耗将产生较大的影响 (见图 5 中点划线)。

2.3 聚焦型系统的光学双稳态

前面研究的是散焦型 Kerr 介质 ($\chi^{(3)} < 0$), 若腔中介质为聚焦型 Kerr 介质, $\chi^{(3)} = 2 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \text{ V}^{-2}$ 又该如何呢? 取入射光波长为 $\lambda = 522 \text{ nm}$, 其他参数同图 3。图 6 给出了单负材料厚度 d_4 对聚焦型系统光学双稳态的影响。可以发现, 随着单负层厚度 d_4 的增大, 系统产生双稳态的上下开关阈值变化与前面不同。下开关阈值变化甚微 (略有减小), 但是上开关阈值不断增大。可见单负材料层厚度的增加不利于该类型系统光学双稳态开关阈值的有效降低。

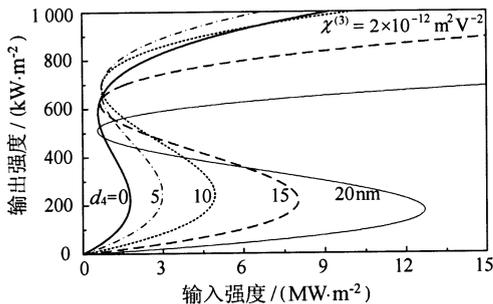


图 6 聚焦型系统的光学双稳态

Fig. 6 Optical bistability of focusing system

3 结 论

研究了单负材料 ENG 层对非线性 Bragg 微腔的光学双稳态的影响。当单负材料层位于系统的最外侧, 在制备上可以用镀膜的方法在原有系统的两侧各蒸镀一层金属薄膜即可。这样的结构中, 单负材料的厚度对系统腔模的影响较小, 但可有效增强腔中的电场强度, 导致系统较易产生非线性效应。对于散焦型 Kerr 介质, 单负材料层厚度增加有利于降低系统双稳态的开关阈值, 最佳的单负层厚度约为 30 nm 。较小的材料损耗对系统双稳态的影响较弱。但是对于聚焦型 Kerr 介质, 单负层厚度的增加不利于系统双稳态开关阈值的有效降低。

参考文献:

[1] Smith S D. Optical bistability towards to optical computer [J].

Nature, 1984, 301 (5949): 315-316.

- [2] John S. Strong Localization of Photonics in Certain Disordered Dielectric Superlattices [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58 (23): 2 486-2 489.
- [3] Lidorikis E, Bush K, Li Q M, et al. Optical nonlinear response of a single nonlinear dielectric layer sandwiched between two linear dielectric structure [J]. Phys Rev B, 1997, 56 (23): 15 090-15 099.
- [4] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. Science, 2001, 292 : 77-79.
- [5] hen Y H. Omnidirectional and independently tunable defect modes in fractal photonic crystals containing sing - negatives materials [J]. Appl Phys B, 2009, 95: 757-761.
- [6] Li J, Zhou L, Chan C T, et al. Photonic band gap from a stack of positive and negative index materials [J]. Phys Rev Lett, 2003, 90, 083 901.
- [7] Wei R, Chen X, Tao J, et al. Giant and negative bistable shifts for one - dimensional photonic crystal containing a nonlinear metamaterial defect [J]. Phys Lett A, 2008, 373: 6 797-6 800.
- [8] 蒋美萍, 江兴方, 沈小明, 等. 一维光子晶体的偏振特性研究 [J]. 量子电子学报, 2005, 22 (4): 612-616.
- [9] 唐丽, 陈宪锋, 沈小明, 等. 含单负或双负介质光子晶体的传输矩阵和色散关系 [J]. 江苏工业学院学报, 2007, 19 (1): 33-36.
- [10] 陈宪锋, 沈小明, 蒋美萍, 等. 非线性 Bragg 微腔的双稳态研究 [J]. 光子学报, 2007, 36 (4): 613-616.
- [11] Jiang H T, Chen H, Li H Q, et al. Properties of one - dimensional photonic crystals containing single - negative materials [J]. Phys Rev E, 2004, 69 (6): 066 607.
- [12] Dolling G, Wegener M, Soukoulis C M, et al. Negative - index metamaterial at 780nm wavelength [J]. Optics Letters, 2007, 32 (1): 53-55.
- [13] 金铨, 陈宪锋, 黄正逸, 等. 非线性微腔的光学双稳态 [J]. 量子电子学报, 2009, 26 (5): 591-595.
- [14] Chen L X, Deng X X, Ding W Q, et al. Finite - difference time - domain analysis of optical bistability with low threshold in one - dimensional nonlinear photonic crystal with Kerr medium [J]. Opt Commu, 2002, 209 (4): 491-500.
- [15] Chen X F, Xu L, Zhang W P, et al. Effect of oblique incidence on bistability of nonlinear microcavity [J]. Optoelectronics Letters, 2009, 5 (6): 472-475.
- [16] 陈宪锋, 蒋美萍, 沈小明, 等. 非线性介质传输矩阵算法研究双稳态特性 [J]. 江苏工业学院学报, 2005, 17 (3): 30-33.