

文章编号: 0253-2239(2007)05-0940-6

# 含色散介质的一维光子晶体微腔的光学特性和模式调节\*

王 宏<sup>1,2</sup> 欧阳征标<sup>1\*\*</sup> 韩艳玲<sup>3,4</sup> 阮双琛<sup>1</sup>

1 深圳大学太赫兹技术中心, 深圳大学工程技术学院, 深圳 518060  
2 成都电子科技大学物理电子学院, 成都 610054  
3 中国地质大学(武汉)数理系, 武汉 430074  
4 华中科技大学图像识别与人工智能研究所, 武汉 430074

**摘要:** 采用时域有限差分(FDTD)法计算了含色散介质一维光子晶体微腔的透射谱,研究了缺陷模的频移特性。通过与无色散光子晶体微腔透射谱相比较,发现了介质色散导致的缺陷模频移现象,并详细地分析了中心频率、色散强度和衰减系数等色散介质参量和缺陷模频移的依赖关系。模拟结果显示,缺陷模的频移决定于中心频率、色散强度和衰减系数等色散介质参量的大小,通过合理的调节这些参量,可以有效地调节缺陷模的频率。

**关键词:** 光电子学; 光子晶体; 时域有限差分法; 微腔; 模式调节

中图分类号: O431.1 文献标识码: A

## Optical Properties and Mode Tuning of Defect Modes in One-Dimensional Photonic Crystal Micro-Cavity Containing Dispersive Medium

Wang Hong<sup>1,2</sup> Ouyang Zhengbiao<sup>1</sup> Han Yanling<sup>3,4</sup> Ruan Shuangchen<sup>1</sup>

1 Center of THz Technology of Shenzhen University, College of Engineering and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060  
2 School of Physical Electronics, Chengdu University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054  
3 Mathematics and Physics Department, China University of Geosciences, Wuhan 430074  
4 Institute for Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074

**Abstract:** Transmission spectrum of a one-dimensional photonic crystal micro-cavity containing dispersive medium are calculated by use of the finite-difference time-domain method, and frequency shift of defect modes is investigated. In comparison with photonic crystal without dispersive medium inside micro-cavity, we find the frequency shift phenomenon of defect modes which results from the medium dispersion. And then, the dependence of frequency shift of defect modes on dispersive medium parameters such as strength of dispersive, damping coefficient and centre frequency is analyzed in detail. The result shows that the above parameters of dispersive medium determine the resonant frequency of the defect modes. The frequency of the defect modes can be significantly tuned by adjusting carefully the dispersive medium parameters. Such phenomenon can be used to tune the resonant frequency, which has a great potential for a new generation of optical components.

**Key words:** optoelectronics; photonic crystal; finite-difference time-domain method; micro-cavity; mode tuning

\* 国家自然科学基金(60471047)、广东省自然科学基金(04011308)、湖北省自然科学基金(2006ABA345)、湖北省教育厅重点科研项目(B200604001)和深圳大学科研启动基金资助项目(200647)资助课题。

作者简介: 王 宏(1967-),山西大同人,博士,成都电子科大博士后,主要从事激光物理、光子晶体方面的研究。

E-mail: wanhong745@sohu.com

\*\* 通信联系人。E-mail: zhouyang@szu.edu.cn

收稿日期: 2006-07-20; 收到修改稿日期: 2006-09-18

## 1 引 言

光子晶体是一种介电常量周期性排列的人工材料,其光学特性例如光子禁带对于未来的光学器件有重要的应用价值<sup>[1,2]</sup>。以往的研究局限于非色散介质,主要通过改变晶格常数等结构参量来决定其色散特性,由此导致的色散现象也被称为结构色散。如果考虑材料色散,问题将更加复杂,材料色散和结构色散的共同作用将可能产生一些特殊的光学现象。

最近的研究表明,具有洛仑兹线形的色散介质,如量子点,以及染料溶液引入介质后,都将导致禁带加强<sup>[3,4]</sup>。另外,强色散、弱吸收介质还将导致电磁诱导透明(EIT)现象,与此有关的群速减慢和超光速(Superluminal)传播(群速度大于真空中的光速  $c$  甚至为负值)现象<sup>[5~8]</sup>引人注目。在谐振腔中,这种电磁诱导透明作用将被进一步加强,一些相关的光学现象,例如光学双稳态、频率排斥、线宽变窄等效应已被理论预测和实验证明<sup>[9,10]</sup>。

以往的研究表明缺陷的厚度决定缺陷模的谐振频率,而材料的折射率和层数决定模式的  $Q$  值,优化以上相关参量,模式的  $Q$  值可以有效提高<sup>[11]</sup>。本文利用 Optiwave 软件公司的 OptiFDTD 商业软件,采用时域有限差分(FDTD)法探讨了介质色散对缺陷波特性的影响,模拟结果显示,由于色散的引入,缺陷的光学厚度是频率的函数,这使得缺陷模的谐振频率不仅依赖于缺陷的宽度,而且依赖于色散的特性。调节中心频率、色散强度、衰减系数等介质色散参量,可以有效地调节缺陷模的频率。

可调谐光子晶体滤波器或激光器是利用材料的非线性、各向异性、色散等效应,使得光子晶体的介电常量随外部条件(如温度、电磁场等)变化,从而实现禁带或缺陷模的展宽或调谐,其中介电常量的改变对光子晶体禁带或缺陷模的影响是问题的核心<sup>[12~15]</sup>。本文的模拟结果从理论上研究了这一问题,说明通过改变介电常量调谐缺陷模是一种可行的方法,模拟结果对于器件的设计有参考价值。另外,研究结果加深了微腔中光学传播特性的理解,对于优化光子晶体微腔的参量,改善输出特性也有重要意义。

## 2 理论模型

图 1 为一维光子晶体微腔的典型结构。它由三种介质构成,中间缺陷层为厚度  $h_d$ ,介电常量  $\epsilon_d$  的色散介质,两边为厚度  $h_1$ ,介电常量  $\epsilon_1$  和厚度  $h_2$ ,介电常量  $\epsilon_2$  的均匀介质,这两种介质形成交替重叠的

周期结构,整个结构的层数为  $n_{\text{cell}}$ 。模拟中选取低折射率介质层  $h_1 = 0.5 \mu\text{m}$  和  $\epsilon_1 = \epsilon_0$ ,高折射率介质层  $h_2 = 0.5 \mu\text{m}$ ,  $\epsilon_2 = 4\epsilon_0$ ,缺陷层  $\epsilon_d = 3\epsilon_0$ ,晶格常量  $a = h_1 + h_2 = 1.0 \mu\text{m}$ 。改变  $h_d$ 、 $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$ 、 $\epsilon_d$  和  $n_{\text{cell}}$  等结构参量,将形成多个不同结构的光子晶体微腔。

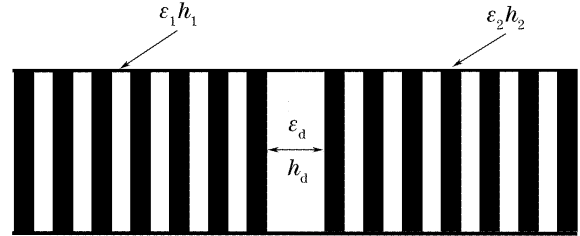


图 1 一维光子晶体缺陷层结构示意图

Fig. 1 Structure of one-dimensional photonic crystal with the defect layer

在缺陷层中,量子点以及染料溶液等色散介质的介电常量为<sup>[16]</sup>

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_d + \frac{\chi_0 \omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\gamma\omega}, \quad (1)$$

其中  $\epsilon_d$  为背景材料的介电常量,  $\omega$  为光场频率,  $\omega_0$  为谐振频率,  $\gamma$  为衰减系数,  $\chi_0$  为色散强度,它正比于半导体中激子的浓度  $N$ ,即

$$\chi_0 = \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m}, \quad (2)$$

其中,  $\epsilon_0$  为真空中的介电常量,  $e$  为电子电荷,  $m$  为电子质量。改变  $\omega_0$ 、 $\gamma$ 、 $\epsilon_d$  和  $\chi_0$  等参量,将改变介质的色散特性,图 2 显示了不同参量下色散介质介电常量的实部。介质中麦克斯韦方程组为<sup>[17]</sup>

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (3a)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t}, \quad (3b)$$

其中  $P$  为极化强度,  $\epsilon_0$  为真空介电常量。缺陷层以外的非色散介质,极化强度为常量,但在色散介质中极化强度表示为

$$\frac{d^2 \mathbf{P}(t)}{dt^2} + \gamma \frac{d\mathbf{P}(t)}{dt} + \omega_0^2 \mathbf{P}(t) = \epsilon_0 \chi_0 \omega_0^2 \mathbf{E}(t). \quad (4)$$

对于一定的微腔,当以上参量给定后,采用时域有限差分法数值求解麦克斯韦方程组(3a)、(3b)和(4)式,可以数值求解腔内各点不同时刻的电场强度。观测点不同时刻的场强傅里叶变换后,就可以得出腔内模式的频谱特性。为了激发系统,采用一个具有任意振幅的高斯脉冲作为激励源。空间步长和时间步长分别为  $\Delta x = \Delta y = 10 \text{ nm}$  和  $\Delta t = \Delta x / (2c) \approx 1.67 \times 10^{-17} \text{ s}$ 。考虑到系统的开放性,边界采用完全匹配层(PML)吸收边界计算。

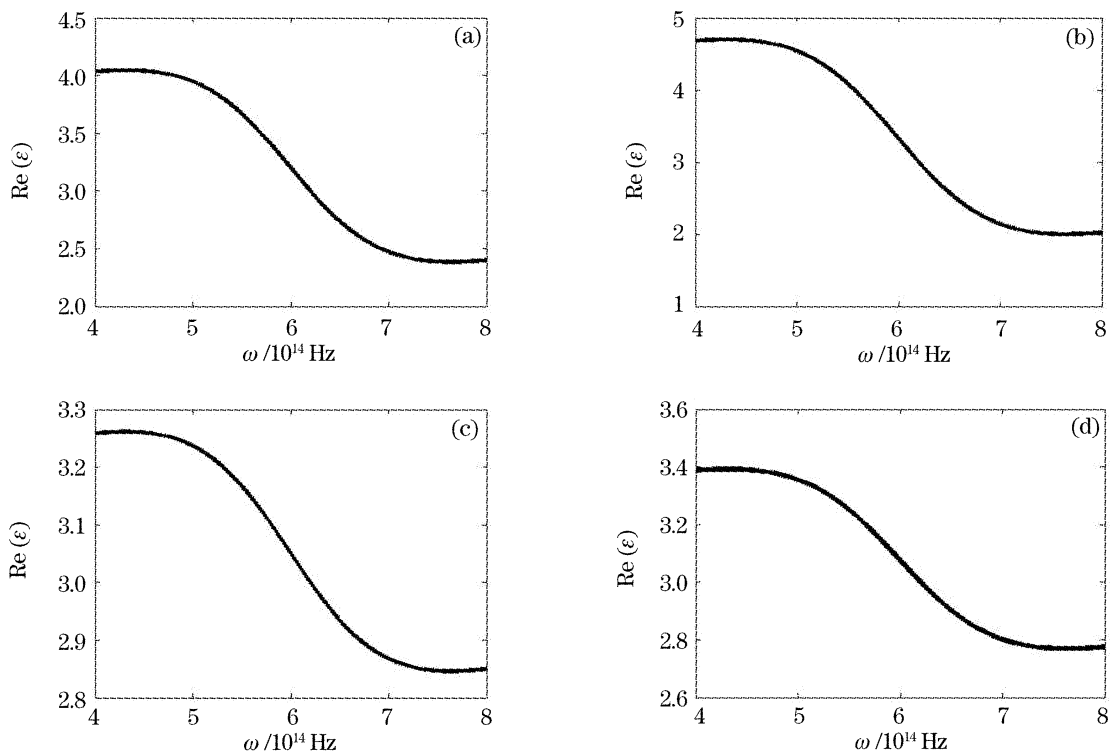


图 2 色散介质的介电常量的实部,  $\omega_0 = 6.2 \times 10^{14}$  Hz,  $\gamma = 3.2 \times 10^{10}$  Hz。(a)  $\chi_0 = 0.8$ , (b)  $\chi_0 = 1.3$ , (c)  $\chi_0 = 0.2$ , (d)  $\chi_0 = 0.3$

Fig. 2 Real part of complex dielectric constant of dispersive medium  $\omega_0 = 6.2 \times 10^{14}$  Hz and  $\gamma = 3.2 \times 10^{10}$  Hz.

(a)  $\chi_0 = 0.8$ , (b)  $\chi_0 = 1.3$ , (c)  $\chi_0 = 0.2$ , (d)  $\chi_0 = 0.3$

### 3 结果和讨论

#### 3.1 缺陷模的形成和频移

为了比较,首先计算了没有色散介质( $\chi_0 = 0$ )时的透射谱,图 3 显示了模拟结果。图中一个缺陷模( $\omega = 7.274 \times 10^{14}$  Hz)出现在禁带( $5.5 \times 10^{14} \sim 8 \times 10^{14}$  Hz)中。

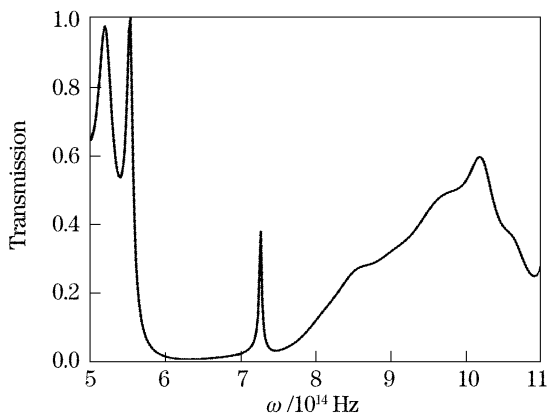


图 3 一维缺陷光子晶体的透射谱,缺陷模的中心频率  $7.274 \times 10^{14}$  Hz,  $h_d = 0.5 \mu\text{m}$ ,其他参量如图 1

Fig. 3 Transmission spectrum of one-dimensional photonic crystal with  $\chi_0 = 0$ , where frequency of defect mode is  $7.274 \times 10^{14}$  Hz,  $h_d = 0.5 \mu\text{m}$ , other parameters are the same with Fig. 1

缺陷中引入色散介质( $\chi_0 \neq 0$ )后,色散介质介电常量的实部如图 2 所示,相应的透射谱如图 4 所示,模拟结果呈现了更丰富的光学特性。首先,引入色散后会有更多的模式出现在禁带中,具体对比图 3 和图 4,容易看出引入色散后,透射谱中出现了两个或更多的模式。模拟中色散介质的谐振频率  $\omega_0 = 6.2 \times 10^{14}$  Hz 位于禁带中间,缺陷模一般出现在中心频率的两边。以上特性是由于色散介质的介电常数随频率改变,相当于微腔中包含多种基质,由此导致了多模谐振。

其次,通过对比图 3 和图 4(a)、图 4(b)可看出缺陷模的频率移动。由于其它参量不变,以上结果一定是色散介质的引入导致的。另外,图 4 各图的比较也说明了改变缺陷模厚度同样导致频移。图 5 显示了色散和缺陷厚度共同作用下缺陷模的频移。从图中可以看出,调节缺陷的厚度可以有效地改变模式频率。缺陷模随着缺陷厚度的增加,首先出现在高频端,然后移动到低频端,呈现近线性的变化曲线。引入色散后,这样的规律仍然存在,但变化曲线明显不同,存在显著的区别。由曲线可以看出,色散对高频模式的影响较小,对低频模式的影响较大。

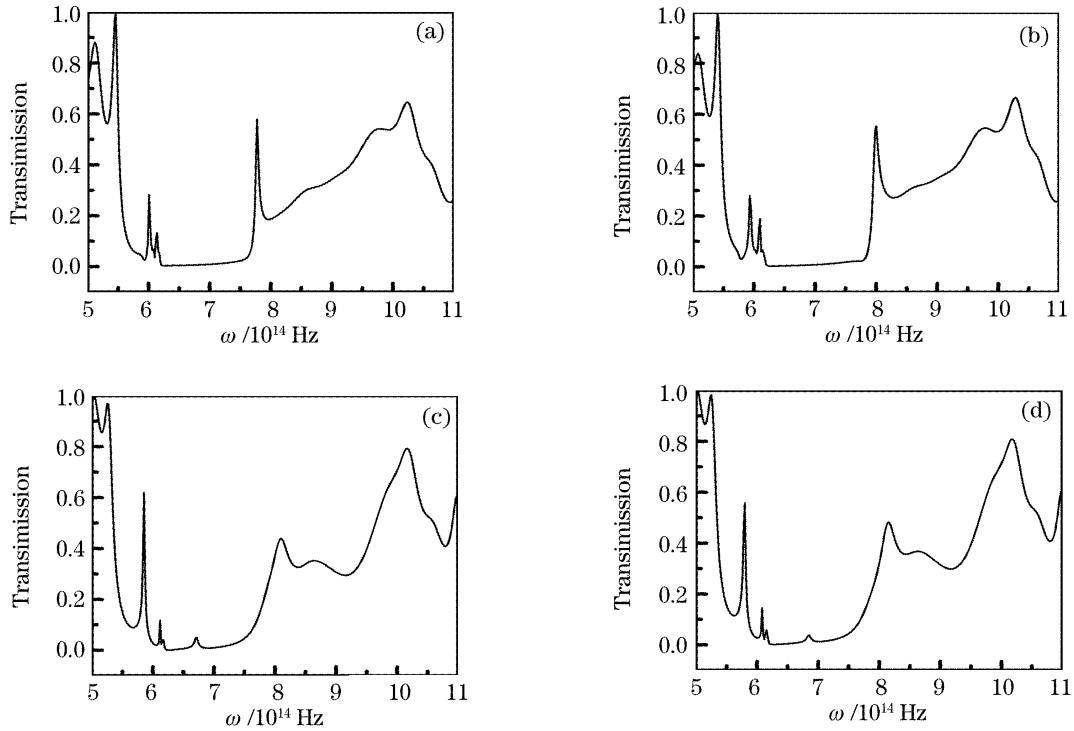


图 4 一维色散光子晶体的透射谱,  $\gamma=3.2 \times 10^9$  Hz,  $\omega_0=6.2 \times 10^{14}$  Hz。(a)  $\chi_0=0.8$ ,  $h_d=0.5 \mu\text{m}$ , (b)  $\chi_0=1.3$ ,  $h_d=0.5 \mu\text{m}$ , (c)  $x_0=0.2$ ,  $h_d=1.0 \mu\text{m}$ , (d)  $\chi_0=0.3$ ,  $h_d=1.0 \mu\text{m}$ ,其他参量如图 1

Fig. 4 Transmission spectra of one-dimensional photonic crystal for  $\gamma=3.2 \times 10^{10}$  Hz,  $\omega_0=6.2 \times 10^{14}$  Hz. (a)  $\chi_0=0.8$ ,  $h_d=0.5 \mu\text{m}$ , (b)  $\chi_0=1.3$ ,  $h_d=0.5 \mu\text{m}$ , (c)  $x_0=0.2$ ,  $h_d=1.0 \mu\text{m}$ , (d)  $\chi_0=0.3$ ,  $h_d=1.0 \mu\text{m}$ . Other parameters are as in Fig. 1

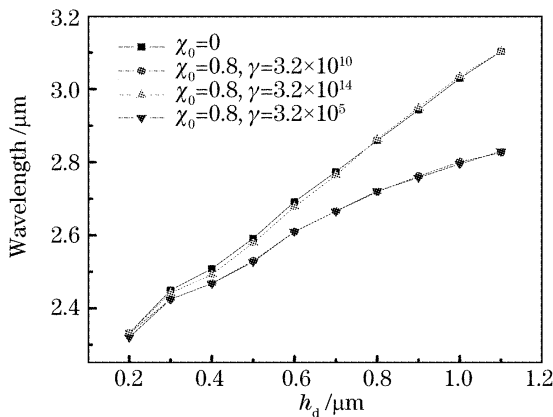


图 5 不同缺陷宽度下的缺陷模的频移,  $\omega_0=6.2 \times 10^{14}$  Hz, 其他参量如图 1

Fig. 5 Defect modes as function of the defect layer,  $\omega_0=6.2 \times 10^{14}$  Hz. Other parameters in Fig. 1

一般,缺陷模在频谱中的位置决定于缺陷的 光学厚度。没有色散介质时,缺陷厚度是决定光学厚度的唯一的因素。缺陷厚度增加导致光学厚度增加,缺陷模向低频方向移动,缺陷厚度减少导致光学厚度减小,模式向高频方向移动。引入色散介质后,光学厚度不但是缺陷厚度的函数,而且是频率的函数。模拟中,介质呈现反常色散。在这种情况下,当缺陷模的频率低于色散介质的谐振频率时,介电常量增大,缺陷模向低频端移动,而当缺陷模的频率高

于色散介质的谐振频率时,介电常量减小,缺陷模向 高频端移动。

根据(1)式,当光场频率等于谐振频率时,介电 常量的实部,即介电常量等于背景材料的介电常量, 和材料色散没有关系。这意味着位于谐振频率处的 谐振模将不随介质色散特性而改变。模拟中在谐振 频率附近观测到了这类缺陷模,而且正如以上分析, 其频率一般不随介质的色散特性改变。

由此可见,改变缺陷的几何厚度和介质折射率 都将改变光学厚度,从而改变模式的频率。但以往 的研究仅仅涉及几何厚度对模式频率的影响,并没 有考虑折射率改变对模式的影响。文中同时考虑了 光学厚度和折射率的影响,弥补了以往研究的一些 不足。

### 3.2 介质色散对缺陷模的影响

虽然调节缺陷厚度、和引入色散介质都可以调 节模式的频率,但是色散介质对缺陷模的调节,在未 来的高速通信中有更大的应用前景。实验中已经实 现的调节载流子浓度或温度而快速调整禁带的方法, 就是通过改变介质的色散特性实现的<sup>[13,14]</sup>。为了 研究色散特性对模式的影响,下面在一定的缺陷 厚度下,调节色散介质的谐振频率  $\omega_0$ 、色散强度  $\chi_0$

和衰减因子  $\gamma$  等参量,观察透射谱的变化。图 6 显示了不同色散强度下的缺陷模,首先,发现中心频率对模式的影响很大,调节色散强度可以有效地改变模式的频率。对于  $\omega > \omega_0$  的模式,增大色散强度,缺陷模的中心频率移向高频端,呈现近线性减少。对于  $\omega < \omega_0$  的模式,增大色散强度,缺陷模的中心频率移向低频端,呈现近线性增加。

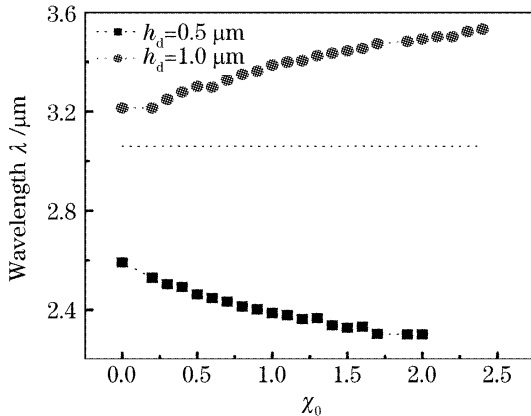


图 6 不同色散强度下的缺陷模,  $\gamma = 3.2 \times 10^{10}$  Hz,  $\omega_0 = 6.2 \times 10^{14}$  Hz。点线表示色散介质的谐振波长  $\lambda_0 = 2\pi c/\omega_0 = 3.06 \mu\text{m}$ ,其他参量如图 1

Fig. 6 Defect modes versus  $\chi_0$  for  $\gamma = 3.2 \times 10^{10}$  Hz,  $\omega_0 = 6.2 \times 10^{14}$  Hz. The dot line indicates the resonant wavelength of the dispersive medium  $\lambda_0 = 2\pi c/\omega_0 = 3.06 \mu\text{m}$ . Other parameters in Fig. 1

图 7 显示了不同谐振频率下的缺陷模,图中显示了缺陷宽度  $0.5 \mu\text{m}$  和  $1 \mu\text{m}$  时,缺陷模频率的变化规律。从图中可以看出,缺陷模的频率随色散介质的谐振频率增加而增加。结果说明改变色散的谐振频率,同样可以调节缺陷模的频率。

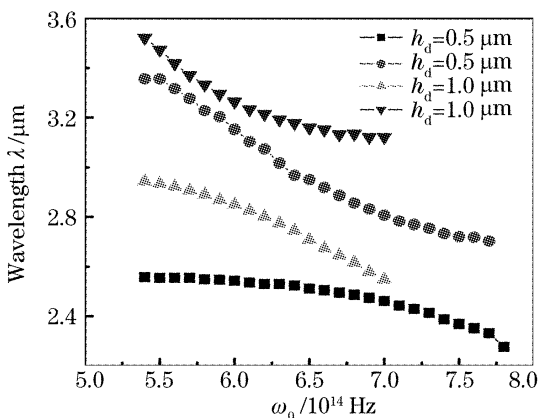


图 7 不同谐振频率下的缺陷模。  $\gamma = 3.2 \times 10^{10}$  Hz,  $\chi_0 = 0.2$ 。其他参量如图 1

Fig. 7 Transmission spectrum versus resonant frequency  $\omega_0$  for  $\gamma = 3.2 \times 10^{10}$  Hz and  $\chi_0 = 0.2$ . Other parameters in Fig. 1

另外介质的吸收同样会影响模式的调节。如

图 5 所示,介质色散对模式的影响在衰减系数  $\gamma = 3.2 \times 10^{10}$  Hz 时达到最大,进一步增大衰减系数将导致这种作用减弱,而相反地减小衰减系数,也并不会使得这种作用增强。以上结果说明,色散介质的衰减系数存在一个优化值,如何确定这个值有待进一步研究。

## 4 结 论

在实际的器件中,介质的色散是不开避免的,文中研究了色散特性对微腔中缺陷模光学特性的影响,弥补理论上的不足,有利于全面理解微腔的光学特性。另外,模式的调节在实际的应用中有重要的应用价值,模拟结果说明,通过调节介质的色散可以有效地控制模式的中心频率。这为模式的调节提出了一个新的思路和方法。

## 参 考 文 献

- 1 Sajeev John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 2 Eli Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 3 Alvaro Blanco, Emmanuel Chomski, Serquei Grabtchak *et al.*. Large-scale synthesis of a silicon photonic crystal with a complete three-dimensional bandgap near 1.5 micrometres[J]. *Nature*, 2000, **405**(6785): 437~440
- 4 A. Femius Koenderink, Lydia Bechger, H. P. Schriemer *et al.*. Broadband fivefold reduction of vacuum fluctuations probed by dyes in photonic crystals[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **88**(14): 143903~143906
- 5 Min Xiao, Yong-qing Li, Shao-zheng Jin *et al.*. Measurement of dispersive properties of electromagnetically induced transparency on rubidium atoms[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **74**(5): 666~669
- 6 Hai Wang, D. J. Goorshey, W. H. Burkett *et al.*. Cavity-linewidth narrowing by means of electromagnetically induced transparency[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(23): 1732~1734
- 7 Ph. Lalanne, S. Mias, J. P. Hugonin. Two physical mechanisms for boosting the quality factor to cavity volume ratio of photonic crystal microcavities[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(3): 458~467
- 8 A. M. Steinberg, P. G. Kwiat, R. Y. Chiao. Measurement of the single-photon tunneling time[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **71**(5): 708~711
- 9 An Liping, Liu Nianhua. Ultralow group velocity in photonic crystal with a dispersive defect[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(28): 1287~1290 (in Chinese)  
安丽萍,刘念华. 光子晶体中缺陷的色散导致的群速度降低[J]. *光学学报*, 2003, **23**(28): 1287~1290
- 10 M. Scalora, R. J. Flynn, S. B. Reinhardt *et al.*. Ultrashort pulse propagation at the photonic band edge: Large tunable group delay with minimal distortion and loss[J]. *Phys. Rev. E*, 1996, **54**(2): R1078~R1081
- 11 Nian-hua Liu, Shi-yao Zhu, Hong Chen *et al.*. Superluminal pulse propagation through one-dimensional photonic crystals with

a dispersive defect[J]. *Phys. Rev. E*, 2002, **65**(4): 046607~046614

12 Mao Huibin, Yang Changli, Lai Zongshen. Theoretical study of the tunable optical filter properties based on photonic crystals[J]. *Acta Physics Sinica*, 2004, **53**(7): 2201~2205 (in Chinese)  
茅惠兵,杨昌利,赖宗声. 光子晶体可调谐滤波特性的理论研究[J]. *物理学报*, 2004, **53**(7): 2201~2205

13 Hao Dongshan, Wen Hua. Uniaxial anisotropic photonic crystal WDM filters[J]. *Chin. J. Quantum Electronics*, 2004, **21**(6): 868~872 (in Chinese)  
郝东山,文 桦. 波分复用各向异性光子晶体滤波器[J]. *量子电子学*, 2004, **21**(6): 868~872

14 Ryotaro Ozaki, Tatsunosuke Matsui, Masanori Ozaki *et al.*. Electrically color-tunable defect mode lasing in one-dimensional photonic-band-gap system containing liquid crystal [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(21): 3593~3595

15 Ryotaro Ozaki, Yuko Matsuhisa, Masanori Ozaki *et al.*. Electrically tunable lasing based on defect mode in one-dimensional photonic crystal with conducting polymer and liquid crystal defect layer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(11): 1844~1846

16 Omar Ramadan. Unconditionally stable crank-nicolson nearly PML algorithm for truncating linear lorentz dispersive FDTD domains [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2006, **54**(6): 2807~2812

17 R. J. Hawkins, J. S. Kallman. Lasing in tilted-waveguide semiconductor laser amplifiers [J]. *Opt. Quant. Electron.*, 1994, **26**(3): s207~s217

18 P. Halevi, F. Rarnos Mendieda. Tunable photonic crystals with semiconducting constituents [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(9): 1875~1879

19 S. W. Leonard, H. M. van Driel, J. Schilling *et al.*. Ultrafast band-edge tuning of a two-dimensional silicon photonic crystal via free-carrier injection [J]. *Phys. Rev. B*, 2002, **66**(16): 161102~161105



· 广 告 ·



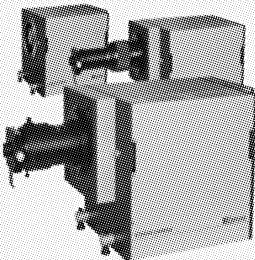
海汇丰实业有限公司

HRT Corporation

www.HRTLaser.com

专业的激光全息解决方案提供商和系统集成商

条纹相机



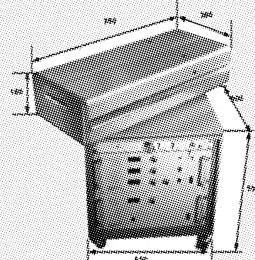
可至2ps的时间分辨率  
8-35mm的光阴极  
高至4MHz的触发扫描  
高至250MHz的同步扫描

全息干板



单色和全色全息材料可选  
分辨率大于3000线对/毫米  
45%-75%的衍射效率  
乳胶颗粒大小8-40纳米

激光器



可同时输出多段波长  
TEM00基模辐射  
低至20ps的脉冲宽度  
最大输出能量120毫焦

主要提供:条纹相机、全息干板、科研级皮秒激光器、超高速CCD相机、光电子设备、全息3D打印机等



HRT — 卓越创新 高效规范

Tel:+86-755-83460 457/597  
Fax:+86-755-83460 401  
E-mail:sales@hrtlaser.com  
www.hrtlaser.com