

文章编号: 1001-3806(2008)02-0207-03

含色散增益介质光子晶体微腔的光学特性

韩艳玲^{1,2}, 王宏^{3,4}

(1. 华中科技大学 人工智能研究所, 武汉 430074 2. 中国地质大学 物理系, 武汉 430074 3. 深圳大学 电子科学与技术学院 太赫兹技术中心, 深圳 518060 4. 电子科技大学 物理电子学院, 成都 610054)

摘要: 为了解光子晶体微腔的光学传输特性, 探讨微腔的折射率对缺陷模放大特性和谐振频率的影响, 采用时域有限差分法计算了含洛伦兹色散介质一维光子晶体微腔的透射谱, 分析、比较了不同光子晶体微腔的透射谱。结果表明, 微腔折射率的大小决定缺陷模的谐振频率, 而介质色散特性将导致缺陷模频率的移动。另外, 当通过复介电常数的虚部引入光学增益后, 缺陷模在增益介质中被放大, 其阈值特性和缺陷折射率的大小密切相关。模拟结果证明通过合理的选择微腔中介质折射率的大小, 可以改善微腔的光学特性, 降低激光器的阈值。

关键词: 激光光学; 光子晶体; 时域有限差分法; 阈值

中图分类号: O437 **文献标识码:** A

Optical properties of one-dimensional photonic crystal containing dispersive and active medium

HAN Yan-ling^{1,2}, WANG Hong^{3,4}

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

Abstract For well understanding of light propagation in photonic crystal micro-cavity, the transmission spectrum of a one-dimensional photonic crystal contained Lorentz dispersive medium was calculated by means of the finite difference time domain method. The influence of refractive index inside micro-cavity on amplification properties and resonant frequency of defect modes was analyzed in detail. The results show that dispersive properties inside the micro-cavity lead to frequency shift of the defect modes. In addition, these defect modes can be also amplified as optical gain is introduced into the system. It is shown that lasing threshold of the defect modes can be significantly reduced through carefully adjusting the refractive index of micro-cavity.

Key words laser optics; photonic crystal; finite-difference time-domain method; threshold

引 言

光子晶体是一种介电常数周期性排列的人工材料, 其光学特性例如光子禁带、缺陷模对于未来的光学器件有重要的应用价值, 是人们关心的问题 and 研究热点^[1-3]。在以往的研究中, 缺陷模的空间分布、 Q 值以及结构参数对它的影响, 已经被详细地讨论^[4]。但在这些研究中, 缺陷层的介电常数往往为常数或等于真空介电常数 ϵ_0 , 缺陷半径决定缺陷模的频率。最近含有二能级系统和量子点的光子晶体微腔引起了人们的关注, 一些相关的光学特性, 例如禁带加强、光学双稳

态、频率排斥和线宽变窄等已被理论预测和实验证明^[5-7]。几个相关的模型被提出解释微腔的光学特性^[8]。在这种情况下, 缺陷中的折射率不再是 ϵ_0 , 而且介质色散特性也不能忽略, 微腔的光学特性有待进一步研究。

作者采用时域有限差分法 (finite-difference time domain, FDTD) 探讨了含有色散介质微腔中缺陷模的放大特性和频移。模拟结果显示, 缺陷模在增益介质中能够被放大, 具有很高的幅值, 且介质色散将导致缺陷模的频移, 缺陷模的放大特性和频率依赖于缺陷层中折射率的大小和色散特性。

1 基本模型

图 1 中给出了一维光子晶体微腔的典型结构。它由 3 种介质构成, 中间缺陷层为厚度 h_d 介电常数 ϵ_d

基金项目: 湖北省自然科学基金资助项目 (2006ABA345)

作者简介: 韩艳玲 (1965-), 女, 副教授, 研究方向为微腔激光器、电磁波理论。

Email: wanghong745@sohu.com

收稿日期: 2006-12-06 收到修改稿日期: 2007-04-10

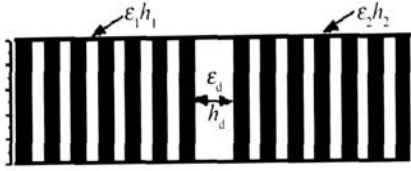


Fig 1 The structure of one dimensional photonic crystal with the defect layer for $h_1 = 0.5 \mu\text{m}$, $\epsilon_1 = \epsilon_0$, $h_2 = 0.5 \mu\text{m}$, $\epsilon_2 = 4\epsilon_0$, $h_d = 0.5 \mu\text{m}$, $\epsilon_d = 3\epsilon_0$, $n_c = 12$

的色散介质, 两边为厚度 h_1 介电常数 ϵ_1 和厚度 h_2 介电常数 ϵ_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_c

在缺陷层中, 量子点以及染料溶液等色散介质的介电常数为^[9]:

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

式中, ϵ_d 为背景材料的介电常数, ω_0 是谐振频率, γ 是衰减系数, χ_0 表示色散强度。需要注意的是, 介电常数 $\epsilon(\omega)$ 是一个复数, 其虚部 $\text{Im}[\epsilon(\omega)]$ 来自介质的吸收或放大。根据 (1) 式, 将介质常数的虚部代入增益系数 $g(\omega) = (2\omega/c) \text{Im}[\epsilon(\omega)]$ 中, 能够得到介质的增益系数:

$$g(\omega) = -\frac{\gamma}{2} \frac{\chi_0 \omega_0^2}{(\omega_0 - \omega)^2 + (\gamma/2)^2} \quad (2)$$

当 χ_0 为负数时, (2) 式描述了一个具有洛伦兹线型的增益曲线, 增益曲线的幅值决定于 χ_0 的绝对值, 反映了抽运的水平, 而增益曲线的线宽决定于 γ 。图 2 显示了色散介质介电常数的实部和增益系数。在色散介质中, Maxwell 方程组为^[10]:

$$\begin{cases} \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \times H = \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial t} \end{cases} \quad (3)$$

式中, P 为极化强度, ϵ_0 是真空介电常数。缺陷层以外的非色散介质, 极化强度为常数, 但在色散介质中极化强度表示为:

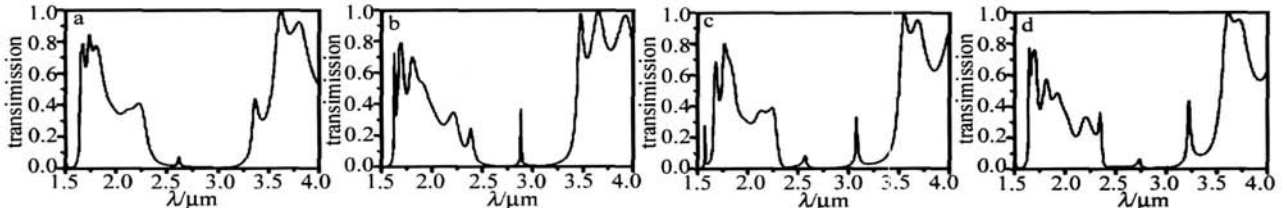


Fig 3 Transmission spectra of one dimensional photonic crystal for $h_d = 0.5 \mu\text{m}$
a- $\epsilon_d = 2\epsilon_0$ b- $\epsilon_d = 3\epsilon_0$ c- $\epsilon_d = 4\epsilon_0$ d- $\epsilon_d = 5\epsilon_0$

可以看出, 缺陷的折射率改变时, 不同的模式出现在禁带中, 介电常数较小时, 频谱中呈现一个缺陷模, 而且模式的频率较高; 介电常数增大时, 缺陷模的频率降低, 频谱中出现两个模式。另外, 当缺陷的折射率不变, 缺陷厚度 $h_d < 1.0 \mu\text{m}$ 时, 频谱中只有单模出现, 继

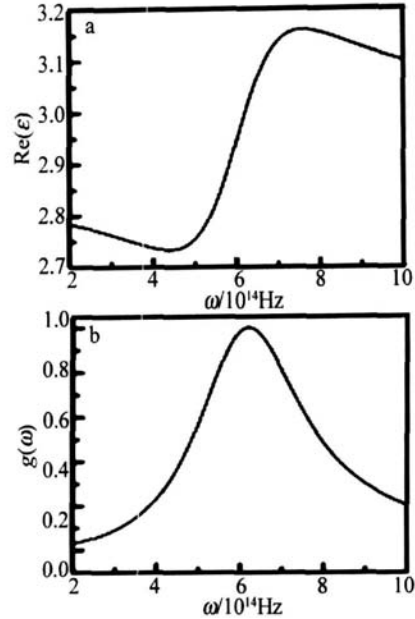


Fig 2 a- the real part of complex refractive index b- optical gain profile $\omega_0 = 6.2 \times 10^{14} \text{Hz}$, $\gamma = 0.5\omega_0$, $|\chi_0| = 0.2$

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

(4) 式是 (1) 式反傅里叶变换的结果。

对于一定的微腔, 当以上参数给定后, 采用 FDTD 方法数值求解 Maxwell 方程组 (3) 式以及 (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。为了在初始时刻激发系统, 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, 采用完全匹配层吸收边界的方式进行计算。

2 结果和讨论

图 3 显示了有色散 ($\chi_0 > 0$) 时的透射谱。从图中

续增加缺陷厚度, 频谱中出现两个或多个缺陷模。

图 4 显示了没有色散 ($\chi_0 = 0$) 和有色散 ($\chi_0 > 0$) 时, 缺陷模频率和折射率的依赖关系, 此时, 缺陷厚度 $h_d = 1.8 \mu\text{m}$, 频谱图中呈现两个缺陷模。从图中可以看出, 随着折射率的增大, 缺陷模的波长由小到大增

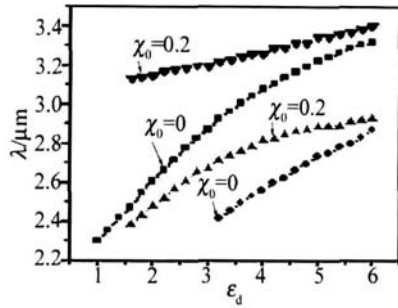


Fig 4 Dependence of defect modes on refractive index of microcavity
 $h_d = 1.8 \mu\text{m}$, $\omega_0 = 6.2 \times 10^{14} \text{Hz}$, $\gamma = 0.5\omega_0$

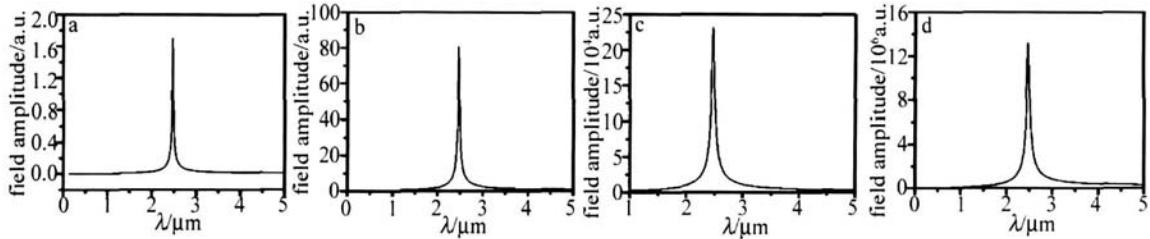


Fig 5 Amplification properties of defect modes for $\omega_0 = 6.2 \times 10^{14} \text{Hz}$, $\gamma = 0.5\omega_0$, $h_d = 1.8 \mu\text{m}$
 a- $|\chi_0| = 0.12$ b- $|\chi_0| = 0.14$ c- $|\chi_0| = 0.18$ d- $|\chi_0| = 0.2$

可以看出,透射谱中缺陷模幅度值随着增益水平的提高不断增加,出现了线宽很窄、幅度值很大的频谱峰。模拟结果说明缺陷模能够有效被放大。

图 6 显示了缺陷层中介电常数的变化对模式放大特性的影响,横轴 $|\chi_0|$ 的大小表示了增益水平的高低,

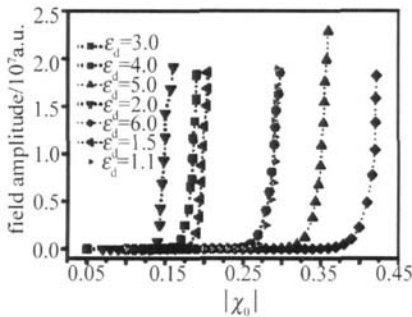


Fig 6 Threshold properties of defect modes for different refractive index
 $\omega_0 = 6.2 \times 10^{14} \text{Hz}$, $\gamma = 0.5\omega_0$, $h_d = 1.8 \mu\text{m}$

竖轴为缺陷模的模场的最大峰值。从图中容易看出模式的阈值特性。对比图中各图,可以看出缺陷中的介电常数的大小影响模式的阈值,具体的,介电常数为 2 时,模式的阈值最低,介电常数为 6 时,模式的阈值最高。

3 结论

介质和微腔的相互作用是激光物理中的重要问题,采用 FDTD 法研究了含色散介质一维光子晶体微腔中缺陷模的放大特性和模式移动。模拟结果显示,光子晶体微腔中引入色散介质后,缺陷模的频率受介质介电常数和色散特性的影响,将发生移动。在增益介质中,缺陷模能够被有效的放大,形成激光,其阈值

加。如果考虑材料的色散,上述依赖关系依然存在,但缺陷模产生频移。而且可以看出,介质色散对低频缺陷模的影响较小,对高频缺陷模的影响较大。

一般而言,缺陷模的频率决定于缺陷的光学宽度。没有色散介质时,调节缺陷的厚度可以改变缺陷的频率。引入色散介质后^[11],缺陷的光学厚度不但是缺陷几何厚度的函数,而且是频率的函数。改变介质的色散特性,缺陷模的频率将发生移动,甚至出现新的模式。

图 5 显示了 $\chi_0 < 0$ 时缺陷模的放大特性。从图中

依赖于介质介电常数的大小。模拟结果有助于理解光子晶体微腔的光学特性,对于优化微腔的参数,改善输出特性也有指导意义。

参 考 文 献

- [1] JHN S Strong localization of photons in certain disordered dielectric supatties [J]. Phys Rev Lett 1987, 58(23): 2486-2489
- [2] YABLONOV IS E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. Phys Rev Lett 1987, 58(20): 2059-2062
- [3] QI J X, WEN S C. Research of optical properties of one dimension photonic crystals constructed by positive negative refractive materials [J]. Laser Technology 2006, 32(5): 504-506(in Chinese).
- [4] LALANNE P, MAS S, HUGONIN J P. Two physical mechanisms for boosting the quality factor to cavity volume ratio of photonic crystal microcavities [J]. Optics Express 2004 12(3): 458-467
- [5] BIANCO A, CHOMSKIE, GRABTCHAK S *et al* Large scale synthesis of a silicon photonic crystal with a complete three-dimensional bandgap near 1.5 micrometers [J]. Nature 2000 405(6785): 437-440
- [6] XIAO M, LIY Q, JIN S Z, BANACLOCHE J G. Measurement of dispersive properties of electromagnetically induced transparency on rubidium atoms [J]. Phys Rev Lett 1995, 74(5): 666-669.
- [7] WANG H, GOORSHEY D J, BURKETT W H, *et al* Cavity-linewidth narrowing by means of electromagnetically induced transparency [J]. Opt Lett 2000 25(23): 1732-1734.
- [8] HARAYAMAT, SUNNADA S, KEDA K S. Theory of two-dimensional microcavity lasers [J]. Phys Rev 2005 E72(1): 013803-013814
- [9] LI Z Y, ZHOU J Y. Optical properties of a two-dimensional array of absorptive and dispersive medium under near resonant excitation [J]. Acta Physica Sinica 2006, 55(2): 677-681(in Chinese).
- [10] HAWKINS R J, KALIMAN J S. Lasing in tilted-waveguide semiconductor laser amplifiers [J]. Opt & Quantum Electron 1994, 26(3): 207-217
- [11] HALEV I P, MENDEDA F R. Tunable photonic crystals with semiconducting constituents [J]. Phys Rev Lett 2000 85(9): 1875-1879