

文章编号: 0253-2239(2006)11-1691-7

一维光子晶体缺陷模激光器的放大特性*

王 宏^{1,2} 欧阳征标¹ 韩艳玲^{3,4} 孟庆生¹ 简耀波⁵ 罗贤达¹

- 1 深圳大学太赫兹技术研究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 100718
- 3 中国地质大学(武汉)数理系, 武汉 430074
- 4 华中科技大学图像所, 武汉 430074
- 5 华中科技大学光电子工程系, 武汉 430074

摘要: 光子晶体中引入缺陷后将形成缺陷模, 这些缺陷模在增益介质中将被放大形成激光。基于麦克斯韦方程和速率方程相结合的模型, 用时域有限差分法(FDTD)计算和分析了一维单缺陷光子晶体激光器中缺陷模的空间分布和频谱特性, 以及这些缺陷模的放大特性, 主要研究了缺陷层的厚度、晶体层数对缺陷模放大特性的影响。模拟结果显示, 类似于传统激光腔的腔模, 这些缺陷模能够被放大, 形成激光。调整缺陷层的厚度、晶体层数等结构参量, 将改变缺陷模的谐振, 激射频率以及空间分布, 这将直接影响激射阈值和饱和特性。增加晶体的层数, 激光器的阈值将降低, 饱和值将增加, 但晶体层数增加到一定程度时, 这种增减趋势变弱。模拟结果证明了有效层数的存在。

关键词: 激光物理; 光子晶体激光器; 时域有限差分法; 缺陷模

中图分类号: O43 文献标识码: A

Amplification of One-Dimensional Photonic Crystals Defect-Mode Laser

Wang Hong^{1,2} Ouyang Zhengbiao¹ Han Yanling^{3,4} Meng Qingsheng¹
Jian Yaobo⁵ Luo Xianda¹

- 1 *Center of THz Technology of Shenzhen University, College of Engineering and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060*
- 2 *School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, School of Physical Electronics, Chengdu 100718*
- 3 *Mathematics & Physics Department, China University of Geosciences, Wuhan 430074*
- 4 *State Education Commission Laboratory for Image Processing & Intelligent Control, Institute of Artificial Intelligence, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074*
- 5 *Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074*

Abstract: Defect modes will emerge in the emission spectrum as a defect is introduced in a photonic crystal, and such modes can be amplified to produce laser radiations. Based on the model that couples Maxwell's equations with the rate equations of electronic population, the spatial distribution and spectrum characteristics of the laser modes in a single-defect active photonic crystal are investigated by the finite-difference time-domain method, as well as the amplification of defect modes. The influences of the number of crystal periods and the thickness of the defect layer on amplification of defect modes are analyzed. The results show that the spectral property, resonance and radiation frequency, and spatial profile of defect mode depend directly on the medium parameters such as the number of crystal periods and the thickness of defect layer, which further influences the radiation threshold and saturation. The radiation threshold decreases and the saturated output increases when the number of crystal periods increases. Such a trend becomes weak when the number of the crystal periods is large enough and thus there exists an effective number for the crystal periods in the system.

Key words: laser physics; photonic crystal laser; finite-difference time-domain method; defect mode

* 国家自然科学基金(60471047, 60378001)、广东省自然科学基金(04011308)和深圳市科技局计划(200310)资助课题。

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

E-mail: wanghong745@sohu.com

收稿日期: 2005-12-21; 收到修改稿日期: 2006-04-10

1 引 言

最近几年,作为一种新型微腔激光器,光子晶体激光器受到人们的广泛关注^[1,2]。由于工作机理不同,光子晶体激光器可分为两类,一类的谐振腔形成于晶体中的缺陷,激光形成于腔模的谐振,被称为光子晶体缺陷模激光器^[3~9]。另一类没有传统的谐振腔,激光形成于带边低群速导致的光学增益加强,被称为光子晶体带边激光器^[10~12]。随着微刻技术的发展,多种光子晶体激光器已经在实验室中实现,而进一步改进工艺、优化参量实现理论预测的低阈值、低模体积和高 Q 值运行,是目前理论和实验中面临的问题^[13~15]。

类似于传统激光器,光子晶体缺陷模激光器包括增益介质和微腔两部分。如果微腔的损耗很低,这种激光器可以实现低阈值运行。目前,有限时域差分法(FDTD)、平面波法(PWE)和传输矩阵法(TMM)等多种方法被用于这种微腔特性的研究。微腔的 Q 值以及它与缺陷的半径、晶体的层数、折射率等结构参量的关系都有详细的探讨,几种提高微腔 Q 值的方法也被提出^[2,16,17]。但是,这些理论限于研究冷腔的情况,没有考虑增益介质和微腔的相互作用。

传统激光理论通过求解速率方程,揭示了谐振腔的激射阈值、饱和以及模式竞争等放大特性,是人们分析激光特性的有力工具。本文采用麦克斯韦方程和速率方程相结合的模式,用时域有限差分法直接求解麦克斯韦方程和速率方程组,在不同的微腔结构参量下,观测和分析了缺陷模的激射阈值和饱和特性以及微腔结构参量对这些特性的影响。

2 基本模型

图 1 给出了一维单缺陷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 ϵ_d ,具有四能级结构的增益介质,两边为厚度 h_1 介电常量 ϵ_1 和厚度 h_2 介电常量 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_{cell} ,晶格常量 $a = h_1 + h_2 = 480 \text{ nm}$ 。模拟中选取低折射率介质层 $h_1 = 300 \text{ nm}$ 和 $\epsilon_1 = \epsilon_0$,高折射率介质层 $h_2 = 180 \text{ nm}$, $\epsilon_2 = 4\epsilon_0$,缺陷层 $\epsilon_d = \epsilon_0$ 。改变 h_d 、 ϵ_d 、 ϵ_1 、 ϵ_2 和 n_{cell} 等结构参量,将形成不同结构的光子晶体微腔。

采用传统的时域有限差分法计算非增益介质中的电场,采用麦克斯韦方程和速率方程相结合的模式,

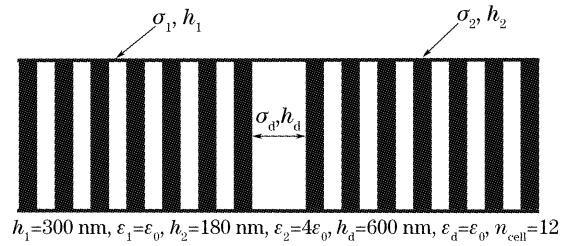


图 1 一维光子晶体缺陷模激光器结构图

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

型,模拟增益介质中的受激辐射现象^[18,19],其麦克斯韦方程组为

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (1a)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \epsilon_i \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t}, \quad (1b)$$

其中 \mathbf{P} 为极化强度, $\epsilon_i = n_i^2$, $i = 1, 2$ 。四能级系统速率方程组为

$$\frac{dN_3(x, t)}{dt} = P_r N_0(x, t) - \frac{N_3(x, t)}{\tau_{32}}, \quad (2a)$$

$$\frac{dN_2(x, t)}{dt} = \frac{N_3(x, t)}{\tau_{32}} + \frac{E(x, t)}{\hbar\omega_a} \frac{dP(x, t)}{dt} - \frac{N_2(x, t)}{\tau_{21}}, \quad (2b)$$

$$\frac{dN_1(x, t)}{dt} = \frac{N_2(x, t)}{\tau_{21}} - \frac{E(x, t)}{\hbar\omega_a} \frac{dP(x, t)}{dt} - \frac{N_1(x, t)}{\tau_{10}}, \quad (2c)$$

$$\frac{dN_0(x, t)}{dt} = \frac{N_1(x, t)}{\tau_{10}} - P_r N_0(x, t), \quad (2d)$$

这里 P_r 分别是抽运速率, $E(x, t)$ 电场强度, $\omega_a(E_2 - E_1)/\hbar$ 是辐射光的中心频率,其中 E_1, E_2 为能级能量, $N_3(x, t), N_2(x, t), N_1(x, t), N_0(x, t)$ 是各能级的粒子数, $\tau_{32}, \tau_{21}, \tau_{10}$ 分别是第 3、2、1 能级的寿命。 N_2, N_1 能级又叫做上、下激光能级,电子首先由基态 N_0 跃迁到 N_3 ,然后无辐射跃迁到 N_2 态,然后由上激光能级 N_2 跃迁到下激光能级 N_1 形成受激辐射,最后由 N_1 能级返回到基态 N_0 。极化强度 P 满足如下公式:

$$\frac{d^2 P(t)}{dt^2} + \Delta\omega_a \frac{dP(t)}{dt} + \omega_a^2 P(t) = \kappa \Delta N(t) E(t), \quad (3)$$

其中 $\Delta N = N_1 - N_2$ 为单位体积激光上下能级的粒子数差值, $\Delta\omega_a = 1/\tau_{21} + 2/T$ 为原子辐射光谱线宽, T 为原子的碰撞时间, $\kappa = 6\pi\epsilon_0 c^3 / (\omega_a^2 \tau_{21})$,其中 c 是真空中光速。

图 2 显示了图 1 光子晶体的禁带结构,图中明显存在三个禁带结构,这里主要讨论位于 $0.28504 \sim 0.44007[\omega a/(2\pi c)]$ 的第一禁带,所得结果容易推广到其它禁带结构中。为了缺陷模能够被有效放大,根据以上参量选择中心频率 $\omega_a = 2\pi \times 2.26597 \times 10^{14}$ Hz 位于第一禁带的中间,原子辐射光谱线宽 $\Delta\omega_a = 1 \times 10^{14}$ Hz 大于禁带的宽度 0.968×10^{14} Hz。这使得增益曲线覆盖了整个光子禁带,禁带内的缺陷模将落在增益曲线内。设增益介质为香豆素染料溶液,其介质参量为 $T = 2 \times 10^{-14}$ s, $N_0 = \sum_{i=1}^4 N_i = 3.313 \times 10^{24}$ m $^{-3}$, $\tau_{10} = 5 \times 10^{-12}$ s, $\tau_{21} = 10^{-10}$ s, $\tau_{32} = 10^{-13}$ s。

对于一定的微腔,当以上增益参量给定后,采用时域有限差分法数值求解麦克斯韦方程组(1a)~(1b),速率方程组(2a)~(2d)以及(3)式,可以数值求解腔内各点不同时刻的电场强度,得到电场的空间分布和时间演化特性。傅里叶变换后,就可以得到模式的频谱特性。计算中,采用一个具有任意振幅的洛伦兹(Lorentz)脉冲作为激励源,完全匹配层(PML)作为吸收边界,其空间步长和时间步长分别为 $\Delta x = 10$ nm 和 $\Delta t = \Delta x/(2c) \approx 1.67 \times 10^{-17}$ s。在一定的抽运速率 P_r 下粒子数反转 $\Delta N < 0$,微腔中的模式经历了一个放大过程,观测不同时刻电场

的幅度值,容易观测到模式的饱和特性。重复计算和分析不同抽运速率 P_r 下,电场幅度的放大特性,就能得到缺陷模的激射阈值。

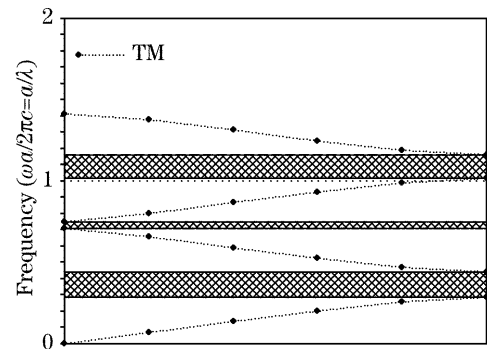


图 2 光子晶体的禁带结构,其中 $h_d=0$,其他参量同图 1
Fig. 2 Forbidden band structure for a one-dimensional photonic crystal with $h_d=0$. Other parameters are the same as those in Fig. 1

3 结果和讨论

3.1 缺陷模的空间分布和频谱特性

光子晶体中引入缺陷后缺陷模将出现在禁带中。缺陷层的厚度是描述微腔特性的重要参量,改变缺陷层的厚度 h_d ,缺陷模的中心频率和空间分布将随之改变,图 3 显示了 h_d 等于 $2h_1, 3h_1, 5h_1, 9h_1$ 时,缺陷模的频谱特性,模拟中 $h_1 = 300$ nm。图中

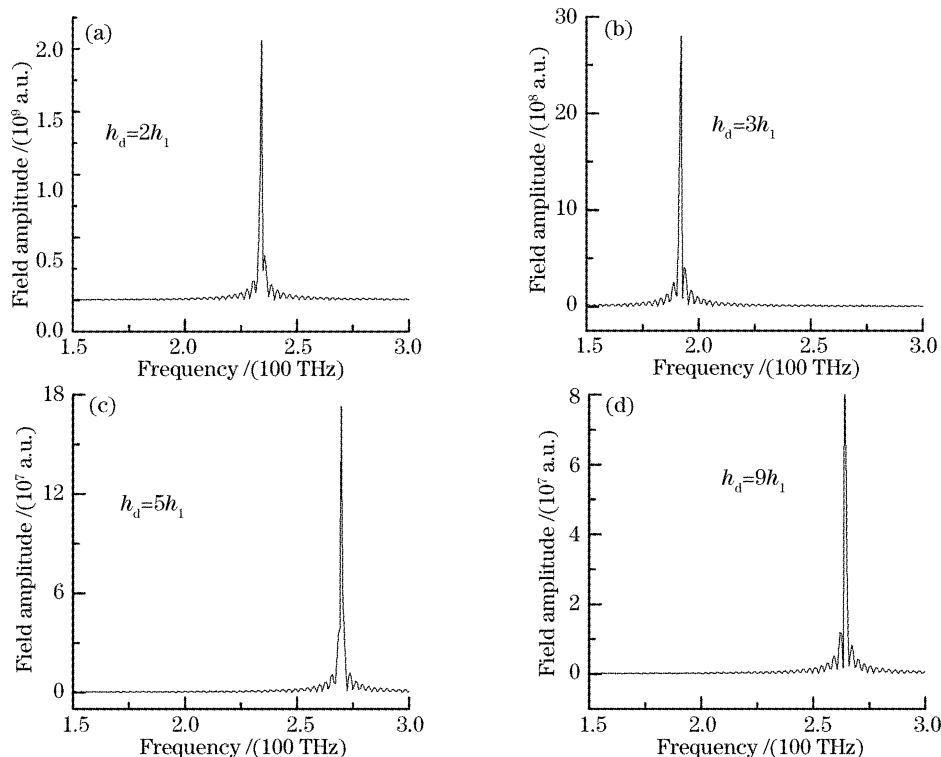


图 3 缺陷模的频谱特性,其中层数 $n_{\text{cell}} = 40$, $P_r = 1 \times 10^{10}$ s $^{-1}$,时间步数 1.25×10^6

Fig. 3 Spectra of the defect mode laser with $n_{\text{cell}} = 40$, $P_r = 1 \times 10^{10}$ s $^{-1}$, the number of time steps being 1.25×10^6

显示了幅度很大、线宽很窄的辐射峰,说明缺陷模类似于传统激光器的冷腔模,在增益介质中将被放大、形成激射。其次,对比图 3 中各图,可以看出 h_d 改变后,缺陷模的中心频率随之改变,这说明 h_d 决定缺陷模的中心频率。这一结果已经在文献中得到详细的讨论^[20],这一结论在含有增益介质的微腔中仍然成立。这一特性可以用于光子晶体激光器的模式选模,通过改变缺陷层的厚度,可以获得不同频率的输出。

图 4 显示了这些模式的空间分布,从图中容易看出,电场能量主要集中在缺陷层中。但仍有部分能量

渗透到缺陷层周围的区域中,电场幅值从缺陷层中心指数衰减。这意味着缺陷层周围的介质层将直接影响微腔的光学特性,合理调整缺陷层边沿的参量,将会改善微腔的特性。最近的研究证明了这一点,通过合理调整缺陷层周围介质层的参量,极大地提高了微腔的 Q 值^[2,17]。此外,对比图 4 中各图还可以看出,这些缺陷模具有不同的空间分布,电场在空间各点的幅度值和分布范围都是不同的,不同缺陷模渗透到周围介质的深度是不同的,这一结论与传输矩阵法计算的结果是一致的^[21]。这一特性将直接影响缺陷模的激射阈值、饱和输出等放大特性。

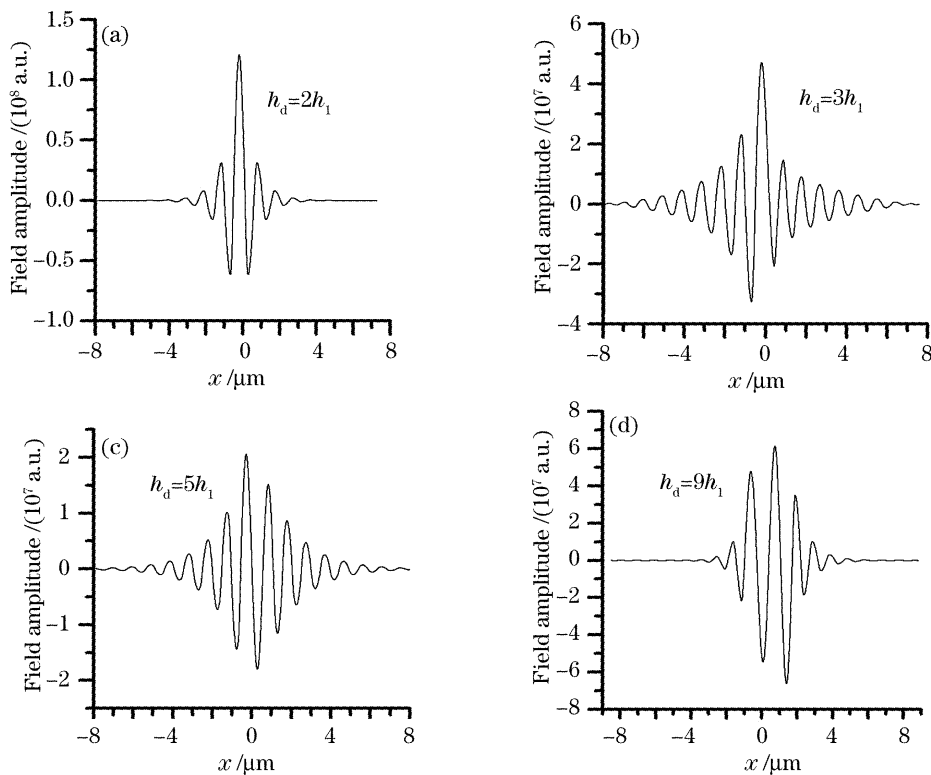


图 4 缺陷模的空间分布特性,计算参量同图 3

Fig. 4 Spatial distribution of the defect mode electric fields with the same parameters as shown in Fig. 3

3.2 缺陷模的激射阈值和饱和特性

阈值和饱和是描述激光器特性的重要参量。导致电场幅度迅速增加时的抽运速率就是产生激射所需要的最低抽运速率,简称它为阈值。在一定的抽运速率下,激射场强不再有明显增加的现象称之为激射饱和现象。在不同的缺陷层厚度 h_d 下,计算了不同抽运速率 P_r 下缺陷模的放大特性,图 5 显示了模拟结果,其中图 5(a)显示的缺陷模具有较低阈值,图 5(b)显示的缺陷模具有较高阈值。从图中可以看出,抽运速率 P_r 达到一定值后,电场的幅度迅速增加,呈现明显的阈值特性。图 6 显示了不同缺陷模的时间演化特性,其中图 6(a)显示的模式具有较

高的饱和强度,图 6(b)显示的模式具有较低的饱和强度。从图中可以看出,模式经历了两个放大过程,当电场幅度值较小时,电场经历了一个线性放大过程,电场幅度线性增加。当电场进一步增加时,电场幅度趋于饱和值,呈现明显的饱和效应。其次,对比图 5 和图 6,可以看出不同的缺陷模具有不同的激射阈值和饱和特性,其中 $h_d = 9h_1$ 时阈值最低,电场的饱和值最低, $h_d = 3h_1$ 时阈值最高,电场的饱和值也最高。以上结果说明阈值和饱和输出依赖于缺陷层的厚度。

阈值本质上反映了激光器的损耗,损耗大,阈值低,损耗低,阈值高,所以 P_r 的阈值特性首先决定于

缺陷层的损耗。在本系统中,损耗主要来自于缺陷层边界电磁场的透射散失,而不同的缺陷模具有不同的损耗,所以阈值也是不同的^[21]。另外一个影响缺陷模放大的因素是光学增益和电磁场的耦合强度。模拟中增益介质是均匀分布在缺陷中的,但缺陷模呈现不同的空间分布,这将导致不同的耦合强

度。一些耦合强度高的模式将获得更多的增益,具有更大的饱和值,而耦合强度低的模式将获得较少的增益,饱和值也小^[22]。如何调整缺陷腔的结构参量,增加耦合强度、降低阈值、改善输出特性是一个有待进一步研究的问题。

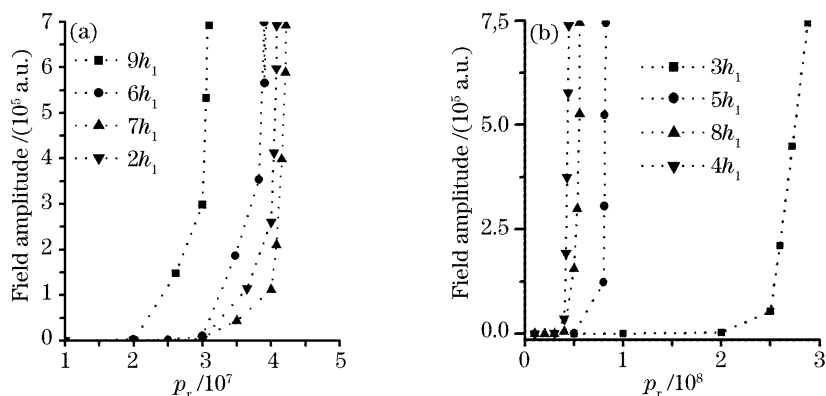


图 5 不同缺陷模的激射阈值特性. 其中,层数 $n_{\text{cell}}=40$,时间步数为 1.25×10^6

Fig. 5 Radiation threshold for different defect modes with n_{cell} being 40 and the number of time steps being 1.25×10^6

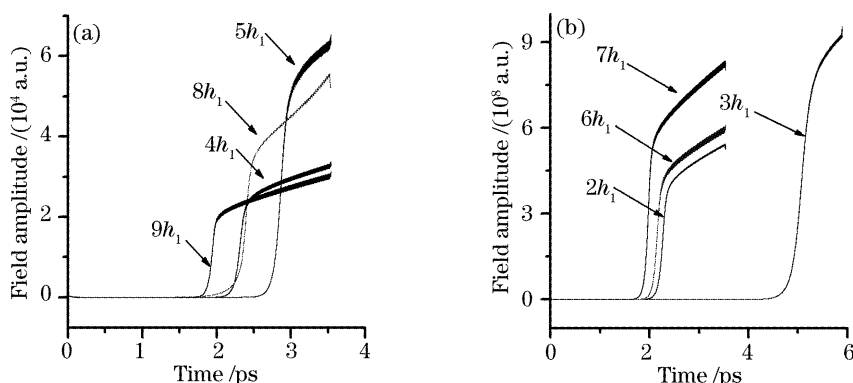


图 6 不同模式的激射饱和特性,其中 $P_r=1 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$,其他参量同图 5

Fig. 6 Saturation property for different defect modes with $P_r=1 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$. Other parameters are the same as shown in Fig. 5

3.3 层数对缺陷模放大特性的影响

光子晶体的层数是描述微腔特性的另一重要参量。增加光子晶体层数将减少缺陷模的损耗,提高 Q 值,是决定缺陷模谐振和激射的重要条件,对激射阈值和饱和都有影响。首先缺陷层的厚度不变,改变晶体的层数,计算缺陷模的激射阈值和饱和值,然后改变缺陷层的厚度,重复以上过程,得到不同缺陷模的激射阈值和饱和输出。图 7 显示了不同层数下,缺陷层厚度为 $2h_1$ 时的阈值和饱和特性。从图中可以看出,增加层数,阈值减少,饱和强度增加。以上结果表明,通过增加介质的层数,可以有效调整缺陷模的放大特性,但进一步研究表明这种作用是有限的。图 8 显示了缺陷模幅值的饱和效应,具体

的,当层数小于 30 时,电场幅值随层数线性增加,但这种作用是有限的,进一步增加层数,电场幅值趋于定值。

以上结果显示,存在一个有效层数,在本系统中,有效层数大约为 30 层。这个层数是光子晶体激光低阈值运行的最小层数,当低于有效层数时,缺陷模的损耗增大,阈值增加,如果层数 $n_{\text{cell}} \leq 5$ 时,损耗很大,激射不能产生。以上结果说明,通过调节层数,可以有效地减小损耗,提高缺陷模的 Q 值。但高于有效层数时,增加层数对损耗和输出影响很小,调节层数已经不能有效地控制激光的特性。有效层数和介质的折射率有关,增加折射率,减少损耗,有效层数将减少。

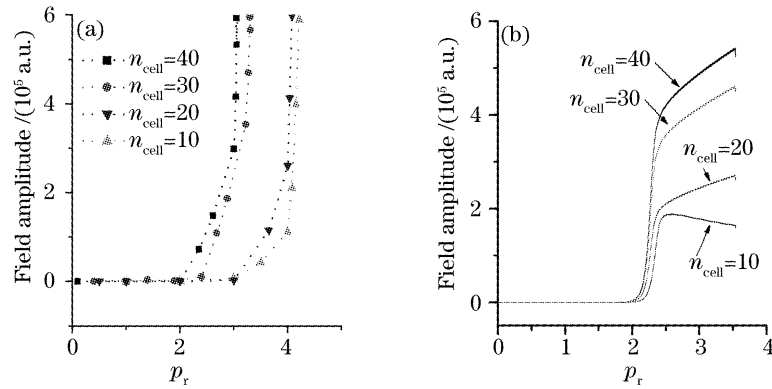


图 7 缺陷模在不同层数下的阈值特性(a)和饱和特性(b),其中,缺陷层厚度 $h_d = 2h_1$,其他参量同图 5 和图 6
Fig. 7 Threshold (a) and saturated output (b) for different numbers of crystal periods with . Other parameters are the same as shown in Fig. 5 and Fig. 6

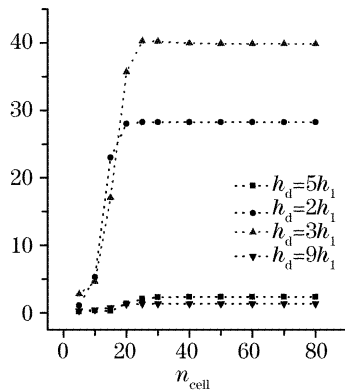


图 8 层数对缺陷模饱和输出的影响,计算参量同图 5 和图 6

Fig. 8 Effect of layer number an saturated output of defect mode, and parameters are the same as shown in Fig. 5 and Fig. 6

4 结 论

建立了麦克斯韦方程和速率方程相结合的模式,用时域有限差分法研究了单缺陷光子晶体激光器中缺陷模的放大特性,观测到了缺陷模的阈值、饱和输出以及缺陷厚度和光子晶体层数对放大特性的影响等光学现象。这一工作有助于进一步理解光子晶体激光器的运行机理以及增益和微腔的相互作用,对于优化结构参量,实现光子晶体激光器的低阈值运行具有理论意义。二维光子晶体激光器是目前研究的热点问题,由于计算量的考虑,研究仅涉及一维光子晶体,二维光子晶体激光器的特性有待进一步研究。另外,文中模型虽然能够描述光子晶体激光器的许多特性,但仅限于经典范围,并不涉及量子效应,量子效应需要采用其他模型进行研究。

参 考 文 献

- 1 E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronic[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 2 P. 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
- 3 Minghao Qi, Eleferios Lidorikis, Peter T. Rakich *et al.*. A three-dimensional optical photonic crystal with designed point defects[J]. *Nature*, 2004, **429**: 538~542
- 4 K. Hennessy, C. Reese, A. Badolato *et al.*. Square-lattice photonic crystal microcavity for coupling to single InAs quantum dots[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(18): 3650~3652
- 5 H. Gyu Park, Jeong-ki Hwang, J. Huh *et al.*. Characteristics of modified single-defect two-dimensional photonic crystal lasers[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2002, **38**(10): 1353~1364
- 6 H. G. Park, J. K. Hwang, J. Huh *et al.*. Nondegenerate monopole-mode two-dimensional photonic band gap laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **79**(19): 3032~3034
- 7 Fang Yuntuan, Shen Tinggen, Tan Xilin. Study on one-dimensional photonic crystal with impurity defects [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11): 1557~1560 (in Chinese)
方云团,沈廷根,谭锡林. 一维光子晶体掺杂缺陷模研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(11): 1557~1560
- 8 Ouyang Zhengbiao, Li Jingzhen, Zhang Daozhong *et al.*. Investigations on multi layer photonic crystal optical filters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1): 79~84 (in Chinese)
欧阳征标,李景镇,张道中等. 多层光子晶体滤波器研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(1): 79~84
- 9 Ouyang Zhengbiao, Yang linling, Xu Guiwen *et al.*. Mode properties of one-dimensional photonic crystals with defect[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2005, **16**(1): 63~66 (in Chinese)
欧阳征标,杨琳玲,许桂雯等. 一维缺陷光子晶体的模式特性研究[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(1): 63~66
- 10 M. Meier, A. Mekis, A. Dodabalapur *et al.*. Laser action from two-dimensional distributed feedback in photonic crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**(1): 7~9
- 11 A. Mekis, M. Meier, A. Dodabalapur *et al.*. Lasing mechanism in two-dimensional photonic crystal lasers[J]. *Appl. Phys. A*, 1999, **69**(1): 111~114
- 12 M. Notomi, H. Suzuki, T. Tamamura. Directional lasing oscillation of two-dimensional organic photonic crystal at several photonic bandgaps[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **78**(10): 1325~1327

- 12 Jelena Vučkovic, Marko Lončar, H. Mabuchi *et al.*. Optimization of the Q factor in photonic crystal microcavities[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2002, **38**(7): 850~856
- 14 H. Y. Ryu, J. K. Hwang, Y. H. Lee. Conditions of single guided mode in two-dimensional triangular photonic crystal slab waveguides[J]. *J. Appl. Phys.*, 2000, **88**(9): 4941~4946
- 15 H. Y. Ryu, S. H. Kim, H. G. Park *et al.*. Characteristics of single defect laser modes in a two-dimensional square lattice photonic crystal slab[J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, **93**(2): 831~837
- 16 S. Nojima. Optical-gain enhancement in two-dimensional active photonic crystals[J]. *J. Appl. Phys.*, 2001, **90**(2): 545~551
- 17 C. Sauvan, G. Lecamp, P. Lalanne *et al.*. Modal-reflectivity enhancement by geometry tuning in photonic crystal microcavities [J]. *Optics Express*, 2005, **13**(1): 245~255
- 18 X. Y. Jing, C. M. Soukoulis. Time dependent theory for Random lasers[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(1): 70~73
- 19 A. S. Nagra, R. A. York. FDTD analysis of wave propagation in nonlinear absorbing and gain media[J]. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 1998, **46**(3): 334~340
- 20 P. R. Villeneuve, Shanhui Fan, J. D. Joannopoulos. Microcavities in photonic crystal; mode symmetry, tunability, and coupling efficiency [J]. *Phys. Rev. B*, 1996, **54**(11): 7837~7842
- 21 Shih-hui Chang, H. Cao, S. Tiong Ho. Cavity formation and light propagation in partially ordered and completely random one-dimensional system [J]. *IEEE J. Quant. Electronics*, 2003, **39**(2): 364~374
- 22 Y. Xu, J. S. Vuckovic, R. K. Lee *et al.*. Finite-difference time-domain calculation of spontaneous emission lifetime in a microcavity[J]. *J. Opt. B*, 1999, **16**(3): 465~474