

一维光子晶体激光器中模场的空间分布及其对阈值的影响*

王宏^{1,2}, 欧阳征标^{1, **}, 韩艳玲^{3,4}, 钟远聪¹, 阮双琛¹

(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 100718)

(3 中国地质大学 (武汉) 数理系, 武汉 430074)

(4 华中科技大学 图像识别与人工智能研究所, 武汉 430074)

摘 要:采用有限时域差分(FDTD)法和传输矩阵法(TMM)计算了一维光子晶体微腔中模式的阈值和模场的空间分布,并用局域化长度和模面积描述了其空间分布特性,着重研究了模场的空间分布对阈值特性的影响.模拟结果显示,激光器的阈值依赖于模式的空间分布,局域化长度和模面积最小的模式具有最低阈值.通过调节包括缺陷宽度、光学厚度比、折射率比等介质参量,可以有效地调节模式的局域化长度和模面积,从而降低激光器的阈值.

关键词:激光物理;光子晶体激光器;模式空间分布;有限时域差分法;传输矩阵法

中图分类号:O43

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2008)01-0095-6

0 引言

最近几年,光子晶体激光器受到了较多关注,许多学者在此领域做了大量的理论和实验工作^[1-18].根据工作机理不同,光子晶体激光器可分为五类:第一类是利用光子晶体作为 F-P 反射镜的光子晶体激光器^[3];第二类是光子晶体环形激光器^[5];第三类是分布反馈式光子晶体激光器^[7];第四类是基于缺陷模局域态的光子晶体激光器,称为光子晶体缺陷模激光器^[8-11];第五类为光子晶体带边激光器,在这种激光器中看不到明显的谐振腔^[12].对于以上各类激光器,如何降低阈值是一个关键问题.现有的理论和实验采用不同的方法,优化结构参量,微腔的 Q 值已经极大的提高^[19-22].但以上研究限于冷腔的 Q 值,并不涉及增益介质和微腔的相互作用,以及增益系数、位置和大小对阈值的影响等相关问题,这显然不能全面的反映这类激光器的特性.

不同模式的空间分布将导致模式和光学增益耦合系数的不同,这直接影响模式阈值的大小.本文采用有限时域差分(FDTD)法和传输矩阵法(TMM)^[23]计算了模式的阈值和局域化长度以及模面积,重点探讨了以上参量对阈值的影响.模拟结果显示,激光器的阈值依赖于模式的空间分布,局域化长度和模面积最小的模式具有最低阈值.通过调

节包括缺陷宽度、光学厚度比、折射率比等介质参量,可以有效地调节模式的局域化长度和模面积,从而降低激光器的阈值.

1 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,整个结构的周期数为 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.本文计算中选用的参量为 $h_1 = 300 \text{ nm}$, $\epsilon_1 = \epsilon_0$, $h_2 = 180 \text{ nm}$, $\epsilon_2 = 4\epsilon_0$, $h_d = 600 \text{ nm}$, $\epsilon_d = \epsilon_0$, $n_{\text{cell}} = 12$.

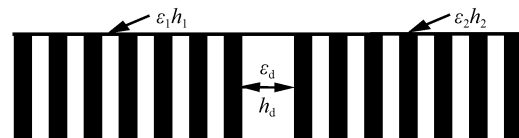


图 1 一维光子晶体缺陷模激光器结构

Fig. 1 The structure of one-dimension photonic crystal with a defect layer

在经典激光理论中,通过分析求解速率方程组,揭示了激光腔的增益系数、激光振荡条件和阈值等特性.传统的有限时域差分法(FDTD),通过求解线性 Maxwell 方程,可以有效地计算模式的空间分布和 Q 值等参量,但显然不能描述具有非线性的复

*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)和深圳大学科研启动基金资助项目(200647)资助

** Tel:029-88204271 Email:zbouyang@szu.edu.cn

收稿日期:2006-07-18

杂系统. 本文采用 Maxwell 方程组和速率方程相结合的模式, 采用 FDTD 法直接求解 Maxwell 方程和速率方程组, 分析增益介质中的受激辐射现象^[24-25], 其 Maxwell 方程组为

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

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

式中 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 是抽运速率, $\omega_a = (E_2 - E_1)/\hbar$ 是辐射光的中心频率, N_3, N_2, N_1, N_0 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 能级又叫作上、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, 再由上激光能级 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 $\frac{d^2 P(t)}{dt^2} + \Delta\omega_a \frac{dP(t)}{dt} + \omega_a^2 P(t) = \kappa \Delta N(t) E(t)$ (3) 式中, $\Delta N = N_1 - N_2$ 是单位体积激光上下能级的粒子数差值, $\Delta\omega_a = 1/\tau_{21} + 2/T$ 是原子辐射光谱线宽, T 为原子的碰撞时间, $\kappa = 6\pi\epsilon_0 c^3 / \omega_a^2 \tau_{21}$.

图 2 显示了 TMM 法计算的禁带结构, 禁带的范围约为 183~270 THz. 为了使缺陷模能够被有效放大, 根据以上参量选择中心频率 $\omega_a = 2\pi \times 2.26597 \times$

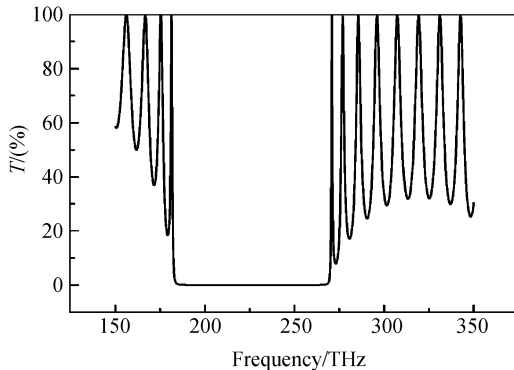


图 2 一维光子晶体的禁带结构
Fig. 2 Band gap of one-dimensional photonic crystal

10^{14} Hz 位于禁带的中间, 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, $N_0 = \sum_{i=1}^4 N_i = 3.313 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$, $\tau_{10} = 5 \times 10^{-12}$ 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 FDTD 方法数值求解 Maxwell 方程组(1a)~(1b), 速率方程组(2a)~(2d)以及式(3), 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. Fourier 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 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.

模面积定义为^[3]

$$S_M = \frac{\int |E^2(x,y)| dx dy}{|E_{\max}|^2} \quad (4)$$

式中 E_{\max} 是最大场强. 模面积描述了介质内场能的空间分布, 模面积越小说明场能分布的范围越小, 集中度越高, 局域化程度越强. 反之模面积越大, 电场的集中度越小, 局域化程度越弱. 另外, 模面积和模式的损耗有关, 模面积小的模式, 损耗较小, 阈值较低, 模面积大的模式, 损耗较大, 阈值也大. 在一维的情况下, 式(4)简化为

$$S_M = \frac{\int |E^2(x)| dx}{|E_{\max}|^2} \quad (5)$$

另外一个描述模场空间分布的概念是局域化长度, 定义为介质中光场衰减为 $1/e$ 时所传播的距离. 由于介质中的场能是指数衰减的, 用公式

$$I(x) = I_0 e^{-x/\xi} \quad (6)$$

数值拟和电场的空间分布, 得到局域化长度 ξ . 局域化长度描述了微腔中场能渗透到腔外的距离, 局域化长度越大, 渗透到腔外的场能越多, 反之局域化长度越小, 渗透到腔外的场能越小.

2 结果和讨论

2.1 不同缺陷厚度下的缺陷模

光子晶体中引入缺陷后, 缺陷模出现在禁带中. 在微腔中放置一个点源, 分析观测点的频率响应, 可以得到模式的谐振频率, 其中频率响应是通过对

观测点不同时刻的场强进行傅里叶变换得到的. 缺陷层的厚度决定缺陷模的中心频率,改变缺陷层的厚度,缺陷模的中心频率随之改变,图 3 显示了模拟的结果. 从图中可以看出,调节缺陷层的厚度可以有效的调节模式的频率,具体地说,当缺陷层的厚度由小逐步增大时,模式的频率由禁带的高频边逐步移到禁带的低频边,近似呈现线性减少的规律. 继续增加缺陷层厚度,模式的频率重复以上演化规律. 另外当缺陷层的厚度小于或接近晶格常量时,只有一个缺陷模出现,当缺陷层的厚度大于晶格常量时,往往出现两个缺陷模. 这里仅限于讨论第一禁带,在第二、第三禁带中也有类似的结果.

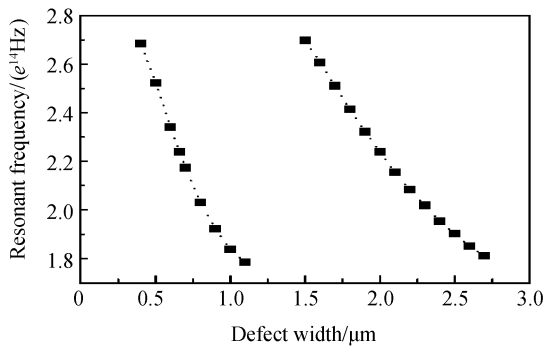


图 3 缺陷厚度对缺陷模的影响
Fig. 3 Influence of the defect width on the defect modes

2.2 缺陷模的空间分布

为了描述模式的空间分布特性,用 TMM 法分别计算了不同模式的局域化长度和模面积. 图 4 显示了模式的一个典型空间分布,图 5 和图 6 显示了不同缺陷厚度下缺陷模的局域长度和模面积. 从图 4~6 可以看出,不同的模式具有不同的局域长度和模面积,在一定的缺陷厚度下,模式的局域化长度和模面积达到最小值. 进一步与图 3 比较,容易发现位于禁带中间的模式具有最小的局域化长度和模面积,而位于禁带边沿的模式具有较大的局域化长度和模面积. 以上特性是由于周期介质层对缺陷模的反射作用的结果,禁带中间的模式受到周期介质层更强的反射,较少的能量渗透到介质中,大多数能量

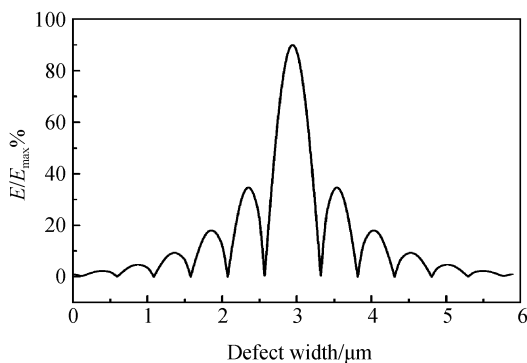


图 4 模场的空间分布,缺陷的宽度为 0.75 μm
Fig. 4 Spatial profile of mode at defect width 0.75 μm

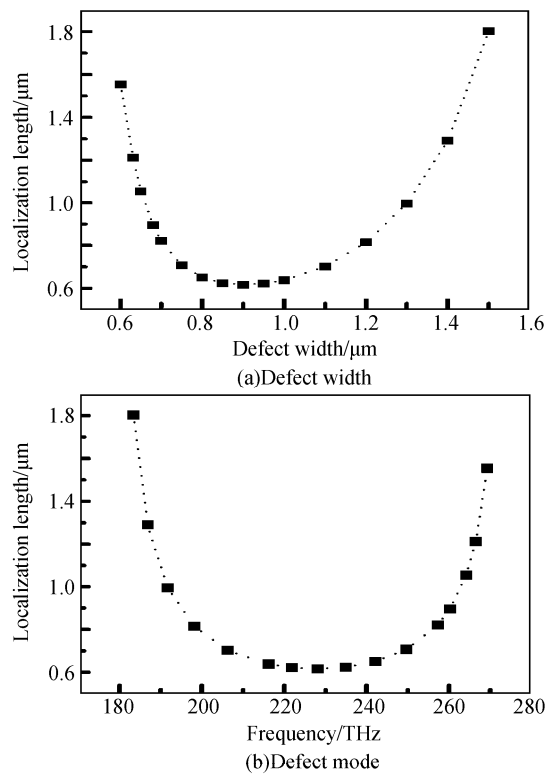


图 5 不同缺陷厚度(a)和不同缺陷模(b)的局域化长度
Fig. 5 Localization length versus the defect width (a) and the defect mode (b)

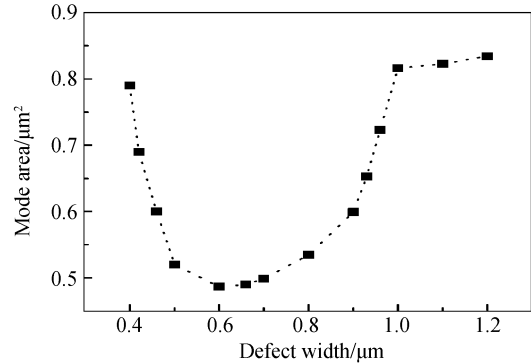


图 6 不同缺陷厚度的模面积
Fig. 6 Mode area versus the defect width

集中在缺陷中,因此具有更小的局域化长度和模面积,而禁带边的模式受到的反射较弱,更多的能量渗透到介质中,较少的能量集中在缺陷中,因此具有较大的局域化长度和模面积. 模式空间分布的以上特性将直接影响模式阈值,下面详细讨论这个问题.

2.3 缺陷模的激光阈值

当缺陷中包含增益介质后,缺陷模将被放大,产生激光. 采用以上速率方程和 Maxwell 方程组相结合的模型,用 FDTD 法计算了不同缺陷模的阈值,图 7 显示了模拟结果. 从图 7 可以看出,模式的阈值呈现出类似于局域化长度和模面积的变化规律,即不同的模式具有不同的阈值,在一定的缺陷厚度下,模式的阈值达到最小值. 进一步与图 3 比较,同样容易发现,在缺陷厚度从小到大变化的过程中,

缺陷模频率从禁带的高频段到低频段反复移动了两次,但位于禁带中间的模式总是具有最低的阈值,而位于禁带边沿的模式总是具有较高的阈值。

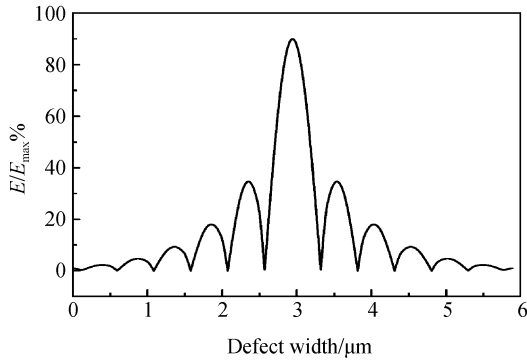


图7 不同缺陷模的阈值
Fig. 7 Threshold value P_{th} versus defect modes

以上现象和模式的损耗密切相关。在本系统中,损耗主要来自于微腔两端的光学隧穿损失,局域化长度和模面积较小的模式,渗透到周围的能量更小,损耗较低,因此具有较小的阈值。相反,局域化长度和模面积较大的模式,渗透到周围的能量较多,损耗较高,因此具有较高的阈值。此外,增益介质和模式耦合也是影响阈值大小的因素。渗透到周围的能量较小的模式,意味着有更多的能量集中在微腔中。这导致模式和增益有更多的耦合,能够获得更多能

量,从而具有更低的阈值。

2.4 不同结构光子晶体的局域化长度

以上结果说明,局域化长度是决定模式激射阈值的关键参量。下面将计算不同结构光子晶体的局域化长度,分析结构参量对局域化长度的影响,以寻求降低模式阈值的途径。图8显示了光学厚度比对局域化长度的影响,横轴是波长对基频波长 λ_0 的比值,基频 $\lambda_0 = 2(h_1 n_1 + h_2 n_2)$ 。改变介质的光学厚度后,禁带结构也随之移动,本文主要研究了第一禁带的特性。图9显示了不同折射率下模式的局域化长度,横轴同样是波长对基频波长 λ_0 的比值,基频 $\lambda_0 = 2(h_1 n_1 + h_2 n_2)$ 。图8和图9中各图显示了类似的变化规律,即在一定的缺陷厚度下,局域化长度达到最小值,这一结果和图5的结果完全类似。但需要注意的是图8、图9中各图的差异也是明显的,显示出一些规律。从图8可以看出,当光学厚度比 $h_1 n_1 : h_2 n_2 = 1 : 1$ 时,局域化长度达到最小,光学厚度比增加后,局域化长度显著增加。从图9可以看出,折射率比增大后,局域化长度明显减小,但这种作用是有限的,进一步增大折射率比,局域化长度变化较小,趋于定值。以上结果说明介质参量决定局域化长度,优化介质参量可以有效地减少局域化长度,从而降低阈值。

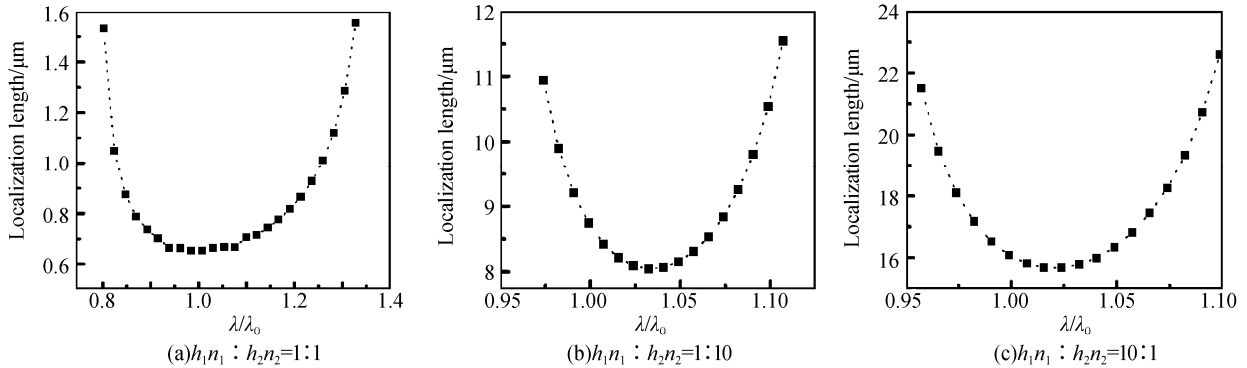


图8 不同光学厚度比下局域化长度与缺陷模波长的关系
Fig. 8 Localization length vs. normalized wavelength under different ratio of optical thickness

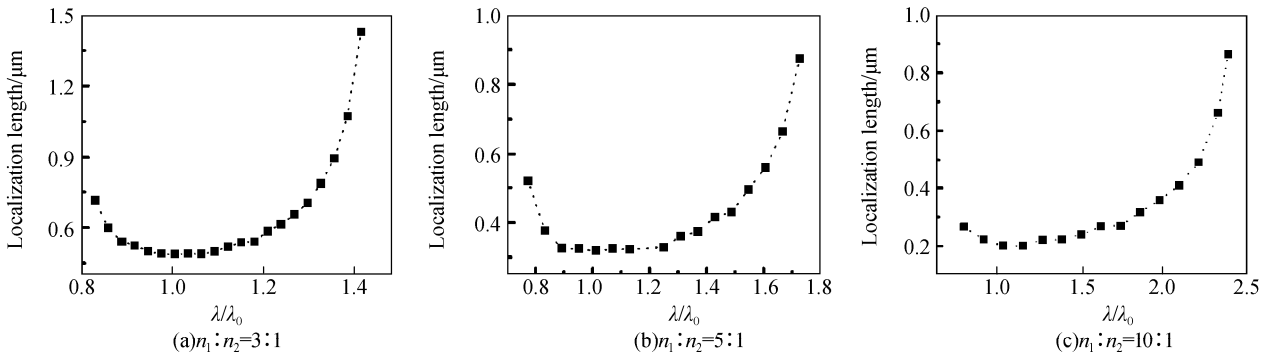


图9 不同折射率比下局域化长度与缺陷模波长的关系
Fig. 9 Localization length vs. normalized wavelength under different ratio of refractive index

3 结论

通过研究模式的空间分布,发现模式的空间分布影响激光的阈值特性. 模场局域化长度的不同将导致模式具有不同的损耗. 一些局域化长度较小、模面积较小的模式具有较小的阈值. 以上结果说明优化介质参量可以有效地减少局域化长度,从而降低阈值. 这些模拟结果对优化参量,降低激光器的阈值有指导作用.

参考文献

- [1] VATS N, JOHN S. Theory of fluorescence in photonic crystals [J]. *Phys Rev A*, 2002, **65**(4):043808-043820.
- [2] PASENOW B, REICHEL T, STROCKEN T, *et al.* Enhanced light-matter interaction in semiconductor heterostructures embedded in one-dimensional photonic crystals [J]. *Opt B*, 2005, **22**(9):2036-2048.
- [3] SCHERER H, GOLLUB D, KAMP M, *et al.* GaAs-based 1.3 mm microlasers with photonic crystal mirrors [J]. *J Vac Sci Technol B*, 2004, **22**(6):3344-3347.
- [4] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronic [J]. *Phys Rev Lett*, 1987, **58**(20):2059-2062.
- [5] LETARTRE X, MONAT C, SEASSAL C, *et al.* Analytical modeling and an experimental investigating of two-dimensional photonic crystal microlasers: defect state (microcavity) versus band-edge state (distributed feedback) structures [J]. *Opt B*, 2005, **22**(12):2581-2595.
- [6] KIM S H, RYU H Y, PARK H G, *et al.* Two-dimensional photonic crystal hexagonal waveguide ring laser [J]. *Appl Phys Lett*, 2002, **81**(14):2499-2501.
- [7] MAFOUANA R, REHSPRINGER J L, HIRLIMANN C, *et al.* Two-dimensional colloid-based photonic crystals for distributed feedback polymer lasers [J]. *Appl Phys Lett*, 2004, **85**(14):4278-4280.
- [8] KIM S K, LEE J H, KIM S H, *et al.* Photonic quasi crystal single-cell cavity mode [J]. *Appl Phys Lett*, 2005, **86**(3):031101-031103.
- [9] OUYANG Zhen-biao, YANG Lin-ling, XU Gui-wen, *et al.* Mode properties of one dimensional photonic crystals with defect [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2005, **16**(1):63-66.
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] FANG Yun-tuan, SHEN Ting-gen, TAN Xi-lin. Study on one-dimensional photonic crystal with impurity defects [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11):1557-1560.
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.
- [11] GU Guo-chang, LI Hong-qiang, CHEN Hong-tao, *et al.* Properties of light propagation in 1-D periodic dielectric structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(6):728-734.
顾国昌, 李宏强, 陈洪涛, 等. 一维光子晶体材料中的光学传输特性 [J]. *光学学报*, 2000, **20**(6):728-734.
- [12] PARK H G, HWANG J K, HUH J, *et al.* Nondegenerate monopole-mode two-dimensional photonic band gap laser [J]. *Appl Phys Lett*, 2001, **79**(19):3032-3034.
- [13] DONG Hai-xia, JIANG Hai-tao, YANG Cheng-quan, *et al.* Properties of impurity band in one-dimensional photonic crystal coupled-resonator containing defect layers with negative refractive index [J]. *Acta Phys Sin*, 2006, **55**(6):2777-2780.
董海霞, 江海涛, 杨成全, 等. 含双负缺陷的一维光子晶体耦合腔的杂质带特性 [J]. *物理学报*, 2006, **55**(6):2777-2780.
- [14] TAN Rong, LI Gao-xiang. Spontaneous emission properties of a two-level atom with an intense low-frequency field in a three-dimensional photonic crystal [J]. *Acta Phys Sin*, 2005, **54**(5):2059-2065.
谭荣, 李高翔. 低频强场作用下三维光子晶体中二能级原子的自发辐射性质 [J]. *物理学报*, 2005, **54**(5):2059-2065.
- [15] HUANG Xian-shan, YANG Ya-ping. Dynamic properties of atom embedded in photonic crystal [J]. *Acta Phys Sin*, 2005, **54**:4129-4139.
黄仙山, 羊亚平. 各向异性光子晶体中型原子动力学性质研究 [J]. *物理学报*, 2005, **54**(9):4129-4135.
- [16] CHEN Xian-feng, SHEN Xiao-ming, JIANG Mei-ping, *et al.* Studies on the defect mode properties of 1D photonic crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12):1876-1880.
陈宪锋, 沈小明, 蒋美萍, 等. 一维光子晶体的缺陷模特性研究 [J]. *光子学报*, 2005, **34**(12):1876-1880.
- [17] CHEN Ming, LI Chun-fei, XU Mai, *et al.* Optical switch and bistability based on nonlinear one-dimensional photonic crystals [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(1):99-101.
陈明, 李淳飞, 徐迈, 等. 非线性一维光子晶体光开关与光双稳 [J]. *光子学报*, 2005, **34**(1):99-101.
- [18] HUANG Xiao-qin, CUI Yi-ping. Analysis of nonlinear dispersive properties of one dimensional photonic crystals [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3):473-476.
黄晓琴, 崔一平. 一维光子晶体非线性色散特性的分析 [J]. *光子学报*, 2005, **34**(3):473-476.
- [19] AKAHANE Y, ASANO T, SONG B S, *et al.* High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal [J]. *Nature*, 2003, **425**(6961):944-947.
- [20] AKAHANE Y, ASANO T, SONG B S, *et al.* Fine-tuned high-Q photonic-crystal nanocavity [J]. *Optics Express*, 2005, **13**(4):1202-1214.
- [21] LALANNE P, MIAS 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):458-466.
- [22] VUCKOVIC J, PELTON M, SCHERER A, *et al.* Optimization of three-dimensional micro post microcavities for cavity quantum electrodynamics [J]. *Phys Rev A*, 2002, **66**(2):023808-023816.
- [23] BULGAKOV S A, VESPERINAS M N. Field distribution inside one-dimensional random photonic lattices [J]. *Opt A*, 1998, **15**(2):503-510.
- [24] JING X Y, SOUKOULIS C M. Time dependent theory for random lasers [J]. *Phys Rev Lett*, 2000, **85**(1):70-73.

[25] NAGRA A S, YORK R A. FDTD analysis of wave propagation in nonlinear absorbing and gain media[J]. *IEEE*

Transaction on Antennas and Propagation, 1998, **46**(3): 334-340.

Influence of Spatial Profile on Lasing Threshold of Defect Modes in a One-dimensional Photonic Crystal Laser

WANG Hong^{1,2}, OUYANG Zheng-biao¹, HAN Yan-ling^{3,4}, ZHONG Yuan-cong¹, RUAN Shuang-chen¹

(1 Center of THz Technology of Shenzhen University, College of Engineering and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

(2 University of Electronic Science and Technology of China, School of Physical Electronics, Chengdu 100718, China)

(3 Mathematics & Physics Department, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

(4 Institute for Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Received date: 2006-07-18

Abstract: The spatial profile and its influence on the lasing threshold of defect modes are investigated by use of the finite-difference time-domain (FDTD) method and the transfer matrix method (TMM) in a one-dimensional photonic crystal through the two effective parameters, the localization length and the mode area. The results indicate that the lasing threshold becomes lower if the localization length and mode area get smaller. The localization length and the mode area of defect modes can be effectively modified to decrease the lasing threshold by adjusting parameters such as the defect width, the ratio of optical thickness and the ratio of refractive index.

Key words: Laser physics; Photonic crystal laser; Spatial profile of mode; Finite-difference time-domain method (FDTD); Transfer matrix method (TMM)



WANG Hong was born in 1967. He received his Ph. D. from State Key Laboratory of Laser Technology at Huazhong University of Science and Technology in 2005. Now, he is a Postdoctor in University of Electronic Science and Technology of China and does his researching work in Center of THz Technology of Shenzhen University. His major research field is photonic crystals, coherent detection of THz, laser physics and micro-cavity.