

带有光子晶体波导的微型随机激光器研究

胡春海¹, 郭士亮¹, 李欣²

- (1. 燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004;
2. 哈尔滨工业大学 控制与仿真中心, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 文中采用有限时域差分(FDTD)法研究了ZnO 随机介质与光子晶体波导相结合的微型激光器的辐射特性和频谱特性,用平面波展开法分析了光子晶体能带特性。数值研究结果表明:由于光与随机介质相互作用,使得光在该微型激光器中放大,损耗减小,存在较长滞留时间,同时随机介质局域光的能力变强,激光的阈值降低,而且含四方格子结构光子晶体的激光器具有良好的激光特性和调制作用。该新型器件的设计与研究将为研制可嵌入集成光子芯片的、低阈值的微型激光器提供理论基础。

关键词: 随机激光器; 光子晶体波导; 局域性

中图分类号: TN252 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)06-1752-05

Study of micro-laser with photonic crystal waveguide

Hu Chunhai¹, Guo Shiliang¹, Li Xin²

- (1. Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;
2. Control and Simulation Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: The transmission and frequency characteristics of the micro-laser with photonic crystal waveguide were analyzed in this paper based on the finite-difference-domain (FDTD) method. The results demonstrate that, compared with the pure random media or pure photonic crystal waveguide, the light in defect area with random media is obviously amplified, meanwhile the localization level becomes higher either. On the other hand, the interaction time between the random gain medium is prolonged, the loss and the threshold is reduced. In addition, the light can be modulated by the triangle lattice photonic crystal. The design of new device in this paper lay a theoretical foundation of integrated optical system and micro-laser with low threshold.

Key words: random laser; photonic crystal waveguide; localization

收稿日期: 2014-10-07; 修订日期: 2014-11-09

基金项目: 国家自然科学基金(61107039, 61172044)

作者简介: 胡春海(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光电检测和模式识别方面的研究。Email: fred-hu@ysu.edu.cn

0 引言

自从1967年,俄罗斯科学家 Letokhov 通过科学计算首次提出随机增益介质中存在受激辐射现象后,随机激光的研究引起了人们的广泛关注^[1-4]。但由于自发辐射的存在,目前随机激光器的阈值还比较高,离实用还有很大的差距。为了降低阈值,美国西北大学的 H.cao 研究组提出了在一维周期性系统中引入无序介质时,系统的局域化程度有所提高,阈值也明显变小^[5]。即把某种有序度与随机介质相结合,系统的性质将发生很大的变化。D.S.Wiesma 等人将染料分子加入到液晶中,得到了温度控制的随机激光器^[6]。这种随机激光器可以通过改变温度来控制其阈值的大小和输出谱线宽。参考文献[7]中通过实验验证了当粒子的平均自由程和吸收长度存在一个最佳组合,使随机激光阈值达到最小值。参考文献[8]中则得出随机激光器中准态腔的阈值与其局域化程度的关系:局域化强的准态腔,其空间分布区域较小,相应的阈值就较低;局域化弱的准态腔,其空间分布区域相对较大,相应的阈值就较高。

光子晶体是一种具有光子频率禁带的特殊材料和结构。在二维光子晶体中引入缺陷,对原有的空间对称性产生微扰,形成一个具有自身谐振频率的微腔^[9-11],以此为基础的半导体激光器具有品质因数高、体积小、低损耗等特性^[12-13]可以实现光通信器件的集成化、微型化。如果能将具有有序特性光子晶体波导与随机介质相结合,充分利用其各自特点,可以很大程度改善随机激光器和光子晶体波导的性能。

鉴于以上分析,文中设计了 ZnO 随机介质与光子晶体波导相结合的模式。分析了光与随机介质的相互作用,对比了光在加入随机介质前后的光子晶体波导中的传输特性,并且采用平面波展开法研究了光子晶体的排列结构的不同对系统的影响。结果显示该结构的优越性,为制备可嵌入到集成光路中的、低成本微型激光器提供了新的途径。

1 光子晶体波导的光场分布

为了对比加入 ZnO 随机介质前后光子晶体波导的辐射特性,研究过程中首先预设了晶粒大小为 $0.3 \mu\text{m}$,折射率为 1.45 的光子晶体波导,其结构如

图1所示。文中采用 FDTD^[14-15]方法和 PML 吸收边界条件求解二维随机增益介质 Maxwell 矢量方程,得到新型激光器系统的有关特性。系统的 Maxwell 方程为:

$$\partial E_z / \partial x = \mu \partial H_y / \partial t \quad (1)$$

$$\partial E_z / \partial y = \mu \partial H_x / \partial t \quad (2)$$

$$\partial H_y / \partial x - \partial H_x / \partial y = \varepsilon(r) \partial E_z / \partial t \quad (3)$$

设在介质的 x 和 y 方向上的空间步长分别是 $\Delta x, \Delta y$, 时间步长为 Δt , 考虑到系统的开放性,采用完全匹配层(perfectly matched layers, PML)吸收边界的方式进行计算。TM 模的 FDTD 的基本方程为:

$$H_x|_{i,j}^{n+1/2} = H_x|_{i,j}^{n-1/2} - \frac{\Delta t}{\mu} \left(\frac{E_z|_{i,j+1/2}^n - E_z|_{i,j-1/2}^n}{\Delta x} \right) \quad (4)$$

$$H_y|_{i,j}^{n+1/2} = H_y|_{i,j}^{n-1/2} - \frac{\Delta t}{\mu} \left(\frac{E_z|_{i+1/2,j}^n - E_z|_{i-1/2,j}^n}{\Delta x} \right) \quad (5)$$

$$E_z|_{i,j}^{n+1/2} = E_z|_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j}} \left(\frac{H_x|_{i,j+1/2}^{n+1/2} - H_x|_{i,j-1/2}^{n+1/2}}{\Delta y} - \frac{H_y|_{i+1/2,j}^{n+1/2} - H_y|_{i-1/2,j}^{n+1/2}}{\Delta x} \right) \quad (6)$$

取空间步长为 $\Delta x = \Delta y = 0.01 \mu\text{m}$, 时间步长约为 $2.3 \times 10^{-17} \text{s}$, 并在介质中心位置处引入一束波长为 $380 \mu\text{m}$ 时域高斯脉冲的光作为激发源。

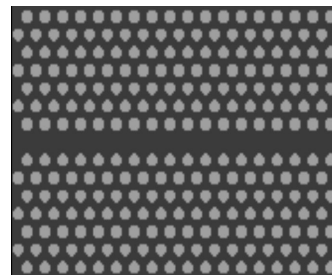


图1 光子晶体波导模型示意图

Fig.1 A model of photonic crystal waveguide

首先分析下光子晶体波导的传输特性,模拟图1系统 5 000 步、10 000 步时结果分别如图 2(a)、(b)所示。从图中可以看出入射光被限制在光子晶体的线缺陷中,而且光子晶体波导的整体光强都较小,5000步时,光场的最高强度为 4.56 a.u.,并且随着时间延长,光强减小的很快,局域化程度降低。当系统运行到 10 000 步时,最高强度仅为 $1.2 \times 10^{-2} \text{a.u.}$ 。说明该光子晶体波导系统局域光的能力有限,光在短时间内消散的快、模式不稳定,传输效率不高,而这种较弱

的局域模式不能形成相干反馈，固不能被激发而辐射激光。

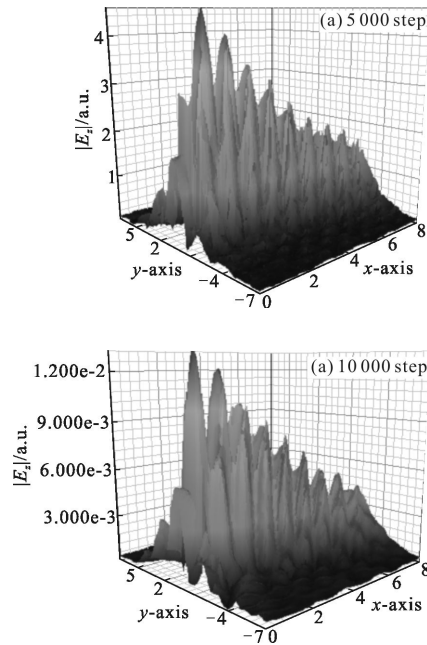


图 2 光子晶体波导光场能量空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of photonic crystal waveguide

2 新型随机激光器的辐射特性

2.1 随机激光器的光场分布

为了深入研究随机激光器的辐射特性，文中提出了 ZnO 随机介质与光子晶体波导相结合的新型激光器。由于 ZnO 材料具有较宽的禁带和较大的激子束缚能力，在纳米结构上呈现多样性和易控性，是一种理想的随机激光器材料。文中列举了由三角格子和四方格子两种不同结构类型的光子晶体构成的激光器，其结构如图 3 所示。其中光子晶体晶粒大小为 $0.3 \mu\text{m}$ ，折射率为 1.45；随机介质材质为 ZnO，折射率实部取为 2.3，虚部取 -1.235 ，基质材料折射率为 1，填充率取 56%。

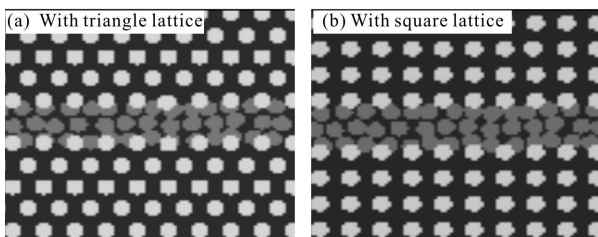
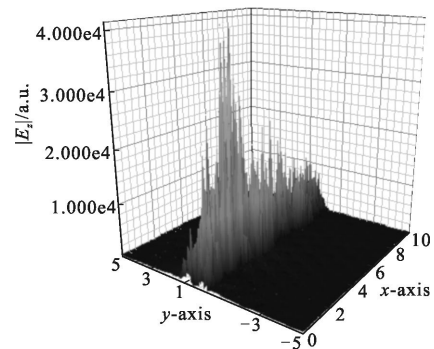


图 3 二维微型激光器结构图

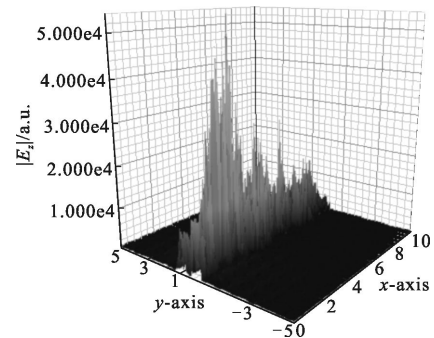
Fig.3 Structure of two-dimensional micro-laser

模拟图 3 中系统 10 000 步的光场能量分布如图 4 所示。结果表明：把随机增益介质引入光子晶体的线缺陷中，使得其光场强度比光子晶体波导和只含随机介质的激光器都高，出现比图 2 中更窄的尖峰，并且光子晶体含四方格子型光子晶体的微型激光器光场强度更高。结果表明光子晶体波导对通过随机介质的光起到很大的局域作用，光在该微型激光器中更集中，能量有效得被集中在光子晶体线缺陷中，并且长时间不会减弱，激光器阈值也随之降低。



(a) 三角格光子晶体

(a) With triangle lattice



(b) 四方格光子晶体

(b) With square lattice

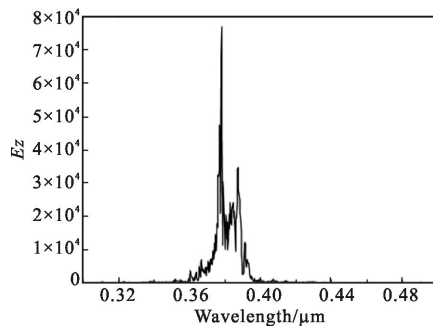
图 4 微型激光器光场强度

Fig.4 Spatial distribution of micro-laser

2.2 随机介质频谱分析

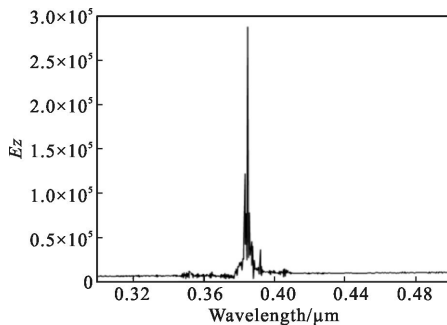
为了进一步研究含随机介质的两种结构光子晶体波导特性，对图 3 中两种激光器系统分别进行了频谱分析，模拟了在 1 000 步时系统的频谱图，如图 5 所示。图 5(a)中，在 $0.34 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 附近出现了多个谱峰，在 $0.38 \mu\text{m}$ 附近出现了较强峰值，强度约为 $7.75 \times 10^4 \text{ a.u.}$ 。图 5(b)中，尖峰的个数明显减少，在 $0.382 \mu\text{m}$ 附近出现了最强峰值，强度约为 $2.73 \times$

10^5 a.u., 这一结果说明光子晶体波导加入随机介质后,不仅增强了系统的局域能力,而且提高了系统的增益,从而出现了激光现象。这种现象表明在随机激光的模式竞争中,随着时间的增长,不稳定的模式被淘汰,稳定的、寿命长的模式保留下来形成了随机激光。图5中可以看出,四方格光子晶体的微型激光器中,光在含随机介质的光子晶体波导中局域性更强,更稳定,而且光与随机介质的相互作用使得光放大效果明显,从而降低了激光器阈值。



(a) 三角格光子晶体的微型激光器频谱图

(a) Frequency character of micro-laser with triangle lattice



(b) 四方格光子晶体的微型激光器频谱图

(b) Frequency character of micro-laser with square lattice

图5 随机介质频谱图

Fig.5 Frequency character of micro-laser

2.3 光子晶体波导的能带分析

由于光子晶体的有序性能够导致光子禁带的出现,而随机介质的随机性会导致光子局域化的形成。如果把随机介质与光子晶体结合起来,使之既能发挥光子禁带的作用,又能利用局域化特点。光子晶体的调制作用和光子晶体的带隙是紧密相关的,因此文中用平面波展开法计算了以上四角晶格光子晶体对应的能带结构,如图6所示。由图中可以看出含四方格子的激光器在频率 $0.364\ 363\sim 0.430\ 097$ 存在禁带。说明所选择的微型激光器中,含四方晶格的激光

器具有一定的调制作用,可以用作光的通信器件。

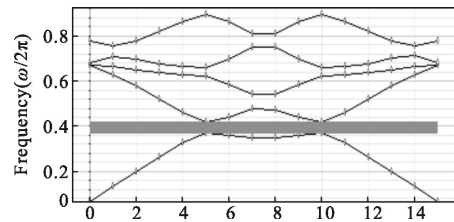


图6 四方格光子晶体对应的光子晶体能带图

Fig.6 Band-gap of micro-laser with square lattice

3 结论

采用时域有限差分法分析了含光子晶体波导的随机激光器的辐射特性,并且研究了光子晶体的排列顺序对随机激光器的影响。结果表明:光子晶体波导中,光在光子晶体的微腔中光强较小,且光寿命短。而随着随机介质的加入,不仅使系统局域光的能力得到了明显的增强,而且加强了光与随机介质的相互作用,从而提高了系统的增益,因此利用该微型激光器能明显地降低激光的阈值;含四方格子型光子晶体的微型激光器频谱存在更陡峭的尖峰、激光阈值更低,并且含有较大范围的禁带,具有一定调制作用,在光通信以及高精度光学仪器的设计中有着重要的应用前景。

参考文献:

- [1] Lethokove V S. Light generation by a scattering medium with a negative resonant absorption[J]. *Soviet Physics-JETP*, 1968, 16: 835-40.
- [2] Chen Lei, Lou Qihong, Wang Zhijiang. Optical amplification in the random gain media [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(9): 1409-1422. (in Chinese)
陈雷, 楼祺洪, 王之江. 光在随机增益介质中的放大[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(9): 1409-1422.
- [3] Babin S A, El-Taher A E, Harper P, et al. Tunable random fiber laser[J]. *Physical Review A*, 2011, 84: 021805.
- [4] Lizarraga N, Puente N P, Chaikina E I, et al. Single-mode Er-doped fiber random laser with distributed Bragg grating feedback[J]. *Optics Express*, 2009, 17: 395-404.
- [5] Chang S H, Cao H, Ho S T. Cavity formation and light propagation in partially ordered and completely random one-dimensional systems [J]. *IEEE. Quantum Electron*, 2003, 39(2): 364-374.

- [6] Wiersma D S, Lagendijk A. Light diffusion with gain and random lasers[J]. *Phys Rev E*, 1996, 54: 4256–4261.
- [7] Noginov M A, Novak J, Grigsby D, et al. Optimization of the transport mean free path and the absorption length in random lasers with non-resonant feedback[J]. *Optical Society of America*, 2005, 13(22): 8829–8836.
- [8] Liu Jinsong, Wang Hong. Influence of spatial localization on the threshold of quasi_state cavities in random lasers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53(12): 4224–4228. (in Chinese)
刘劲松, 王宏. 随机激光器中准态腔的阈值与其局域化程度的关系[J]. *物理学报*, 2004, 53(12): 4224–4228.
- [9] Johnson S G, Povinelli M L, Soljacic M, et al. Roughness losses and volume-current methods in photonic-crystal waveguides[J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2005, 81(2–3): 283–293.
- [10] Thomas F Krauss, Richard M De La Rue. Photonic crystals in the optical regime—past, present and future[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 1999, 23(2): 51–96.
- [11] Feng Ruijuan, Lou Shuqin, Lu Wenliang, et al. Ultra-short polarization splitter based on dual-elliptical-core photonic crystal fiber [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 506–510. (in Chinese)
冯睿娟, 娄淑琴, 鹿文亮, 等. 超短双芯光子晶体光纤偏光分束器 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(2): 506–510.
- [12] Fang Yuntuan, Shen Tinggen. Three absolute photonic gaps from 2D square compound lattices [J]. *Cryst Res Technol*, 2004, 39(5): 434–438.
- [13] Simsek S, Mamedov A M, Ozbay E. Two-dimensional ferroelectric photonic crystals: optics and band structure [J]. *Ferroelectrics*, 2013, 448(1): 23–28.
- [14] Al-Jabr A A, Alsunaidi M A, Ng T, et al. A simple FDTD algorithm for simulating EM-wave propagation in general dispersive anisotropic material [J]. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 2013, 61(3): 1321–1326.
- [15] Xu Jianfeng, Bo Zhongyang, Bai Jian, et al. Synthetic subdomain method for large-scale integrated optical waveguides FDTD simulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(1): 5–9. (in Chinese)
徐建峰, 薄中阳, 白剑, 等. 大规模集成光波导时域有限元差分法仿真的子域合成法 [J]. *光学学报*, 2007, 27(1): 5–9.