

# 含随机介质的光子晶体波导特性

李欣<sup>1</sup> 杨明<sup>1</sup> 郭士亮<sup>2</sup> 李志全<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>哈尔滨工业大学控制与仿真中心, 黑龙江 哈尔滨 150080)  
<sup>2</sup>燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004

**摘要** 提出了一种光子晶体波导与随机介质相结合的特殊型波导的设计方法。基于光子晶体波导模型,建立了 ZnO 随机介质作为线缺陷的光子晶体波导模型,采用时域有限差分(FDTD)法分析了 ZnO 随机介质的加入对光子晶体波导系统的频率特性、时域特性及增益特性的影响,并且与纯随机介质系统和含有线缺陷的光子晶体波导系统进行对比。分析结果表明,当在光子晶体波导的缺陷层引入 ZnO 随机介质时,随机介质使得光在缺陷处振荡并得到放大,局域化程度比纯随机介质系统和纯光子晶体波导系统更高;且光与随机介质的相互作用使得光在波导中时间延长,激光阈值降低。这种光子晶体波导可用于制备可嵌入到集成光路领域和低阈值的微型激光器。

**关键词** 材料;光子晶体波导;随机介质;时域有限差分法;局域态

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1006001

## Characteristics of Photonic-Crystal Waveguides with Random Media

Li Xin<sup>1</sup> Yang Ming<sup>1</sup> Guo Shiliang<sup>2</sup> Li Zhiquan<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Control and Simulation Center, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China)  
<sup>2</sup>Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

**Abstract** A special type of waveguides consisting of photonic crystal waveguide and random media is investigated. Based on the photonic crystal waveguide model, a new kind of photonic crystal waveguides with random media is put forward. In this paper, by employing the finite-difference time-domain (FDTD) method, the influences of the embedded ZnO random particles on the frequency, time-domain, gain characteristics of photonic crystal waveguide are studied. The simulation results demonstrate that in the present of random media in the defect layer of photonic crystal, the light in the defect area is obviously amplified, and the localization level is higher than the pure random media and photonic crystal waveguide, respectively. In addition, the interaction time between the random gain medium and the light is lengthened and the threshold is reduced. The waveguide can be used in the field of integrated optical system and microlaser with low threshold.

**Key words** materials; photonic crystal waveguide; random medium; finite-difference time-domain; localization

**OCIS codes** 160.5298; 230.3990; 140.3380

## 1 引 言

近年来,利用二维光子晶体制作各种光子晶体器件的研究受到了人们的广泛关注<sup>[1~3]</sup>。由于具有周期特性和有序特性的光子晶体存在“光子带隙”,任何频率的光无法在带隙中传输。如果在光子晶体

中引入缺陷,打破原有的对称性,电磁波局限在缺陷内传播,便可形成波导,并获得非常窄的透过频带和极低的透过损耗<sup>[4,5]</sup>,因此光子晶体波导的设计与研究是一项具有特殊意义的工作。

20 世纪 60 年代,由俄罗斯科学家 Letokhov<sup>[6]</sup>

**收稿日期**: 2012-05-10; **收到修改稿日期**: 2012-06-26

**基金项目**: 国家自然科学基金(61172044)和河北省自然科学基金(F2010002002)资助课题。

**作者简介**: 李欣(1985—),女,博士研究生,主要从事光纤传感及非线性光电检测等方面的研究。

E-mail: lixinapple100@sina.com

**导师简介**: 杨明(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事仿真系统可信度评估、飞行器制导控制等方面的研究。

E-mail: myang@hit.edu.cn

通过科学计算首次提出与具有有序性特性的光子晶体截然相反的无序随机介质中可能存在受激辐射现象。随机激光器<sup>[7~11]</sup>是利用随机介质受激辐射构成的激光器,光子在无序介质中产生多重散射,从而实现光放大。基于随机激光阈值较高、实用性较差等问题,许多学者做出了理论和实验的研究。Chang 等<sup>[10]</sup>提出了在一维周期性系统中引入无序介质时,通过有序介质与无序介质相互作用,局域化程度有所提高,阈值也明显降低。文献[11]中则在光子晶体光纤纤芯中注入 TiO<sub>2</sub> 粒子,使得随机介质的自发辐射降低,减少了能量损耗,从而改善了激光器性能。而光子晶体波导本身就具有局域性和周期性的特点,如果能将光子晶体波导与随机介质相结合,充分利用各自特点,不但能够提高器件性能,而且将为制备一种低阈值微型激光器提供理论模型。

本文设计了在光子晶体波导线缺陷中引入 ZnO 随机介质的二维系统。分析了光子晶体与随机介质的相互作用结果,并对比了随机系统、加入随机介质前后系统的传输特性,从而得出系统的特性,设计的系统为研制可嵌入集成光路中的低阈值微型激光器提供了新的途径。

## 2 二维随机介质、光子晶体波导模型

为了深入研究光子晶体与随机介质之间的相互作用,给出了如图 1 所示的二维随机介质结构图。根据相关文献的实验参数<sup>[12]</sup>,随机散射粒子的正折射率取 2.3(ZnO),负折射率取 -1.235,基质材料为空气。ZnO 材料具有较宽的禁带(3.37 eV)和较大的激子束缚能(60 meV),是一种理想的室温紫外发光材料,在纳米结构上呈现多样性和易控性,现已广泛用于各种激光器结构中<sup>[13]</sup>。

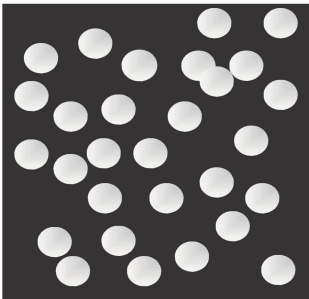


图 1 随机介质结构图

Fig. 1 Model of 2D random media

采用时域有限差分(FDTD)<sup>[14]</sup>方法和完全匹配层(PML)吸收边界条件求解二维随机增益介质麦

克斯韦矢量方程组,得到了 TM 模的有关特性。二维随机介质的麦克斯韦方程组为

$$\nabla \times \mathbf{E}(r, t) = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}(r, t)}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(r, t) = \varepsilon(r) \frac{\partial \mathbf{E}(r, t)}{\partial t}, \quad (2)$$

式中  $\varepsilon(r)$  为介电常数,  $\mu$  为磁导率。若只考虑 TM 模,即  $\mathbf{E}$  与  $z$  轴平行,则电磁分量为  $(0, 0, E_z), (H_x, H_y, 0)$ , 此时麦克斯韦方程组的分量形式为

$$\partial E_z / \partial x = \mu \partial H_y / \partial t, \quad (3)$$

$$\partial E_z / \partial y = \mu \partial H_x / \partial t, \quad (4)$$

$$\partial H_y / \partial x - \partial H_x / \partial y = \varepsilon(r) \partial E_z / \partial t. \quad (5)$$

在给定的边界条件下, TM 模的 FDTD 基本方程为

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

$$H_y |_{i,j}^{n+1/2} = H_y |_{i,j}^{n-1/2} - \frac{\Delta t}{\mu} \left( \frac{E_z |_{i+1/2,j}^n - E_z |_{i-1/2,j}^n}{\Delta x} \right), \quad (7)$$

$$E_z |_{i,j}^{n+1/2} = E_z |_{i,j}^n + \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j}} \left( \frac{H_x |_{i,j+1/2}^{n+1/2} - H_x |_{i,j-1/2}^{n+1/2} - H_y |_{i+1/2,j}^{n+1/2} + H_y |_{i-1/2,j}^{n+1/2}}{\Delta x} \right). \quad (8)$$

由于 FDTD 法对麦克斯韦矢量方程组直接离散,在数值计算过程中保持了光波的相位关系,可以反映光波的干涉特性,因而在光波局域化方面存在了较好的优越性。采用 FDTD 法研究纯 ZnO 无序介质的光场空间分布,取  $4 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$  的 ZnO 二维随机介质,空间步长为  $\Delta x = \Delta y = 0.01 \mu\text{m}$ ,时间步长约为  $2.3 \times 10^{-17} \text{s}$ ,填充率取 40%,并在不同介质中心位置处引入同一束时域高斯脉冲的 TM 模偏振光作为激发源。模拟系统 5000 步、10000 步时结果分别如图 2(a)、(b)所示。由图 2 可知, ZnO 无序介质的整体光强都较小,当系统运行到 10000 步时,光强更小,说明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。而随机介质中存在许多准态模,各自具有不同的空间局域化特征。局域化程度越弱的准态模,获得的增益越小,阈值越高<sup>[15]</sup>。

在二维光子晶体中引入线缺陷,即在带隙中引入缺陷模,意味着在晶体的特定方向上,具有缺陷模频率的光能通过光子晶体,形成光子晶体波导,其结构和光场分布如图 3 所示。其中光子晶体晶粒尺寸均为  $0.3 \mu\text{m}$ ,折射率为 1.45,光子晶体中的材料均为非增益介质材料,基质材料为空气,入射光源取与

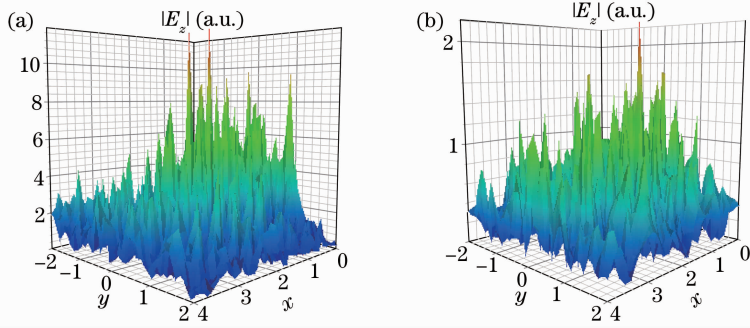


图2 随机介质对应不同时间步的光场能量空间分布图。(a) 5000步;(b) 10000步

Fig. 2 Spatial distributions of random media at different steps. (a) 5000 step; (b) 10000 step

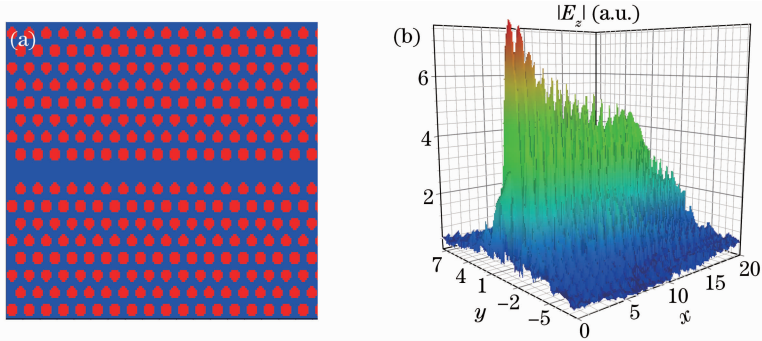


图3 (a)光子晶体波导模型示意图与其对应的(b)光场能量空间分布图

Fig. 3 (a) Model of photonic crystal waveguide and (b) spatial distribution of photonic crystal waveguide

激发随机介质完全相同的高斯脉冲光。由图3可知,光是沿线缺陷区域传播的,但是输出强度与光源附近强度相比较低,最高强度仅为6.85(a.u.),损耗较大,信号远距离传输效率不高。

域,阈值也相应降低。该结果与Cao理论<sup>[10]</sup>吻合得很好,同时表明了本文算法的正确性与可行性。由此可见选择合适的随机介质,能够使光与介质有更强的相互作用,使得光在线缺陷区域进行放大。

### 3 引入随机介质的二维光子晶体波导结构及分析

为了研究不同尺寸随机介质与光子晶体波导组合后系统的传输特性,先将第2节中的随机介质加入到同一光子晶体波导薄膜层中,在同样的条件下分析其光场分布情况。图4所示为该系统结构图。为了与纯随机介质结构和光子晶体波导结构进行有效对比,取 $10\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$ 的含ZnO随机介质光子晶体波导,光子晶体晶粒尺寸仍为 $0.3\ \mu\text{m}$ ,ZnO随机介质尺寸约为 $0.1\ \mu\text{m}$ ,采用同样的高斯脉冲光束,对该系统进行激发,通过模拟获得了系统不同时间步的光场分布图,如图5所示。由图5可知,虽然光子晶体是相同的,中间加入随机介质后,结果却大为不同。图5(a)、(b)中光场能量均比图2和图3中的强度有了明显的增大。尤其是图5(b)中,光场能量比纯随机介质结构图2和光子晶体线缺陷结构图3中高出几百倍,能量有效地局域在随机介质区

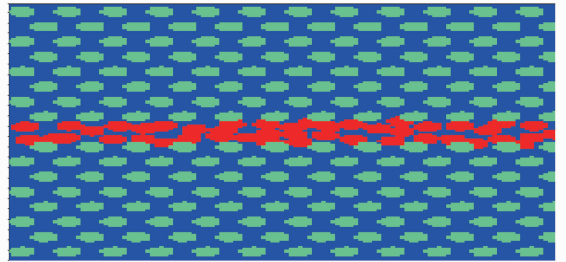


图4 含随机介质的光子晶体波导结构图

Fig. 4 Model of photonic crystal waveguide with random media

为了更好地比较加入随机介质前后系统能量随时间的变化规律,用上述激发源分别激发如图3与图4所示的等面积的二维介质。分别取 $a(4.4, 0.1)$ 和 $b(6.2, 0.4)$ 为观察点,经过了5000步的计算,截取了 $0\sim 800\ \text{fs}$ 时间范围两结构中的电场能量随时间的变化图,如图6所示。结果表明,在光子晶体波导中,能量衰减得较快[见图6(a)];而在含ZnO随机介质的光子晶体波导中,能量在脉冲光束激发后初期因向外扩散传播而衰减,经过一定时间

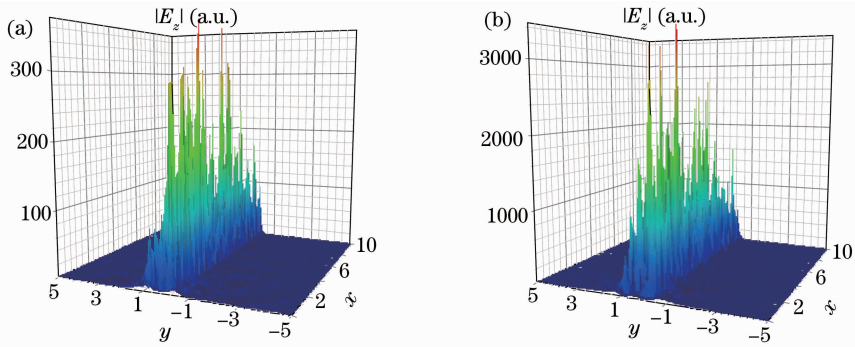


图 5 含随机介质的光子晶体波导不同时间对应的光场能量的空间分布图。(a) 5000 步;(b) 10000 步

Fig. 5 Spatial distributions of photonic crystal waveguide with random media at different steps.

(a) 5000 step; (b) 10000 step

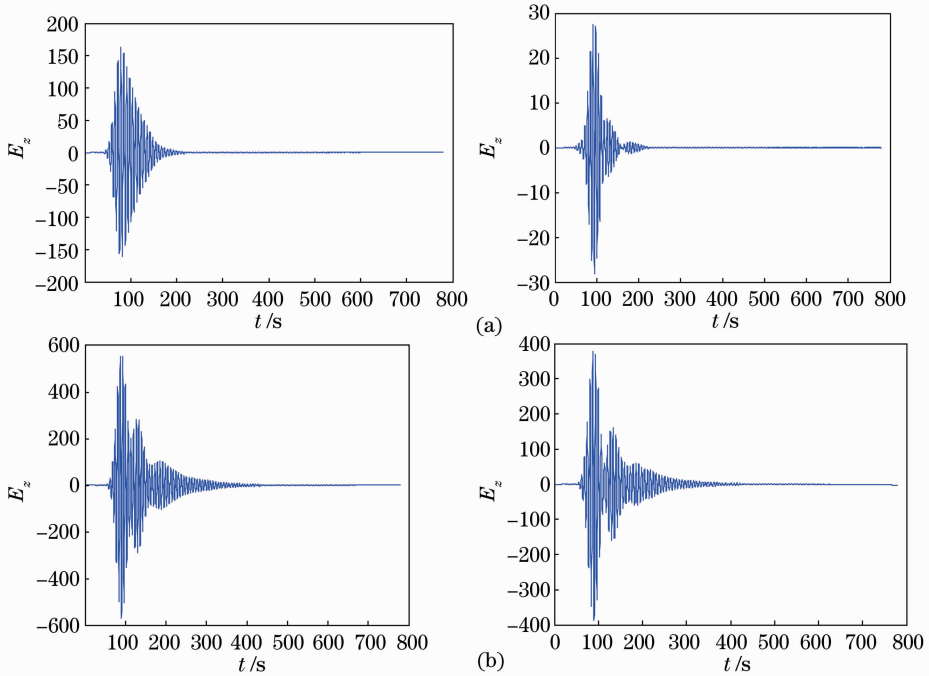


图 6 光子晶体波导与含随机介质的光子晶体波导时域图。(a)光子晶体波导中  $a$  点与  $b$  点时域图;

(b)含随机介质的光子晶体  $a$  点与  $b$  点时域图

Fig. 6 Time-domain curves of photonic crystal waveguide with random media. (a) Time-domain curves of photonic crystal waveguide at observation point  $a$  and  $b$ ; (b) time-domain curves of random media at observation point  $a$  and  $b$

后两点的能量衰减变得缓慢,持续的时间较长[见图 6(b)]。

为了进一步研究含随机介质的光子晶体波导的频谱特性,对上述系统分别在 5000 步,10000 步和 15000 步时的频谱特性进行了仿真,结果如图 7 所示。由图 7(a)可知,5000 步仿真时,在  $0.3 \mu\text{m}$  附近出现了尖峰,该谱峰是由随机介质谐振腔产生;在  $1.7 \mu\text{m}$ 附近产生来自光子晶体谐振腔比较宽的谱峰,说明随机介质和光子晶体的谐振腔同时存在。由图 7(b)可知,10000 步仿真时,在  $0.3 \mu\text{m}$  附近,由于随机增益介质的存在,出现了较强的谱峰,最大强度达到  $5.45 \times 10^3$  (a. u.),而由光子晶体谐振腔

产生的谱峰消失。这一现象与随机激光中的模式竞争类似,不稳定的模式随时间延长被淘汰,衰减寿命较长的模式保留下来。图 7(c)和(b)频谱形状相似,只存在由随机增益介质产生的尖峰,但是强度明显增强,最大强度达到  $1.97 \times 10^{13}$  (a. u.),光与增益介质之间的相互作用增强。以上结果与文献[9]中实验结果相似,即随机介质加入到有序性的、周期性的系统中,其自发辐射减弱,激光特性更明显。然而比较纯随机介质中光的能量随时间延长而逐步衰减,光在随机介质作为线缺陷的光子晶体波导中模式寿命延长,更稳定,而且光与 ZnO 随机介质相互作用后光的放大效果显著,阈值也有所降低。



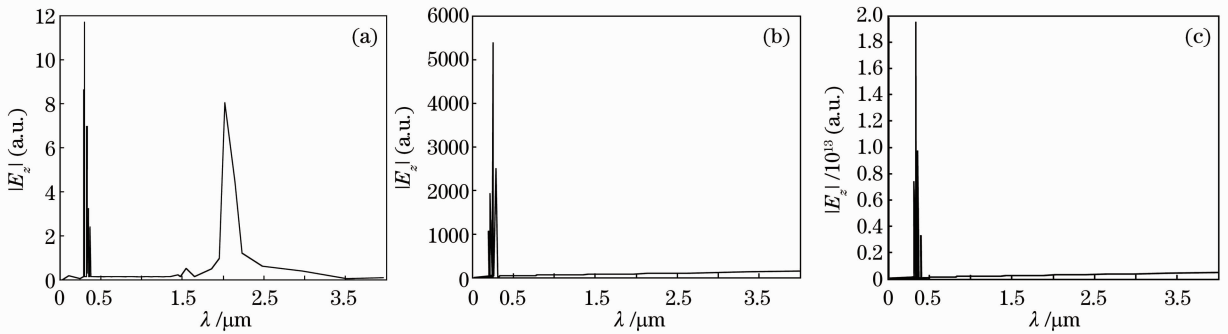


图7 含随机介质的光子晶体波导频谱图。(a) 5000步;(b) 10000步;(c) 15000步

Fig.7 Spectra of photonic crystal waveguide with random media at different steps. (a) 5000 step;

(b) 10000 step; (c) 15000 step

## 4 结 论

采用时域有限差分法分析了随机介质和光子晶体的辐射特性,并且对含有随机介质的光子晶体波导的传输特性进行了深入研究。结果表明,纯随机系统中光强较小,并且短时间内消散得快。含线缺陷的光子晶体波导中,光只在线缺陷区域传输,光强也较小。而随机介质加入到光子晶体波导中后,光在光子晶体缺陷层得到了明显放大,局域化更明显,模式稳定,系统的阈值明显降低。并且在系统中,光与增益介质的相互作用增强,系统中的能量不会短时间消散,可形成模式稳定的光子晶体波导。设计的系统为低阈值集成系统光源的研究提供了新途径。

## 参 考 文 献

- 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  
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
- Song Litao, He Jie, Wang Hualei *et al.*. Optical performance of photonic crystal filter with liquid crystal layer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2834~2837  
宋立涛, 何杰, 王华磊 等. 液晶缺陷光子晶体滤波器的光学特性[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2834~2837
- S. G. Johnson, M. L. Povinelli, M. Soljacic *et al.*. Roughness losses and volume-current methods in photonic-crystal waveguides [J]. *Appl. Phys. B: Lasers and Opt.*, 2005, **81**(2-3): 283~293
- T. F. Krauss, R. M. de La Rue. Photonic crystals in the optical regime—past, present and future [J]. *Progress in Quantum Electron.*, 1999, **23**(2): 51~96
- Y. T. Fang, T. G. Shen. Three absolute photonic gaps from 2D square compound lattices [J]. *Cryst. Res. Technol.*, 2004, **39**(5): 434~438
- V. S. Letokhov. Generation of lasing a scattering medium with negative resonance absorption [J]. *Sov. Phys.*, 1968, **26**(5): 835~837
- H. Cao, Y. G. Zhao, S. T. Ho *et al.*. Random laser action in semiconductor powder [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **82**(11): 2278~2281
- H. Cao, J. Y. Xu, D. Z. Zhang *et al.*. Spatial confinement of laser light in active random media [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(2): 5584~5587
- Ye Yunxia, Fan Dianyuan. Incoherent radiation of amplifying random media [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 364~369  
叶云霞, 范滇元. 增益随机散射介质中的非相干辐射 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 364~369
- S. H. Chang, H. Cao, S. T. Ho. Cavity formation and light propagation in partially ordered and completely random one-dimensional systems [J]. *IEEE Quantum Electron.*, 2003, **39**(2): 364~374
- C. J. S. de Matos, L. de S. Menezes, A. M. Brito-Silva *et al.*. Random fiber laser [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, **99**(15): 153903
- H. Cao, J. Y. Xu, S. H. Chang *et al.*. Transition from amplified spontaneous emission to laser action in strongly scattering media [J]. *Phys. Rev. E*, 2000, **61**(2): 1985~1989
- Chen Lei, Lou Qihong, Wang Zhijiang. Random lasing in ZnO nanoparticles [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(2): 920~922  
陈雷, 楼祺洪, 王之江. 纳米 ZnO 粉末中的随机激光现象 [J]. *物理学报*, 2006, **55**(2): 920~922
- 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  
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
- 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  
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