

# 二维非球形粒子随机介质中光场的传输特性

李志全<sup>1</sup> 郑 莎<sup>1\*</sup> 牛力勇<sup>1</sup> 李文超<sup>2</sup> 孙宇超<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004  
<sup>2</sup>东北大学秦皇岛分校自动化系, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要** 研究了散射粒子形状改变对光波在二维随机介质系统中的传输情况的影响。基于整体散射效应模型,建立了非球形粒子作为散射粒子的二维随机介质的模型。构建了模型的 Maxwell 方程,采用非均匀网格划分的时域有限差分(FDTD)方法解 Maxwell 方程,得到了 TM 模在非球形粒子二维随机介质模型中的传输及空间分布。采用快速傅里叶变换(FFT)对仿真获得的数据进行频谱变换,得到光波在频域上的发射谱。与以往的研究相比较,仿真结果表明,在非球形粒子系统中,光波的电场强度与球形粒子系统中电场强度随着散射粒子浓度的增加而增加不同,而是出现振荡的现象;发射谱显示,非球形粒子系统的模式竞争强于球形粒子系统,更易于实现模式选择。

**关键词** 激光物理;随机介质;散射粒子形状;时域有限差分法;局域化

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0302007

## Transmission Characteristics of Optical Field in 2D Random Medium of Non-Spherical Particles

Li Zhiquan<sup>1</sup> Zheng Sha<sup>1</sup> Niu Liyong<sup>1</sup> Li Wenchao<sup>2</sup> Sun Yuchao<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China  
<sup>2</sup>Department of Automation, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

**Abstract** Transmission characteristics of optical field in 2D random medium of non-spherical particles are studied. Based on the overall scattering effect, a two-dimensional random media model of non-spherical particles as scattering particle is established. The Maxwell equations for the model are built. Using non-uniform mesh finite different time domain (FDTD) method to solve Maxwell's equations, the transmission and spatial distribution of TM mode in the two-dimensional random medium model of non-spherical particles has been achieved. Using the data obtained from simulation, light emission spectrum in frequency domain is calculated by fast Fourier transform (FFT). Compared with previous studies, the results show that in the non-spherical particle systems, the light intensity is different from the intensity in spherical particle systems which increases with the concentration of scattering particles increasing, and it is of oscillation. The emission spectrum shows mode competitions in non-spherical particles systems are stronger than the spherical particle systems. They are easier to realize mode selection.

**Key words** laser physics; random medium; shapes of scattering particles; finite different time domain; localization

**OCIS codes** 140.3538; 260.2110; 290.5825

## 1 引 言

随机激光是一种致光原理不同于传统激光器的特殊激光器,于 1968 年由俄罗斯科学家 Lotokhov 通过科学计算首次预言随机增益介质中可能存在受

激辐射现象<sup>[1]</sup>。1994 年 Lawangdy 等<sup>[2]</sup>用脉冲激光器抽运胶体溶液首次发现了激光辐射现象,验证了 Lotokhov 的预言。另一个具有重要意义的实验为美国西北大学的 Cao 研究组<sup>[3]</sup>在 ZnO 半导体粉

收稿日期: 2011-09-13; 收到修改稿日期: 2011-11-14

基金项目: 国家自然科学基金(60877047)和河北省自然科学基金(F20100002002)资助课题。

作者简介: 李志全(1954—),男,博士,教授,主要从事光纤传感及非线性光电检测等方面的研究。

E-mail: lzq54@ysu.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: e87823@163.com

末中观察到了激光辐射现象,引起学术界的广泛关注,进而成为研究热点。随机激光没有光腔,关于其发光原理的研究经历了随机增益介质光散射理论、环形腔理论、环形波导理论和准态模理论等<sup>[4]</sup>。现阶段,学术界普遍认为随机激光源于光子局域化,而光子局域化又来源于光在随机介质中的多重散射<sup>[5]</sup>。人们对一系列可能影响随机激光特性的因素做了广泛而深入的研究,并得出了相应的结论<sup>[6~13]</sup>。目前的研究中多数将散射粒子等效为球形,本文基于最近提出的整体散射效应模型<sup>[12,13]</sup>,对模型中散射粒子的形状做了改动,用以研究不同散射粒子形状对随机介质中光的传输特性的影响。此种模型将随机激光看作是随机介质与相匹配的抽运光相互作用的整体散射效应的结果,较好地解释了实验现象,并为随机介质整体相干散射产生激光的机理提供了有力的依据。通过与以往的结论作对比,发现了一些新的现象,并得出了相应的结论。

## 2 二维随机介质模型

以往研究将散射粒子形状等效为球形,由于光子局域化来源于光的多重散射,如果散射粒子形状改变,必定会影响散射粒子的散射特性和光局域化<sup>[14,15]</sup>。为此,本课题组重构了二维随机介质模型,对此进行探究。

将实际系统简化为由方形均匀介质和散射粒子组成的二维随机系统。方形均匀介质和散射粒子的介电常数分别为  $\epsilon_1 = 1.0$  和  $\epsilon_2 = 4.3$ ,磁导率均为  $\mu = 1$ 。散射粒子随机分布在方形均匀介质中。设方形均匀介质的边长为 1200 nm,粒子的中心位置为

$$\begin{cases} x_0 = \eta \times 1200 + 100 \\ y_0 = \eta \times 1200 + 200 \end{cases} \quad (\eta \sim [0,1]). \quad (1)$$

中心位置确定后,计算出散射粒子所在的区域  $f$ ,则介电常数的分布情况为

$$\epsilon(x,y) = \begin{cases} \epsilon_1 = 1.0 & (x,y) \notin f \\ \epsilon_2 = 4.3 & (x,y) \in f \end{cases}. \quad (2)$$

为了便于研究,统一使用面积相同,长短半轴比不同的椭球粒子代替各种形状的粒子(参看图 1),定义  $\beta = a/b$ ,  $a$  为短半轴长,  $b$  为长半轴长,  $\beta = 1$  时为球形粒子。为了更全面地表述问题,本文从低浓度 7%,14% 到较高浓度 28%,35% 做了对比研究。定义散射粒子的总面积占方形均匀介质的比为介质的浓度  $\Phi = NS/L^2$ ,  $N$  为散射颗粒总数,  $S$  为散射粒子的面积。产生随机激光要求介质中颗粒的尺寸基本均匀并接近光波波长,模型中采用的散射颗粒的面

积  $S = \pi ab = 10000\pi \text{ nm}^2$ 。其中,在浓度相同的情况下,散射粒子的相对位置不发生改变,且没有考虑粒子的随机取向。一种典型的模型如图 1 所示。

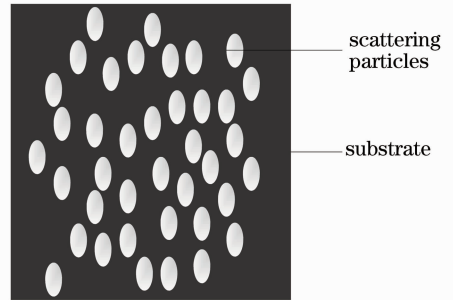


图 1 二维随机介质模型示意图  
Fig. 1 A modal of 2D random media

## 3 时域有限差分解 Maxwell 方程

二维随机介质的 Maxwell 方程为

$$\nabla \times E(r,t) = -\mu \frac{\partial H(r,t)}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\nabla \times H(r,t) = \epsilon(r) \frac{\partial E(r,t)}{\partial t}. \quad (4)$$

若只考虑二维横磁(TM)模,即  $E$  与  $z$  轴平行,则电磁分量为  $(0,0,E_z)$ ,  $(H_x,H_y,0)$ , 此时 Maxwell 方程的分量形式为

$$\partial E_z / \partial x = \mu \partial H_y / \partial t, \quad (5)$$

$$\partial E_z / \partial y = \mu \partial H_x / \partial t, \quad (6)$$

$$\partial H_y / \partial x - \partial H_x / \partial y = \epsilon(r) \partial E_z / \partial t, \quad (7)$$

式中  $\epsilon(r)$  为介电常量,  $\mu$  为磁导率,均为位置函数。

由于时域有限差分(FDTD)法对 Maxwell 矢量方程直接离散,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,因而在研究光波局域化方面显示了极大的优越性。文中采用 FDTD 法研究随机介质中光场的空间分布。

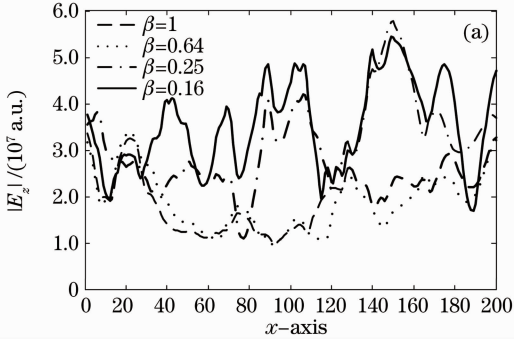
因为研究的对象是椭球形粒子,为了保证计算速度和精度,采取了非均匀划分网格法。非均匀划分网格法粗细网格划分合理,可以提高精度和速度<sup>[16,17]</sup>。原则为在方形均匀介质及散射粒子的交界处,电磁场强度变化大,采用高密度的网格;在方形均匀介质及散射粒子内部,电磁场强度变化小,使用相对密度较稀疏的网格。此外,为了避免数字色散导致的误差增大,计算域中任何相邻的两个网格尺寸是平滑变化的。空间步长  $\min(\Delta x) = \min(\Delta y) = 5 \text{ nm}$ ,  $\max(\Delta x) = \max(\Delta y) = 8 \text{ nm}$ , 相邻网格尺寸的比率  $R \leq 1.2$ 。时间步长为  $\Delta t = \frac{c}{\sqrt{N} \times \min(\Delta x)} =$

$\frac{3 \times 10^8}{\sqrt{2} \times 5 \times 10^{-9}} \approx 4.243 \times 10^{-16}$  s。N 为介质的维数。

计算空间外围由完全匹配层(PML)包围。在介质中心位置处垂直入射一束中心频率  $\nu_0$  为  $6 \times 10^{14}$  Hz 的 TM 模时域高斯脉冲光束作为激发源：

$$E = A \cos \omega t \exp \left[ -4\pi \left( \frac{t-t_0}{\tau} \right)^2 \right]. \quad (8)$$

取  $\omega = 2\pi\nu_0 = 3.8 \times 10^{15}$  Hz,  $\tau = 4 \times 10^{-15}$  s,  $t_0 = 1.05 \times 10^{-16}$  s, 分别对散射颗粒浓度为  $n = 7\%$ ,  $14\%$ ,  $21\%$ ,  $28\%$ ,  $35\%$  情况下  $\beta = 1, 0.64, 0.25, 0.16$ ,



0.16 的散射粒子组成的二维随机介质中光波的传输情况进行模拟。

#### 4 分析及讨论

经过 20000 步的迭代后,首先得到了光波在二维随机介质中的空间分布。图 2 分别给出了浓度为 7% [图 2(a)] 和 35% [图 2(b)] 时,  $\beta$  值不同的散射粒子组成的随机介质空间  $x$  轴方向上的  $|E_z|$  进行加和得到分布图。

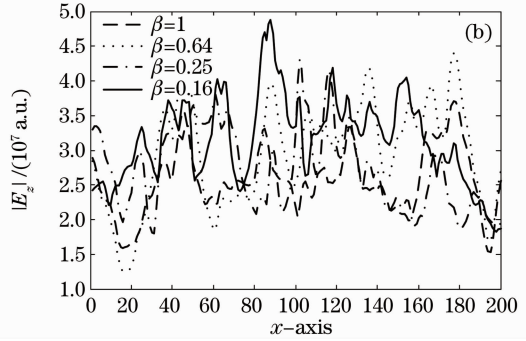


图 2  $x$  轴方向上的  $|E_z|$  的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of  $|E_z|$  at  $x$ -axis

从图 2 的两幅图中可以看到,不同形状的散射粒子系统的电场分量的强度峰在空间上的位置是相对不变的,但是幅值强度却受到了影响。

将所有网格的  $|E_z|$  值相加,就得到了整个场的电场值,计算了  $\beta = 1, 0.64, 0.25, 0.16$  时随机介质中电场值随浓度变化的曲线图,如图 3 所示。从图中可看出,在粒子为球形和近似球形时,整个场的电场值随粒子浓度的增大而增大,与 Cao 等<sup>[3]</sup> 的实验作对比,结果吻合得很好,也证明了本文算法的正确可行性。但是当粒子形状变得狭长时,场强曲线出现了振荡现象。

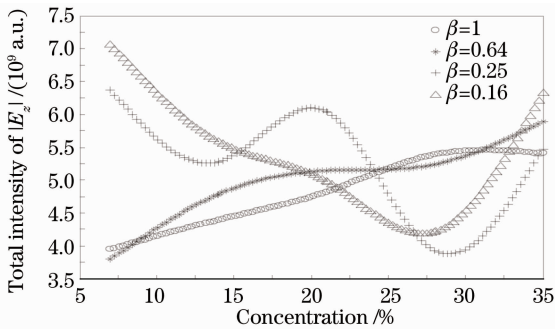


图 3 随浓度变化的  $|E_z|$  趋势图

Fig. 3  $|E_z|$  changes with the concentration

将每个时刻所有格点处的  $E_z$  值相加,获得不同时刻的电场值,然后做傅里叶变化,就能得到该段

时间内随机介质中电场的频谱强度分布图。对  $0 \sim 20000$  步的电场值进行傅里叶变化,得到了如图 4 所示的频谱图(截取了频率  $6 \times 10^{14} \sim 9 \times 10^{14}$  Hz 的部分)。图 4(a) 为浓度为 7% 时的各  $\beta$  值得散射粒子系统的频谱对比,图 4(b) 为浓度为 35% 时的情况。

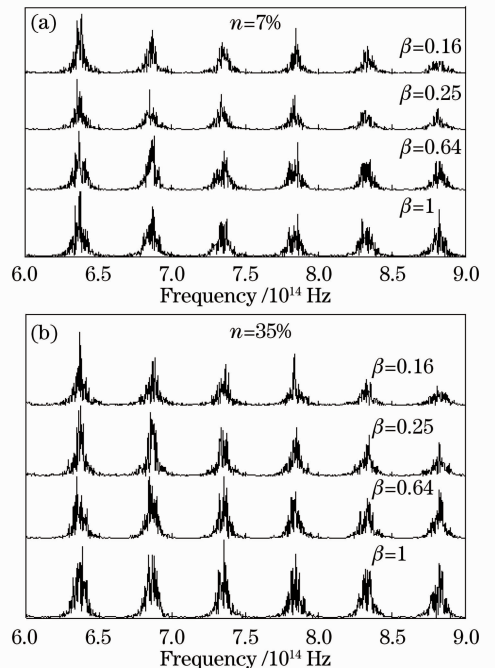


图 4  $6 \times 10^{14} \sim 9 \times 10^{14}$  Hz 频段内电场频谱图

Fig. 4 Spectrum of  $6 \times 10^{14} \sim 9 \times 10^{14}$  Hz

况。通过对比可看出,随着浓度增加,频率峰之间的间隔不变,这与以往的研究相符<sup>[18]</sup>,同时也印证了算法的正确性。同时观察散射粒子形状的改变对频率峰之间的间隔不产生影响。

图 5 给出了浓度为 35% 时,  $\beta = 1$ 、 $\beta = 0.64$ 、 $\beta = 0.25$ 、 $\beta = 0.16$  的 4 种粒子系统中的光波信号在

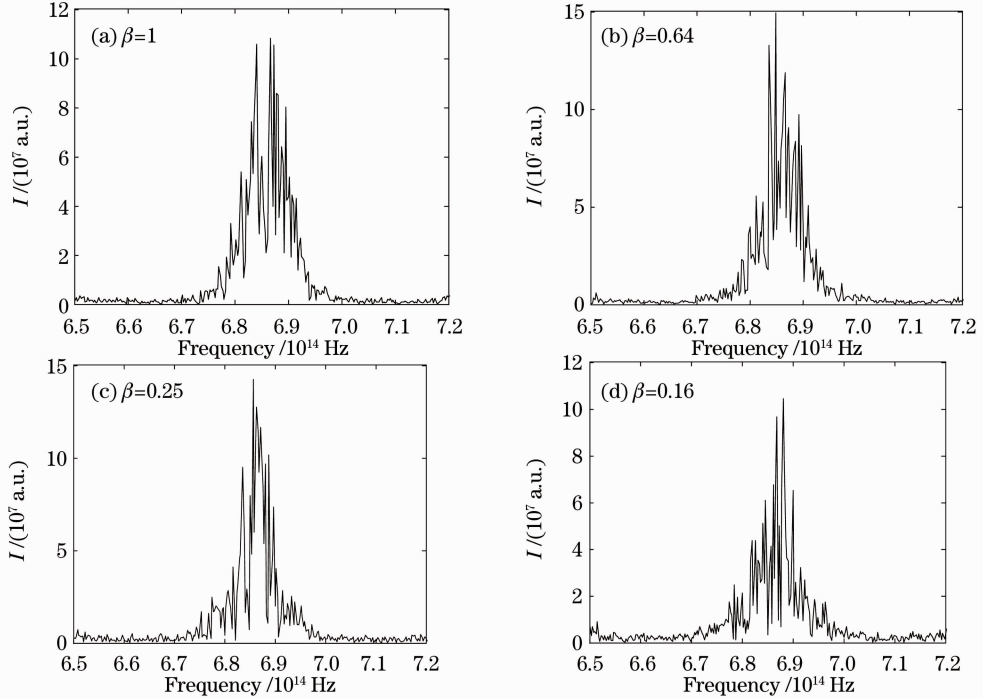


图 5 浓度为 35% 时的频谱图

Fig. 5 Spectrum at the concentration of 35%

通过对球形粒子系统的分析与以往文献的研究成果对比吻合<sup>[12,13,18]</sup>,可看出本文算法的正确可行性。在散射粒子浓度较低,  $\beta$  值较小时出现的场强值较大的现象是没有预料到的,这预示着,如果选择参量(粒子的位置,形状等)恰当,在较低浓度的系统中也可能俘获很强的能量。当散射粒子狭长时,形成类似纳米线的结构,此时,不仅存在多重散射形成的干涉,还存在着多重衍射。干涉与衍射互相作用,从而引起相长或相消,这与散射粒子的排列位置以及浓度都有关系。这可以很好地用来解释仿真中得到的关于电场值的曲线振荡的结果,但是随机介质是一个复杂的系统,并不排除有其他因素的共同影响。

## 5 结 论

本文用 FDTD 方法解 Maxwell 方程计算了光波在散射粒子形状不同的介质中的传输,得到了 TM 的传输特性、幅值曲线和频谱结构。综上所述

频率  $6.5 \times 10^{14} \sim 7.2 \times 10^{14}$  Hz 频段内的强度谱,它为截取的相应的图 4(b) 中强度谱中的一部分。峰值所在位置对应着模式的中心频率。放大后观察可见,单独频率峰内的模式情况各自不同,随着参数  $\beta$  的变小,频谱峰的线宽开始变窄,并且开始分立出更窄的尖峰。

得到散射粒子的形状对光的传输情况的影响有: 1) 幅值强度改变,但是峰值位置不改变。2) 散射粒子变得狭窄时,电场分量的强度不随散射粒子浓度的增加而增加,出现振荡现象。3) 发射谱中,频率峰之间的间隔没有改变。4) 取一个频率峰放大看,发现每个频率峰随着粒子变得狭长线宽也变窄,并且分立出更窄的发射峰。

## 参 考 文 献

- 1 V. S. Anderson. Generation of lasing a scattering medium with negative resonance absorption[J]. *Sov. Phys.*, 1968, **26**(5): 835~837
- 2 N. M. Lawandy, R. M. Salachandran, A. S. L. Gomes *et al.*. Laser action in strongly scattering media[J]. *Nature*, 1994, **368**: 436~438
- 3 H. Cao, Y. G. Zhao, S. T. Ho *et al.*. Random laser action in semiconductor powder[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **82**(111): 2278~2282
- 4 Chen Lei, Lou Qihong, Wang Zhijiang. Recent investigation on random laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(5): 2~7  
陈 雷, 楼祺洪, 王之江. 随机激光的发展现状[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(5): 2~7

- 5 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  
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
- 6 Yulong Tang, Yong Yang, Jianqiu Xu. Influence of gain localization in one-dimensional random media [J]. *Physica B*, 2009, **404**: 1471~1476
- 7 Alejandro B. Aceves. Localization and trapping of light in one- and two-dimensional nonlinear periodic structures [J]. *Wave Motion*, 2007, **45**: 48~58
- 8 Jing Cheng. Controlling the delocalization-localization transition of light via electromagnetically induced transparency [J]. *Physical Review A*, 2011, **83**: 053847
- 9 Lu Jiantao, Liu Hai, Wang Kejia *et al.*. The competition and threshold property between two polarization states in two-dimensional random medium [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1892~1897  
吕健滔, 刘海, 王可嘉等. 二维随机介质中偏振模式的竞争和阈值特性[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1892~1897
- 10 Liu Yanyun, Hou Lantian. Measurement of photon localization in micro-structure optical fibers using coherent back scattering [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(3): 343~346  
刘艳云, 侯蓝田. 相干背散射法测量微结构光纤中的光子局域化[J]. *中国激光*, 2006, **33**(3): 343~346
- 11 He Benqiao, Liao Qing, Huang Yong. Random lasing in a cholesteric liquid crystal polymer solution [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10): 343~346  
何本桥, 廖青, 黄勇. 胆甾型液晶溶液膜中的随机激光[J]. *中国激光*, 2008, **35**(10): 343~346
- 12 Wang Huiqin, Liu Zhengdong, Wang Bing. The spatial distribution of optical field in random media with different filling densities of the same material particles [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(4): 2186~2190  
王慧琴, 刘正东, 王冰. 同材质颗粒不同填充密度的随机介质中光场的空间分布[J]. *物理学报*, 2008, **57**(4): 2186~2190
- 13 Wang Huiqin, Liu Zhengdong, Leng Xinli. Dynamical propagation process of light in 2D random mediums [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 709~712  
王慧琴, 刘正东, 冷新丽. 光在二维无序介质中的动态传播过程[J]. *光子学报*, 2009, **38**(3): 709~712
- 14 Wang Xiying, Ruan Liming. Scattering properties of nonspherical particles [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2009, **30**(8): 1366~1368  
王希影, 阮立明. 非球形粒子的散射特性分析[J]. *工程热物理学报*, 2009, **30**(8): 1366~1368
- 15 Dai Bing, Luo Xiangdong. Multiple light scattering of nonspherical particles with elliptical cross section [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(6): 3864~3868  
戴兵, 罗向东. 椭圆截面非球形颗粒群的多重光散射[J]. *物理学报*, 2009, **58**(6): 3864~3868
- 16 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
- 17 Ding Hai. The Research on High Order Accurate FDTD Method in the Saltation Media Region [D]. Xi'an: Xidian University, 2008. 31~44  
丁海. 突变介质区域高精度 FDTD 算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008. 31~44
- 18 Ye Yunxia, Yao Hongbing. Research on long-life modes in 2D random scattering media [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1): 144~147  
叶云霞, 姚红兵. 二维随机体系中长寿命模的研究[J]. *光子学报*, 2010, **39**(1): 144~147

栏目编辑: 宋梅梅