

文章编号: 0253-2239(2007)07-1295-6

二维随机增益介质中局域模的模面积和放大^{*}

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

1 深圳大学工程技术学院太赫兹技术中心, 深圳 518060
2 电子科技大学, 成都 100718
3 中国地质大学数理系, 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: 随机激光形成于随机介质中局域模的放大,其放大特性依赖于局域模的空间分布。通过复折射率的虚部将光学增益引入系统,采用时域有限差分(FDTD)法,分析了增益介质中局域模的放大特性,并用模面积描述了局域模空间分布,着重对比分析了模面积对局域模放大特性的影响。模拟结果显示,局域模具有不同的空间分布,直接影响了局域模的放大特性,模面积较小的模式具有较低的损耗,能够获得更多能量,在介质中被优先放大,而模面积较大的模式,由于损耗较大,将获得较少的能量。

关键词: 激光物理; 随机激光器; 有限时域差分法; 局域模; 模面积

中图分类号: O43 文献标识码: A

Mode Area and Amplification of Localized Modes in Two-Dimensional Active Random Media

Wang Hong^{1,2} Ouyang Zhengbiao¹ Han Yanling^{3,4} Zhong Yuancong¹ Ruan Shuangchen¹

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, Chengdu 100718
3 Mathematics & Physics Department, China University of Geosciences, Wuhan 430074
4 Institute for Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074

Abstract: Random lasers result from the amplification of localized modes in random gain medium, and the amplification property depends on the spatial profile of the localized modes. Through the introduction of optical gain into system with an imaginary part of the complex refractive index, the amplification properties of localized modes are investigated by the finite-difference time-domain (FDTD) method. We find that different localized modes have different mode areas which have direct influence on the amplification property of the localized modes. The modes with smaller mode area undergo lower loss of energy than those with larger mode areas, so that they are amplified in advance while those modes with larger mode areas are suppressed due to mode competitions. This will lead to preferred amplification of the desired localized modes.

Key words: laser physics; random laser; finite-difference time-domain method; localized modes; mode area

^{*} 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(200647)资助课题。

作者简介: 王 宏(1967-),男,山西大同人,博士,成都电子科大博士后,主要从事激光物理、光子晶体方面的研究。
E-mail: wanghong745@sohu.com

^{**} 通信联系人。E-mail: zbouyang@szu.edu.cn

收稿日期: 2006-07-05; 收到修改稿日期: 2006-09-18

1 引 言

随机介质是指一种折射率在光波长尺度内随机变化的介质,光波在这样的介质中的空间分布是局域化的。假如在这样的随机介质中引入光学增益,将导致更复杂的光学特性,其中随机激光是最令人感兴趣的现象^[1~16]。自从实验中发现随机激光后,一个新领域——随机增益介质中光波的局域化受到人们的广泛关注。这一领域突破了以往光波局域化限于非增益介质的局限,重点研究光学增益对随机介质中光波空间分布和频谱特性的影响等问题。一些相关问题如增益介质中电磁波的空间分布,局域模放大^[7]、阈值特性^[17,18]以及局域模的耦合、竞争^[10]等问题已经引起人们的关注。相关理论例如扩散理论^[3]、局域模理论^[18]被提出和不断完善,以解释增益介质中的这些特性。这些理论和结果加深了人们对光波局域化的理解,但作为一个新领域,仍然有许多问题尚未解决,增益介质中局域模的局域化就是其中之一。

模式的空间分布以及对放大特性例如模式竞争的影响历来是人们研究的重要课题。同样,随机激光器也具有如上特性,并显得尤其突出。这是因为随机激光器没有确定的腔,局域模不受腔大小的约束,空间分布明显不同,对局域模放大特性的影响也更加突出。已有的研究表明,局域化长度越小的模式,阈值越低^[17],随机激光理论中的局域抽运技术和空间排斥特性就是以上原理的应用和直接结果^[9,18,19]。

本文通过时域有限差分(FDTD)法求解一定边界条件下的麦克斯韦(Maxwell)方程,分析了二维增益和非增益介质中局域模的放大和空间分布特性,并用模面积描述了模式的空间分布。模拟结果显示,不同的局域模具有不同的模面积,模面积小的模式损耗更小,能够获得更多的能量,在介质中能够优先放大。局域模的空间分布不同于其它激光器,反映了随机激光器的特性,进一步研究这一问题可以加深理解随机激光器的形成机理,从而丰富现有的激光理论。

2 基本模型

在随机介质中,频率为 ω 的电磁波在非均匀无损耗介质中传播时,它的电矢量 \mathbf{E} 满足的麦克斯韦方程可简化为类似于固体中电子所满足的薛定谔(Schrödinger)波动方程的形式^[20]:

$$-\nabla^2 \mathbf{E} + \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_1(r) \mathbf{E} = \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_0 \mathbf{E}, \quad (1a)$$

式中,介电常量可表示为

$$\epsilon(r) = \epsilon_0 + \epsilon_1(r), \quad (1b)$$

其中 ϵ_0 是平均介电常量, $\epsilon_1(r)$ 是介电常量的空间涨落。

图1显示了形成局域模的边界条件,介质边界的各个方向只有出射电磁波($p_n \neq 0, q_0 \neq 0$),没有入射电磁波($p_0 = 0, q_n = 0$),换句话说,介质内部的电磁波在边界处要么透射出介质,要么反射回介质中来。在这样边界条件下,麦克斯韦方程组的本征值即为局域模。

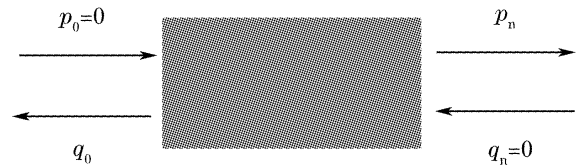


图1 随机介质中形成局域模的边界条件
Fig. 1 The boundary condition for localized modes in random medium

随机增益介质由折射率为 $\bar{n} = n + in'$ 、半径为 r 的圆形微粒随机散布在折射率为 n_1 的均匀矩形介质中形成,微粒在介质中满足正态空间分布。介质中微粒的密度用填充率 Φ 表示。根据Cao等人的实验^[7,9],ZnO随机介质的参量 $n = 2.3, n_1 = 1, r = 37.5 \text{ nm}$ 和 $\Phi = 40\%$,图2显示了二维ZnO随机介质中散射微粒的空间分布。光学增益通过一个复折射率 $\bar{n} = n + in'$ 的虚部引入麦克斯韦方程组中。在二维的情况下,TM模满足的麦克斯韦方程为

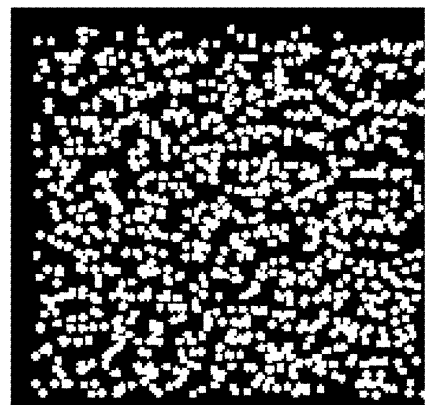


图2 二维随机介质结构图,其中散射微粒的半径 $r = 37.5 \text{ nm}$,折射率 $n = 2.3$,背景介质的折射率 $n_1 = 1$ 和填充率 $\Phi = 40\%$

Fig. 2 Structure of two-dimensional random medium with radius of particles $r = 37.5 \text{ nm}$, optical index $n = 2.3$, optical index of background medium $n_1 = 1$, and surface filling fraction of the particles $\Phi = 40\%$

$$\mu_0 \frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{\partial E_y}{\partial z}, \quad (2a)$$

$$\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial t} = -\frac{\partial E_y}{\partial x}, \quad (2b)$$

$$\epsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} + \sigma E_y = \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x}. \quad (2c)$$

其中 ϵ, μ_0 和 σ 分别是介质的介电常量、真空磁导率和电导率。当折射率 $\bar{n} = n + in'$ 时, 有 $\sigma = 2\epsilon_0 m' \omega$, 其中 ω 是光波频率。

设介质中沿 z 轴方向传播的光波的电场为

$$E(z, t) = E_0 \exp[i(kz - \omega t)], \quad (3)$$

当折射率 $\bar{n} = n + in'$ 时, 波矢量 k 为

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}(n + in'), \quad (4)$$

其中 λ 为光波波长。将(4)式代入(3)式, 可得

$$E(z, t) = E_0 \exp\left(-\frac{g}{2}z\right) \exp\left[i\left(\frac{2\pi}{\lambda}nz - \omega t\right)\right], \quad (5)$$

其中 $g = \frac{4\pi}{\lambda}n'$ 是增益系数。根据(5)式, 当 $n' > 0$ 时, $g > 0$ 表示吸收, 电场的幅度在传播过程中不断衰减; 当 $n' < 0$ 时, $g < 0$ 表示放大, 电场的幅值在传播过程中不断增大。需要强调一点, 由于表示增益的 n' 参量是一个常量, 光波在介质中经历的是线性相干放大过程。

文献[23]计算了模场的空间分布, 但限于定性描述, 不能定量地描述模场的空间分布。文中采用模面积 S_M 描述了二维介质内模式的空间分布^[22]:

$$S_M = \int |E^2(x, y)| dx dy / |E_{\max}|^2, \quad (6)$$

其中 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, 电场的集中度越低, 局域化强度越弱。

局域模的空间分布和频谱特性可以用时域有限差分法和完全匹配层(PML)吸收边界条件求解二维随机介质中光波满足的麦克斯韦方程得到^[23]。首先在介质中引入一个高斯激励脉冲, 记录观察点中每一时刻光波电场分量的场强, 然后对这些数据进行傅立叶变换, 就得到电场的频谱图, 频谱图中存在的峰值就对应着局域模的中心频率。采用这一方法可以确定随机介质中局域模的分布情况; 其次改用一个频率等于局域模中心频率的连续脉冲激励介质, 就可以得到相应局域模的空间分布。采用这一方法可以得到多个局域模的空间分布, 然后根据(6)式计算得到不同模式的模面积 S_M 。计算中选取

空间步长 $\Delta x = \Delta y = 10$ nm, 那么时间步长 $\Delta t = \Delta x/c\sqrt{2} \approx 3.6 \times 10^{-17}$ s, 高斯脉冲的幅度为 1 V/m。

3 结果和讨论

3.1 模式的选择放大

当高斯脉冲入射到介质中后, 辐射谱中包括多个准态模, 这些模式的时间演化特性和在增益介质中的放大特性, 已经得到详细的讨论^[21, 24]。这里进一步研究了这些模式在增益介质中的时间演化特性, 图 3 显示了模拟结果。从图中可以看出, 在一定的增益下, 模场经历了一个放大过程, 模场的幅度随着时间不断增加, 这一结果说明局域模在增益介质中被有效地放大。但进一步对比图 3 中各图可以看出显著的差别, 在前 5 万步多个局域模同时存在于频谱图中, 频谱图中呈现多个峰值, 但随着时间步的增加, 频谱图中的峰值逐渐减少, 最后 20 万步时只有幅值最大的模式 B 和 A 存在, 呈现选择放大的特性。

这一现象反映了局域模放大的差异性。虽然局域模在增益介质中都可以得到放大, 但不同的局域模在放大过程中, 获得不同的光学增益。一些局域模能够获得更多的光学增益, 具有更大的幅度值, 最终决定了模场的主要特性, 抑制了其它模式。这在频谱图中表现为峰值逐步减少。

Jiang 等^[8~10]在随机激光器的模式竞争和空间排斥研究中首先揭示了这一问题, 并认为局域模的如上特性和局域模的空间分布密切相关, 但以往研究限于定性的解释, 并没有详细的探讨这个问题。本文的模拟结果进一步显示了准态模放大特性的这种差异, 从而为随机激光器的模式竞争和空间排斥提供了证据, 有助于加深人们对以上现象的理解。

3.2 局域模的空间分布和模面积

在图 3(a)中选定了 A、B、C、D、E 五个准态模, 从图 3 中容易看出, 这五个模式呈现出不同的放大特性。下面具体计算这五个准态模的模面积。在非增益介质 ($|n'| = 0$) 中, 将入射脉冲改为连续脉冲, 并调节脉冲波长等于局域模的波长, 可以得到不同模式的空间分布, 图 4(a)显示了一个典型结果。容易看出局域模的空间分布是局域化的, 具有复杂的形态结构^[7]。根据(6)式计算了局域模的模面积, 图 4(b)显示了模拟的结果。从图中容易看出, 局域模具有不同的模面积, 其中 B 的模面积最小, E 的模面积最大。与图 3 对比, 容易看出模面积较小的模

式具有更大的幅度值,而模面积较大的模式具有较小的幅度值。局域模模面积的不同反映了局域模空

间分布的差别,以上结果反映了局域模空间分布对放大特性的影响。

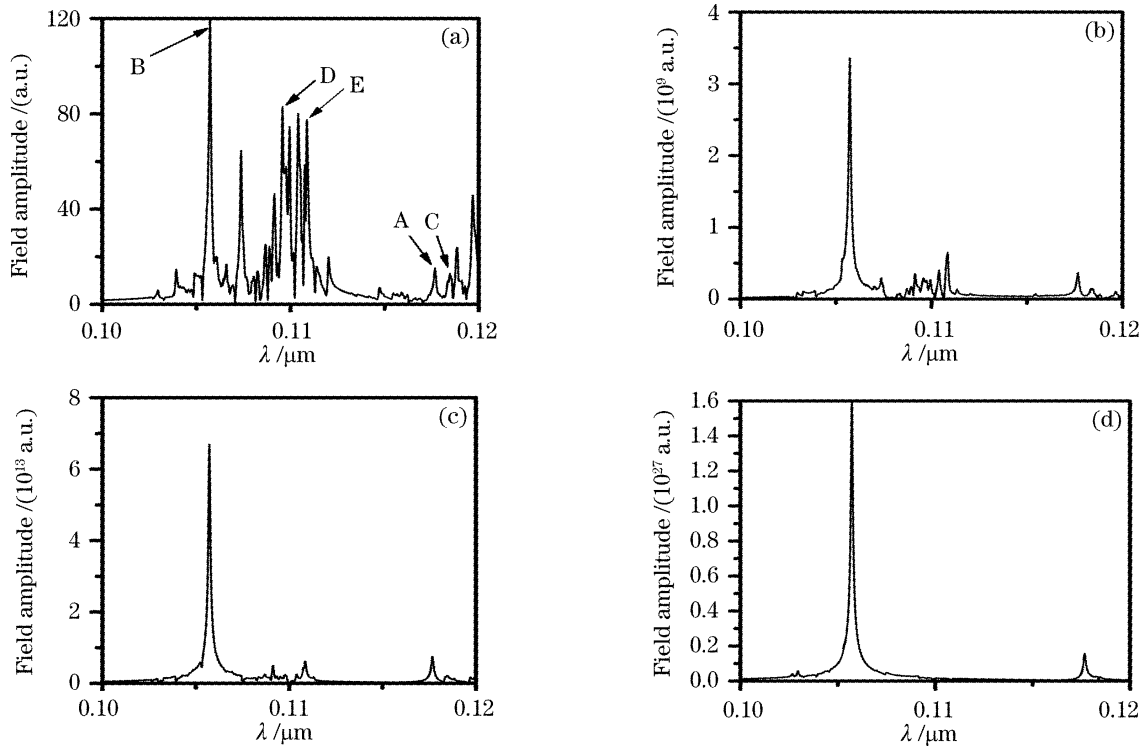


图 3 不同时间步的输出频谱图,时间步为 5 万步(a),10 万步(b),15 万(c),20 万(d)

Fig. 3 Emission spectra for different number of time steps. The number of time steps is 50000 (a), 100000 (b), 150000 (c), 200000 (d)

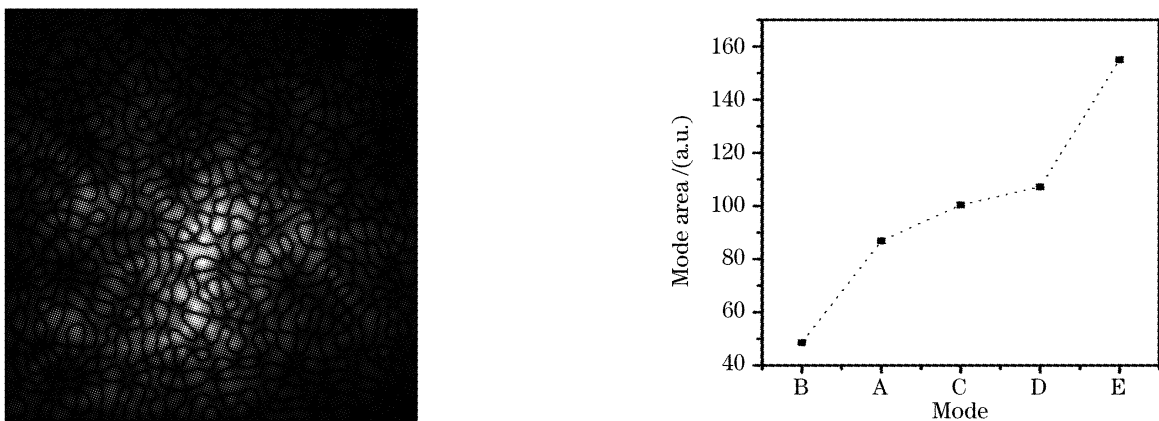


图 4 局域模 B 的空间分布(a)和各模面积(b)

Fig. 4 Spatial profile of localized mode B (a) and mode area as function of localized modes (b)

3.3 模式的放大特性

为了进一步研究模面积对模式放大的影响,分别计算了不同增益水平(n' 值)下,A、B、C、E、D、E五个模式电场能量的增长特性。图5显示了局域模在不同增益水平下电场能量的变化规律,其中横轴表示增益的大小,竖轴表示整个介质内的总能量。可见,模面积小的局域模具有更多的能量,而模面积较大的模式具有较少的能量,另外曲线的增长率具有如下特性:1)增长率和模面积有关,模面积较小的模式具有较高的增长率,模面积较大的模式具有较低的增长率。2)介质中的能量随增益水平经历

了一个非线性的增长过程,光学增益较低时增长率较小,而高增益时增长率较大。由此可见,模面积导致的局域模放大特性的差异,在不同的增益水平下都是存在的,而且随着增益水平增加,这种差异将更加明显。

图5中不同局域模能量的差异性来源于模式放大特性的差别。在传统激光腔中,腔模受激光腔的限制作用越强,损耗越低,越容易被放大。随机介质中虽然没有传统的激光腔,但随机介质对光波的限制作用仍然存在,并具有相同的放大规律。模面积的大小反映了随机介质对光波限制作用的强弱,那

些模面积较小的模式,模场集中在更小的范围内,边界的散失损耗较小,而模面积较大的模场集中在介质较大的范围内,边界的损耗较大。在增益介质中,那些损耗较小的模式,将获得更多的场能,具有更大的幅值,而那些损耗较大的模式,将获得更少的场能,幅值也小。在这种情况下,不同局域模在随机介质中将具有不同的能量。当增益水平相同时,模面积小的模式比模面积大的模式具有更多的能量。而当逐步提高增益水平时,模式能量的差别将逐渐变大,这将导致局域模的能量随增益水平经历了一个非线性的增长过程,具体表现为光学增益较低时增长率较小,而高增益时增长率较大。

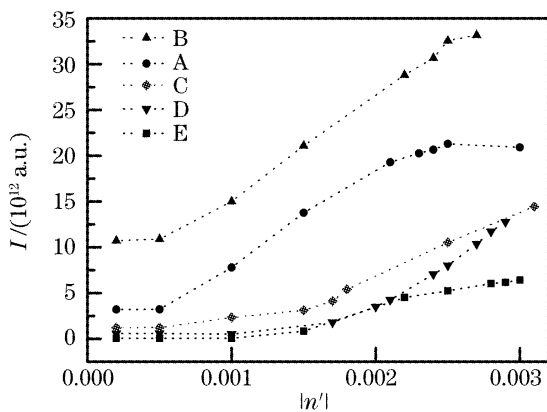


图 5 局域模的放大特性

Fig. 5 Amplification property of localized modes

以往的研究表明^[18],提高和增加散射微粒的折射率和密度,将延长光波在介质中的滞留时间,从而使得局域模获得更多的光学增益,具有更低的阈值。但文中的研究表明,即使在散射微粒的折射率和密度都不变的情况下,不同模式仍然具有不同的放大特性。如果能够合理的选择模面积小的模式进行放大,同样可以实现随机激光器的低阈值运行。另外,通过增加散射微粒的密度,有可能进一步减小模式的模面积,从而降低模式的阈值。

4 结 论

局域模理论认为散射微粒对光波的多重散射导致介质中形成多个局域模。这些作用相当于传统激光腔腔模的模式,在增益介质中谐振、放大形成随机激光,激光的阈值和输出特性决定于局域模的空间分布和损耗。这一理论本质上采用了模式的放大来解释随机激光器的形成机制和特性,反映了随机激光和其它激光的类似性,为人们所接受。但局域模的局域化特性以及这一特性对于放大特性的影响反映了随机激光器的特殊性,是一个新的领域,还没有

一个理论很好的解释这个问题。通过研究和对比不同局域模的模面积和放大特性研究了以上问题。模拟结果显示,不同的局域模具有不同的局域化面积,局域化面积较小的模式,具有较小损耗,能够获得更多的能量,在介质中能够优先放大。研究结果弥补了理论上的不足,丰富了现有的随机激光理论。

参 考 文 献

- 1 N. M. Lawandy, R. M. S. Slschandran, A. S. L. Gomes *et al.*. Laser action in strongly scattering media[J]. *Nature*, 1994, **368**(6470): 436~438
- 2 Diederik S. Wiersma, Meint P. van Albada, Ad Lagendijk. Coherent backscattering of light from amplifying random media [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **75**(9): 1739~1742
- 3 Diederik S. Wiersma, Ad Lagendijk. Light diffusion with gain and random lasers[J]. *Phys. Rev. E*, 1996, **54**(4): 4256~4265
- 4 Diederik S. Wiersma. The smallest random laser[J]. *Nature*, 2000, **406**(6792): 132~134
- 5 Pradhan Pradhan, N. Kumar. Localization of light in coherently amplifying random media[J]. *Phys. Rev. B*, 1994, **50**(13): 9644~9647
- 6 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
- 7 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**(24): 5584~5587
- 8 Xunya Jiang, C. M. Soukoulis. Time dependent theory for random lasers[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(1): 70~73
- 9 H. Cao, X. Y. Jiang, Y. Ling *et al.*. Mode repulsion and mode coupling in random lasers[J]. *Phys. Rev. B*, 2003, **67**(16): 161101~161104
- 10 C. M. Soukoulis, Xunya Jiang, J. Y. Xu *et al.*. Dynamic response and relaxation oscillations in random lasers[J]. *Phys. Rev. B*, 2002, **65**(4): 041103~041107
- 11 Y. Ling, H. Cao, A. L. Burin *et al.*. Investigation of random lasers with resonant feedback[J]. *Phys. Rev. A*, 2001, **64**(6): 063808~063815
- 12 Zhao-Qing Zhang. Light amplification and localization in randomly layered media with gain[J]. *Phys. Rev. B*, 1995, **52**(11): 7960~7964
- 13 Alexander L. Burin, Hui Cao, M. A. Ratner. Two-photon pumping of a random laser[J]. *IEEE J. Selected Topic in Quant. Electron.*, 2003, **9**(1): 124~127
- 14 Shih-Hui Chang, Hui Cao, Seong Tiong Ho. Cavity formation and light propagation in partially ordered and completely random one-dimensional systems [J]. *IEEE J. Quantumelectronics*, 2003, **39**(2): 364~374
- 15 Yan Feng, Ken-Ichi Ueda. Random stack of resonant dielectric layers as a laser system[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(15): 3307~3312
- 16 Valery Milner, Azriel Z. Genack. Photon localization laser; low-threshold lasing in a random amplifying layered medium via wave localization[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(7): 073901~073904
- 17 A. L. Burin, Mark A. Ratner, H. Cao *et al.*. Random laser in one dimension[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **88**(9): 093904~093907
- 18 P. Sebbah, C. Vanneste. Random laser in localized regime[J]. *Phys. Rev. B*, 2002, **66**(14): 144202~144212
- 19 Xiaohua Wu, Alexey Yamilov, Heeso Noh *et al.*. Random lasing

- in closely packed resonant scatters[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2004, **21**(1): 159~167
- 20 Wang Hong, Liu Jinsong. The effects of dielectric constant fluctuation on the spatial distribution on light waves in random materials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 793~798 (in Chinese)
- 王 宏,刘劲松. 随机介质介电常量的涨落与光波的空间分布[J]. *光学学报*, 2004, **24**(6): 793~798
- 21 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
- 22 Xavier Letartre, Christelle Monat, Christian Seassal *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]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**(12): 2581~2595
- 23 Jean-Pierre Berenger. Perfectly matched layer for FDTD solution of wave-structure interaction problems [J]. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, 1996, **51**(1): 110~117
- 24 Liu Jinsong, Liu Hai, Wang Chun. Spectral time evolution of quasistate modes in two-dimensional random media [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(7): 3116~3122 (in Chinese)
- 刘劲松,刘 海,王 春. 二维随机介质中准态模频率时间演化特性[J]. *物理学报*, 2005, **54**(7): 3116~3122

中国科学院上海光学精密机械研究所光学设计高级讲习班教材征订

中国科学院上海光学精密机械研究所光学设计高级讲习班于 2006 年 10 月 27 日胜利闭幕。现有少量讲习班辅导教材征订,数量有限,欲购从速。四本教材主要内容包括:

1) 王之江院士、徐文东研究员主讲光学系统设计

光学设计中的基本概念和问题:光学系统的基本要求及指标、高斯光学、像差理论、成像质量和发展各种不同结构的光学系统的意义等的阐述,结合现在流行的光学软件设计的基本功能进行介绍,立足于当前具有代表性的产品设计进行实例的分析和讲解。

2) 朱健强研究员主讲光机系统设计和光学加工

本课程的内容涵盖了光机设计的原理、设计方法及常规内容。介绍各类光学元件加工的各个环节及其相关测控技术,培养光学工程师所需掌握的必要光学加工工艺知识。平面、球面、透镜、棱镜等光学加工技术、非球面加工技术,特种光学元件加工技术,光学检测技术。

3) 范正修研究员主讲光学薄膜

从光学薄膜的一般性质出发,讲述光学薄膜在激光系统,光通信系统,显示系统中的应用,介绍极紫外和软 X 射线薄膜,功能性光学薄膜。分析激光对光学薄膜的破坏过程。

教材目录:

《光学加工与检测技术》、《光学机械设计》、《光学设计》、《光学薄膜及其应用》。

征订形式:

- 1) 全套教材或电子版: 400 元
- 2) 全套教材+电子版: 500 元
- 3) 单本教材+电子版: 150 元

优惠办法:

中国光学期刊网会员购买全套教材赠送价值 100 元的期刊阅读卡一张。

征订办法:

联系人: 高老师 电话: 021-69918253 邮箱: gfhai@siom.ac.cn

邮购方法:

请直接汇款到以下地址:

邮编: 201800 地址: 上海市嘉定区清河路 390 号 收款人: 光学期刊联合编辑部