

二维随机介质中的能量分布和频谱特性^{*}

王慧琴^{1,3)} 刘正东^{1,2)†} 王 冰²⁾

1) 南昌大学材料科学与工程学院, 南昌 330031)

2) 南昌大学纳米技术研究中心, 南昌 330047)

3) 南昌大学物理实验中心, 南昌 330031)

(2007 年 12 月 5 日收到, 2008 年 1 月 21 日收到修改稿)

研究了二维随机介质中能量的空间分布和一些特定区域的频谱特性. 结果显示介质中能量呈局域化分布, 其分布与介质中颗粒的随机分布有关, 还与激发光的波长有密切的关系, 介质中能量聚集的区域和介质的准封闭区域有一定关系但并非一一对应. 所考察的各准封闭区域的频谱均随时间变化, 在同一激发光的激励下各准封闭区域的频谱均不相同, 而同一区域在不同的激发光的激励下频谱也不相同. 当激发波长与准封闭区域的结构参数偏差较大时, 频谱中谱峰会出现此消彼涨的模式竞争现象, 而且能量衰减得较快, 而当激发波长与该结构参数较接近时, 相应的频谱中存在一个相对稳定的最高谱峰, 能量衰减也较缓慢. 随机介质激光现象可看作是随机介质与相匹配的激发光相互作用的整体散射的结果.

关键词: 激光物理, 有限时域差分法, 局域化, 频谱特性

PACC: 4225, 4260D

1. 引言

随机增益介质中存在光放大和光散射并由于扩散反馈而产生激光的可能被大量的理论和实验工作所证实^[1-14]. 这些工作大致分为两类: 一类是基于扩散机理建立的自发辐射放大理论^[2,4,5], 但该理论只适合解释那些散射微粒的尺寸和平均自由程远大于光波长的弱散射介质中的自发辐射放大, 不能用来描述强散射介质中的随机激光现象; 另一类基于直接求解 Maxwell 方程组建立的一系列随机激光理论, 如环形腔理论^[3,7-9]、环形波导理论^[10]和准态模理论等^[11-14], 这些理论模型比较适合解释强散射介质的激光辐射现象. 其中准态模理论能够较全面地反映实验观测到的现象, 该理论认为无序介质中介电常数的随机起伏会导致光波的安德森局域化, 这相当于在介质中形成了若干类光腔结构, 这些腔具有传统光腔的一般属性, 能支撑的一些准态模. 当随机介质获得增益并超过阈值时, 这些准态模就有可能被激发为激光模式. 然而, 用有限时域差分 (FDTD) 法模拟二维随机介质中光波的空间分布时

发现, 随机介质中光场的空间分布与介电常数的随机起伏虽有关系但并非一一对应, 而且光场的空间分布还与激发波长有密切的关系; 同时通过观察一些准封闭区域的模式演化过程可以发现: 准封闭区域的模式选择和竞争与激发波长也有密切的关系, 因此随机介质激光现象可看作是随机介质与相匹配的激励源相互作用的整体散射的结果^[15-17]. 这些结果加深了人们对随机介质中激光形成的认识, 具有重要的学术意义.

2. 无序介质的空间分布的模拟

随机介质可理解为某一种均匀的背景材料中随机分布另一种或几种介电常数的材料. 例如氧化锌薄膜, 它可认为是由介电常数为 ϵ_1 的 ZnO 颗粒随机分布在介电常数为 ϵ_2 的均匀背景介质空气中而构成. 用随机函数来模拟颗粒的分布, 如设 (x, y) 是某颗粒在二维随机介质中的空间位置, 则 $x = ix_0 + \alpha\eta_x$, $y = jy_0 + \beta\eta_y$, 其中 $i, j = 1, 2, 3, \dots$ 分别表示 x 和 y 方向上的颗粒序号, x_0, y_0 为在 x 和 y 方向上相邻颗粒之间的平均间隔, 均取 400 nm; η_x, η_y 是满

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 10464002 和 60768001)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: lzdgroup@ncu.edu.cn

足正态分布在 $[-1, 1]$ 范围内的随机数 α, β 为可调系数,均取 0.5,表示颗粒在 x 和 y 方向上的空间位置涨落的程度.设颗粒均为直径是 240 nm 的圆形颗粒,颗粒填充率约为 0.28.当介质参数给定后,根据以上方法模拟产生了一个面积为 $4.4 \mu\text{m} \times 4.4 \mu\text{m}$ 的二维随机介质,用黑色表示基质材料空气,白色表示 ZnO 颗粒,如图 1 所示.从图中可以看出,在这随机分布的介质中可形成一些有一定的封闭性的准封闭区域,准态模理论称这些准封闭结构为类光腔(准态腔),为了考察它们的特性,在介质中选取了四个这样的准封闭区域,中心点分别为图中标注的 a, b, c, d 四点,对应的坐标分别为 $a(-3, -2.4), b(0, 0), c(-4.15), d(0.3, -3.3)$,坐标单位为 400 nm.

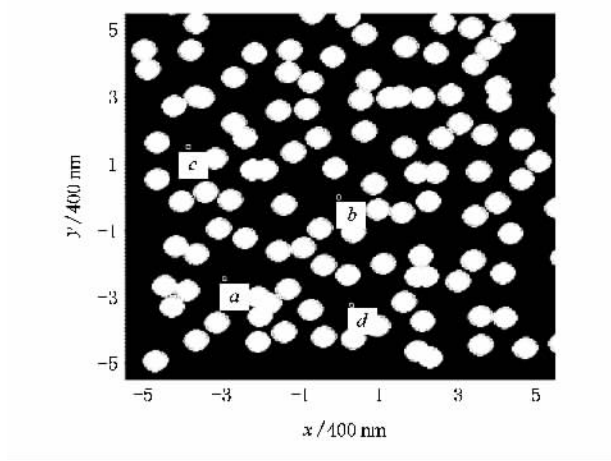


图 1 二维随机介质中颗粒分布

3. 随机介质光学特性模拟

3.1. 随机介质中的能量空间分布

用有限时域差分(FDTD)法求解图 1 所示的随机介质中光场的能量分布.设激励源是与 z 方向无

关的 TM 模的时域高斯短脉冲光源,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(PML)吸收边界的方式进行计算.不考虑增益,取 $\epsilon_1 = 5.4, \epsilon_2 = 1$,空间步长 $\Delta x = \Delta y = 10 \text{ nm}$,时间步长 $\Delta t = 2.357 \times 10^{-17} \text{ s}$,脉冲光源的脉宽取 $600\Delta t$,分别用中心波长为 1064, 770, 385 nm 的宽频带脉冲光源作为激励源激发图 1 所示的介质,经过迭代计算,获得了 6000 步时的 $|E_z|$ 的空间分布,结果如图 2 所示,图中用灰阶来表示 $|E_z|$ 的大小,灰度越小即越亮的区域能量越大.图 2(a)为 1064 nm 的脉冲光激发到图 1 所示的随机介质中 $|E_z|$ 的空间分布,从(a)中可以看出光在介质中呈局域化的分布,大部分局域化区域的尺寸大约在 500 nm 附近,总体能量较弱.图 2(b)为 770 nm 的脉冲光激发的结果,显然光在介质中形成局域化区域尺寸较(a)小,大约在 400 nm 附近,能量比(a)图强.图 2(c)为 385 nm 的脉冲光激发的结果,局域化区域尺寸更小,在 200 nm 附近,总体能量较强.结果表明:在随机介质中光场呈局域化的分布,其分布不仅与介质结构有直接的关系,而且与光的波长也有密切的关系,而且波长越大,光场局域化区域的尺寸也越大.介质中局域化的能量聚集区域与颗粒的随机分布形成准封闭结构有一定关系但并非一一对应.

为了进一步考察所选准封闭区域的能量随时间的变化,用上述三种波长的激发源来分别激发图 1 所示的随机介质,经过 20000 步迭代计算,记录 a, b, c, d 四个考察点的 E_z 随时间的变化,结果如图 3 至图 5 所示.结果表明:在脉冲光束激发后的初期,能量因向外扩散传播而较快地衰减,而经过一定时间后,各点的能量衰减逐步变得缓慢.比较图 3、图 4、图 5 可见:当光的波长与准封闭区域的结构参数

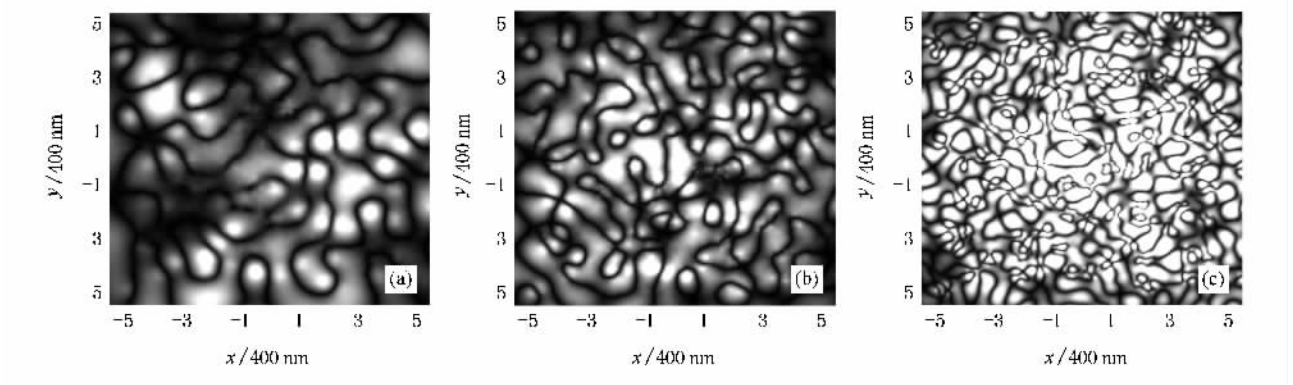


图 2 中心波长分别为 1064, 770, 385 nm 的脉冲光入射到图 1 对应的随机介质中 6000 步时的 $|E_z|$ 的空间分布

偏差较大时 ,能量衰减得比较快 ,如图 3 和图 4 ;而当光的波长与准封闭区域的结构参数较接近时 ,能

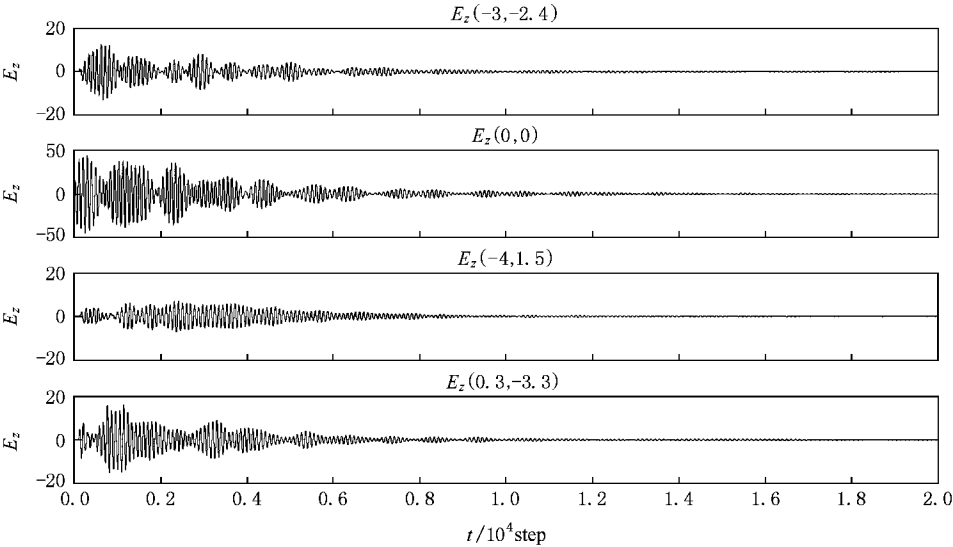


图 3 中心波长为 1064 nm 的脉冲光激发图 1 介质 ,其中 a, b, c, d 四点的 E_z 随时间变化

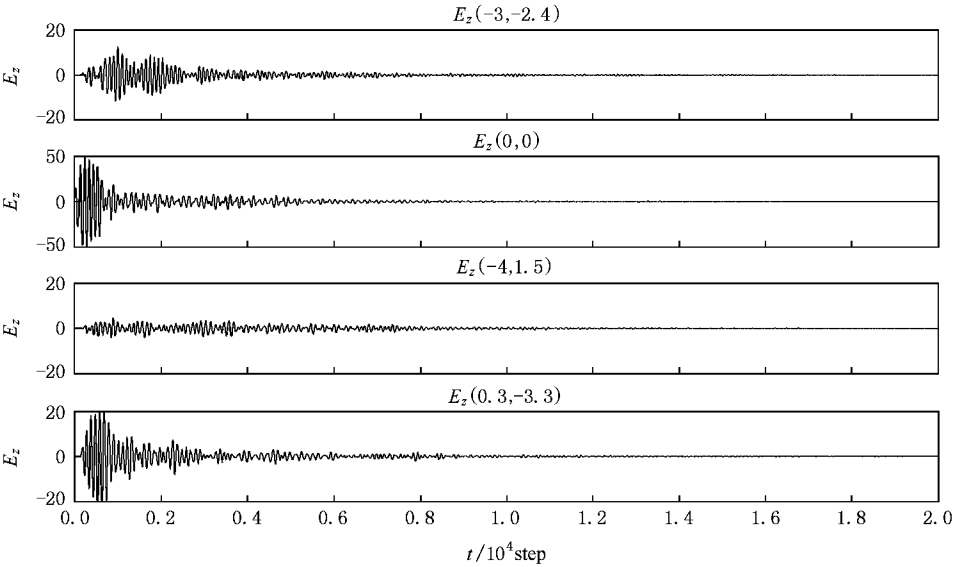


图 4 中心波长为 770 nm 的脉冲光激发图 1 对应的介质 ,其中 a, b, c, d 四点的 E_z 随时间变化

量衰减比越缓慢 ,如图 5 所示 .

3.2. 频谱特性

为继续考察所选准封闭区域的频谱变化规律和特点 ,分别用上述三种波长的激励源激发图 1 介质 ,经过 20000 步迭代计算 ,将 20000 步分为四段单元时间 ,记录每段时间(即 5000 步)各准封闭区域内的频谱强度分布 ,结果如图 6 至图 8 所示 .

图 6 是中心波长为 1064 nm 的脉冲光激发时的频谱强度分布 ,其中图 (a)(b)(c)(d)分别对应于 a, b, c, d 准封闭区域的不同时间的频谱 ,左上图为第一个单元时间的结果 ,右上图为第二个单元时间的结果 ,左下图为第三个单元时间的结果 ,右下图为第四个单元时间的结果 .从图中可以看出在第一时间段内其频谱中激发波长 1064 nm 占主要地位 ,同时出现了波长为 1130 nm 和 1200 nm 等频谱峰值 ;

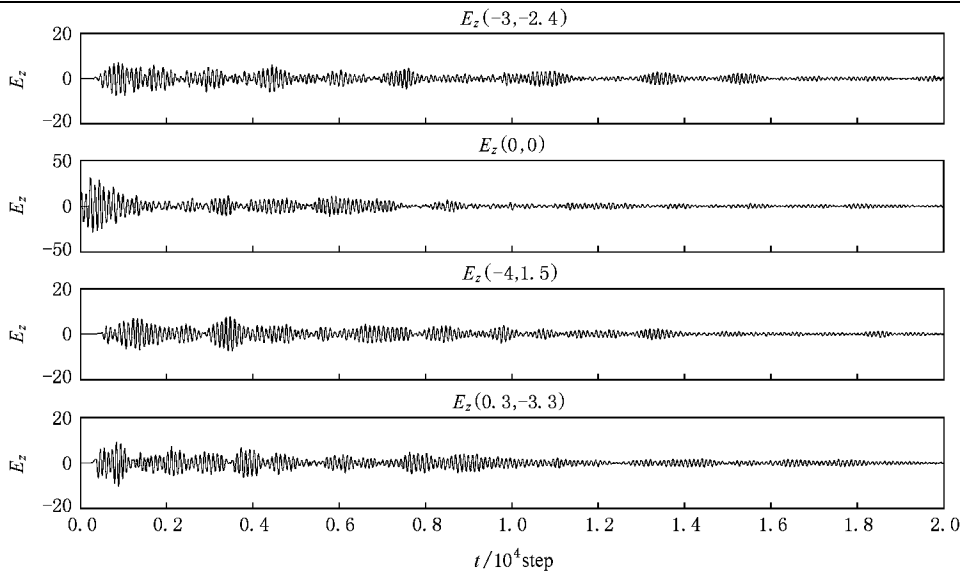


图 5 中心波长为 385 nm 的脉冲光激发图 1 介质, 其中 a, b, c, d 四点的 E_z 随时间变化

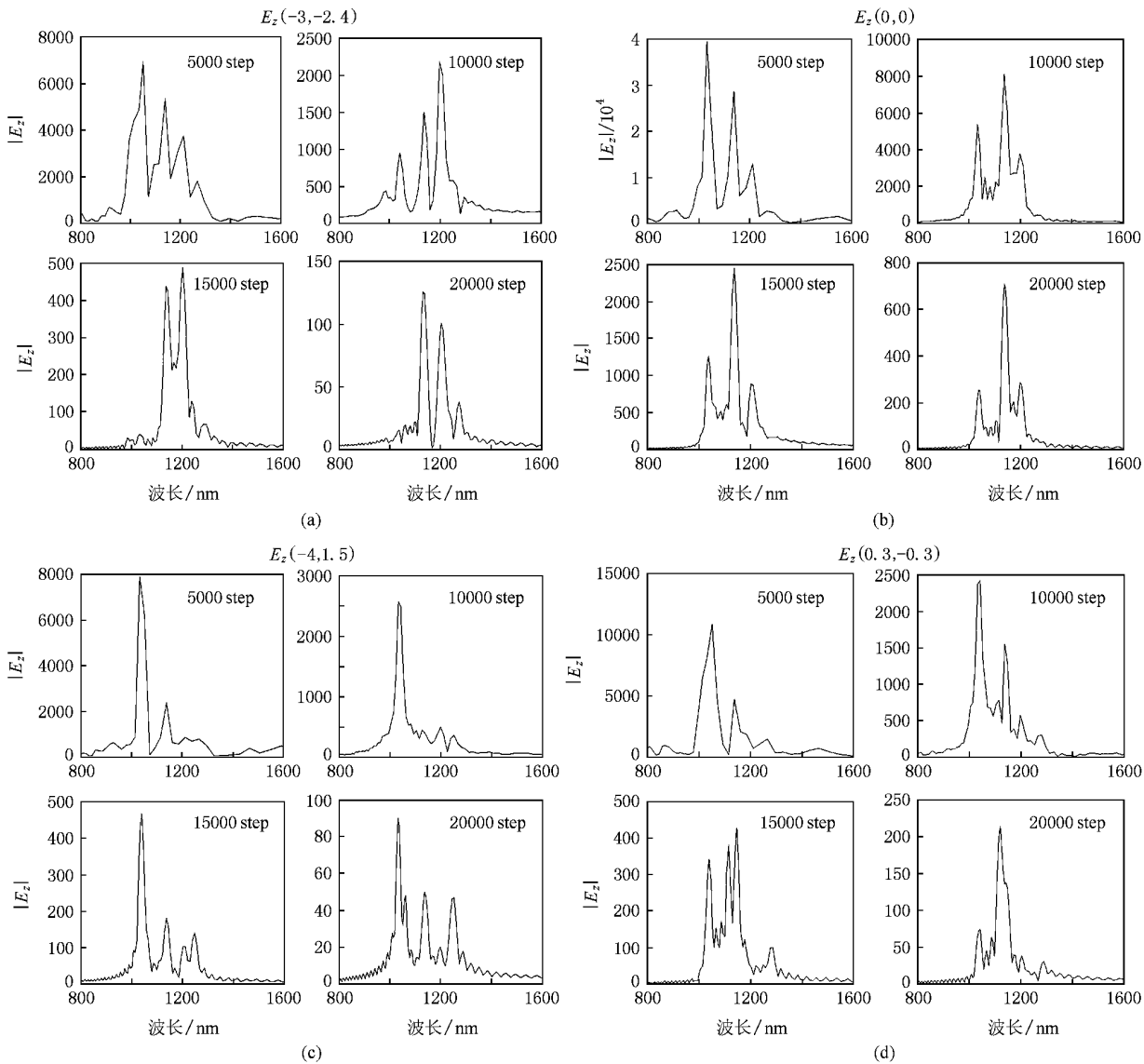


图 6 中心波长为 1064 nm 的脉冲光激发图 1 介质后 a, b, c, d 各准封闭区域的频谱

而到第二段时间, 频谱发生了明显的变化, 频谱变为由波长 1200 nm 占主要地位, 而 1064 nm 波长的峰已降至三个主要谱峰中的最弱峰, 各峰的能量均明显下降, 再比较第三和第四段时间的结果, 同样能发现这些频谱峰此起彼伏、不断变化, 同时总体能量衰减比较快. 再比较 (b) (c) (d) 图可见: 在 1064 nm 的波长的脉冲光的激励下各被考察的 *b*, *c*, *d* 区域出现了各不相同的频谱并均随时间不断变化, 出现此消彼涨的模式竞争现象, 能量衰减比较快.

图 7 是中心波长为 770 nm 的脉冲光入射时的频谱强度分布. 同样地, 分析图 7 (a) (b) (c) (d)

图可以看出各准封闭区域的频谱均不相同并随时间变化, 频谱中各谱峰出现了此消彼涨的模式竞争现象, 而且能量衰减也比较快.

图 8 是中心波长为 385 nm 的脉冲光激发时的频谱强度分布. 综观 *a*, *b*, *c*, *d* 各考察区域的频谱可以发现: 各准封闭区域的频谱也不尽相同并随时间变化. 但在频谱中存在一个相对稳定的最高谱峰, 而且能量衰减比较缓慢. 这与该介质的颗粒尺寸和填充率有关, 它所形成的一些准封闭区域的结构参数和 385 nm 的波长比较匹配. 因此 385 nm 的谱峰能在模式竞争中保持其优势, 详细深入研究将另文

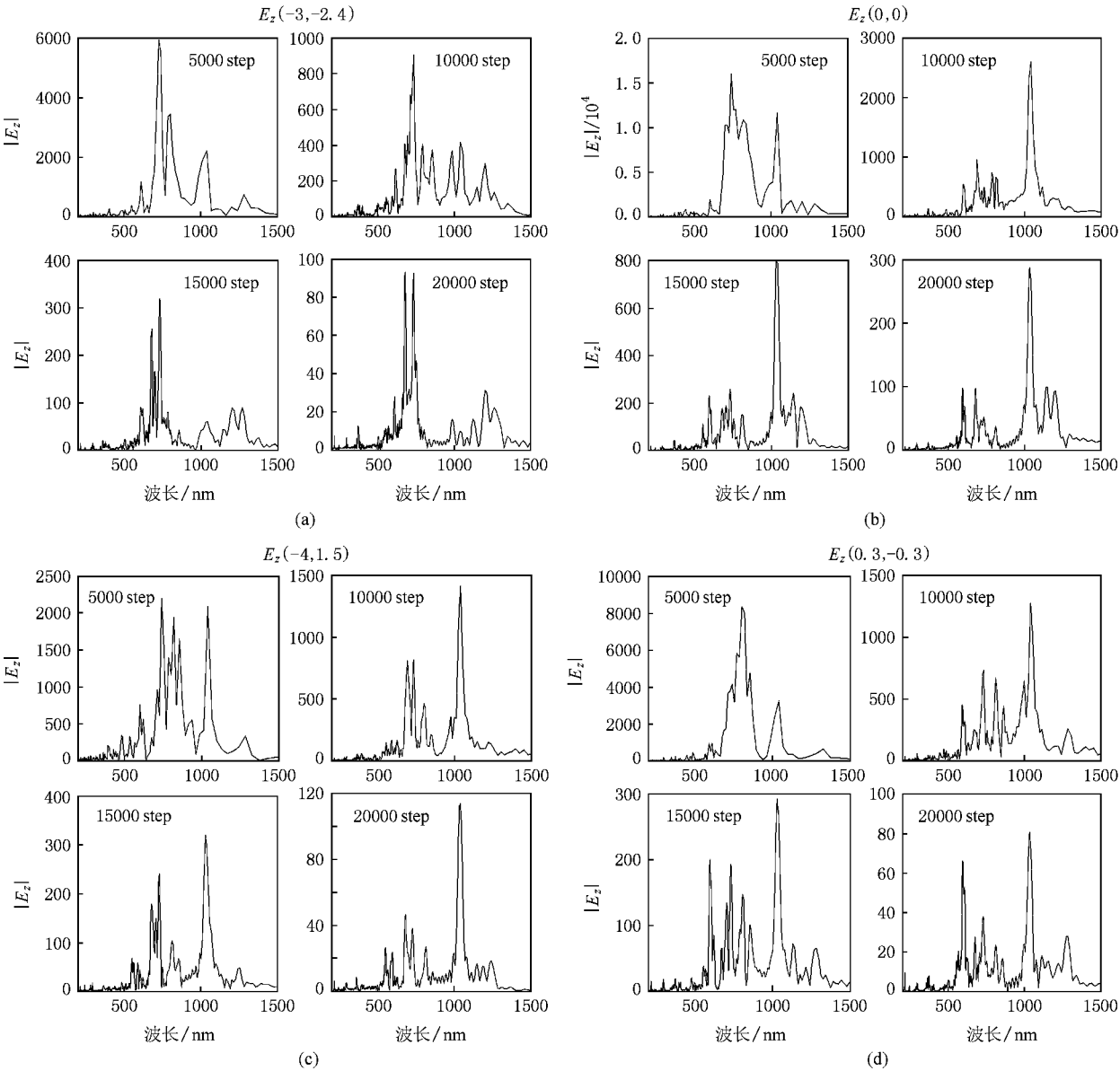


图 7 中心波长为 770 nm 的脉冲光激发到图 1 介质后 *a*, *b*, *c*, *d* 各准封闭区域的频谱

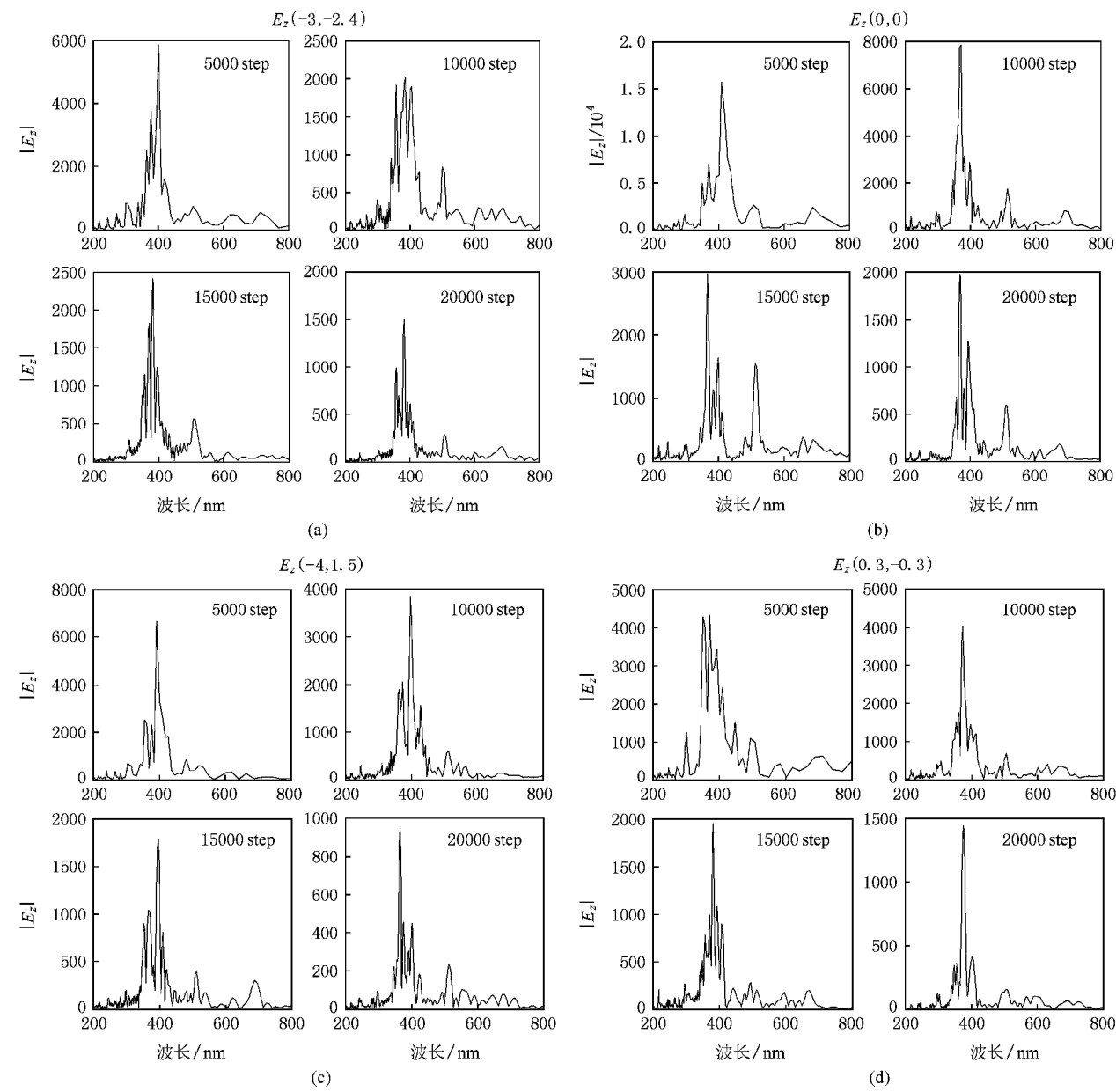


图 8 中心波长为 385 nm 的脉冲光入射到图 1 介质后 *a*、*b*、*c*、*d* 各准封闭区域的频谱

讨论.

比较三种不同波长的激发源的激励图 1 介质的结果显示:在同一种波长的脉冲光激发下介质中结构各不相同的准封闭区域的频谱各不相同;而对于同一准封闭区域,用不同波长的脉冲光激发时出现的频谱也不相同.因此各准封闭区域的模式选择和竞争不仅与各准封闭区域及周围介质的结构有关,还与激发光波长也有密切的关系.随机介质激光现象可看作是随机介质与相匹配的激发光相互作用的

整体散射的结果.

4. 结 论

在一二维随机介质中选取了由颗粒随机分布而形成的四个不同的准封闭区域,用不同波长的脉冲光激发该随机介质,用有限时域差分法模拟计算了在该介质中的能量的分布及随时间的变化,并对各准封闭区域中的能量进行了频谱分析.结果表明在该介质中能量呈局域化的分布,其分布与介质中颗

粒的随机分布有关,并与激发光的波长也有密切的关系.在同一种波长的脉冲光激发下各准封闭区域的频谱各不相同,而对于同一准封闭区域,用不同波长的脉冲光激发时出现的频谱也不相同.当激发波长与准封闭区域的结构参数偏差较大时,这些谱峰会出现此消彼涨的模式竞争现象,而且能量均衰减

得较快,而当激发波长与该结构参数较接近时,各准封闭区域的频谱中存在一个相对稳定的最高谱峰,能量衰减也比较缓慢.由此可见,光场的局域化与介质结构和激发波长均有密切的关系,随机介质激光现象是随机介质与相匹配的激发光相互作用的整体散射效应的结果.

-
- [1] Letokhov V S 1968 *Sov. Phys. J. EPT* **26** 835
- [2] Lawandy N M, Balachandran R M, Gomes A S L, Sauvain E 1994 *Nature* **368** 436
- [3] Cao H, Zhao Y G, Ho S T, Seelig E W, Wang Q H, Chang R P H 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 2278
- [4] Balachandran M, Lawandy N M, Moon J A 1997 *Opt. Lett.* **22** 319
- [5] Wiersma D S, Van Albada M P, Lagendijk A 1995 *Phys. Rev. Lett.* **75** 1739
- [6] Wiersma D S 2000 *Nature* **406** 132
- [7] Burin A L, Ratner M A, Cao H, Chang R P H 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 215503
- [8] Ling Y, Cao H, Burin A L, Ratner M A, Liu X, Chang R P H 2001 *Phys. Rev. A* **64** 063808
- [9] Yao Z G, Zhang X Q, Shang H K, Teng X Y, Wang Y S, Huang S H 2005 *Chin. Phys.* **14** 1205
- [10] Apalkov V M, Raikh M E, Shapiro B 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 016802
- [11] Soukoulis C M, Jiang X, Xu J Y 2002 *Phys. Rev. B* **65** R041103
- [12] Vanneste C, Sebbah P 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 183903
- [13] Liu J S, Liu H, Wang C 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3116(in Chinese) [刘劲松、刘 海、王 春 2005 物理学报 **54** 3116]
- [14] Liu J S, Liu H, Wang C, Lü J T, Fan T, Wang X D 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4123(in Chinese) [刘劲松、刘 海、王 春、吕健滔、樊 婷、王晓东 2006 物理学报 **55** 4123]
- [15] Xie Y M, Liu Z D 2005 *Phys. Lett. A* **341** 339
- [16] Xie Y M, Liu Z D 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 2827
- [17] Wang H Q, Liu Z D 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2281(in Chinese) [王慧琴、刘正东 2006 物理学报 **55** 2281]

The spatial energy distribution and the spectrum characteristics in a two-dimensional random medium^{*}

Wang Hui-Qin^{1,3)} Liu Zheng-Dong^{1,2)†} Wang Bing²⁾

1) *School of Materials Science and Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China*

2) *Nanotechnology Engineering Research Center, Nanchang University, Nanchang 330047, China*

3) *Physics Experiment Center, Nanchang University, Nanchang 330031, China*

(Received 5 December 2007 ; revised manuscript received 21 January 2008)

Abstract

The spatial distributions of energy in a random medium and the spectrum characteristics of some regions in this medium are studied and the results show that the energy is localized in some regions and the spatial distribution of the energy is both related with positions of the particles in the medium and the wavelength of excitation light. And the regions of energy congregation are related with the quasi-closed structures formed from the particles but no one to one correspondence exists between them. Under the stimulating of the same excitation light, different spectra appear in different quasi-closed structures and they change with time. And under the stimulating of different excitation light sources, the spectra of the same quasi-closed structure are different. When the wavelength of excitation light does not match the configuration parameter of a quasi-closed structure, the peaks of its spectrum will change frequently and the energies of the peaks are attenuated quickly. When the wavelength of the light be ther matches the configuration parameter of the quasi-closed structure, a certain peak will retain its leading position in height in the spectrums and its energy attenuate but slowly. So photon-localization is both related with the configuration of medium and the wavelength of excitation light, and the random lasing can be regarded as the result of the general scattering effect of the excitation light by the random medium.

Keywords : laser physics, finite difference time domain method, localization, spectrum characteristics

PACC : 4225, 4260D

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10464002 and 60768001).

[†] Corresponding author. E-mail : lzdgroup@ncu.edu.cn