

光子晶体晶粒尺寸和排列结构对 随机激光辐射特性的影响*

王慧琴^{1)†} 方利广¹⁾ 王一凡²⁾ 余奥列²⁾

1)(南昌大学物理实验中心, 南昌 330031)

2)(南昌大学物理系, 南昌 330031)

(2009年12月29日收到;2010年4月8日收到修改稿)

研究了光子晶体对随机激光器的输出特性的调控,并分析了光子晶体的晶粒尺寸和排列结构等对调控作用的影响.对于同一随机介质而言,上下表面用同种材料不同晶粒尺寸的光子晶体覆盖,结果显示:晶粒尺寸合适的光子晶体会使光在系统中来回振荡从而得到很好的放大,使系统中的光与随机增益介质的相互作用加强,激光阈值降低;同时还对激光模式有较强的调制能力,能在一定程度上抑制自发辐射,使之向所需要的频率内辐射.但如果光子晶体的晶粒尺寸与随机增益介质结构匹配不当,则光子晶体对激光模式调制能力较弱,光场能量不能有效地被局域在系统中,系统中能量消散得较快,系统需要较大的激光阈值.晶粒的排列结构对随机激光输出特性也有一定的影响.因此存在一个最佳的光子晶体/随机介质组合,使随机激光阈值达到一个极小值,为研制低阈值微型激光器提供理论依据.

关键词: 有限时域差分法, 光子晶体, 随机激光, 辐射特性

PACS: 42.25.Dd, 42.55.Ye, 42.55.Zz, 42.60.Da

1. 引言

随机激光被报道后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.为了减小阈值,Zacharakis 等人在 2002 年探讨了随机激光器的双光子抽运方法^[5],他们认为弱的双光子吸收使抽运光能进入到随机介质中更深的地方,从而导致对所发光的更好的约束^[6].Cao 等人提出把某种有序度结合到随机增益介质中去,并使用可变的有序度模拟了随机系统中的激光发射,发现当把无序引入到一个完全有序系统时,激光阈值会下降^[7],换言之,存在一个最佳的有序/无序度组合,使激光阈值达到一个极小值.

上世纪 80 年代以前人们一直认为自发辐射是一个随机的自然现象,是不能控制的.1946 年 Purcell 等人提出自发辐射是可以被人为改变^[8,9],但直到光子晶体的出现人们才接受了这一观点.由

于光子晶体的光子禁带的作用,频率落在光子晶体的禁带中的电磁波的自发辐射可以完全被抑制.光子晶体具有介质的有序性,而无序介质具有介质的随机性,介质的有序性和随机性均对光学特性有重要的影响,有序性直接导致光子禁带的出现^[10],而随机性会导致光子局域化的形成^[11,12].如果能在随机介质激光系统中加入某种光子晶体,使之既能发挥光子禁带的作用,又能利用局域化特点,这将为随机激光的实用化提供一种很好的理论模型.这样一来能大大地降低制备超低阈值激光器的难度.

在前面的工作中我们探讨了随机增益介质的辐射特性及光子晶体对其辐射特性的调控作用^[13-15],本文将深入研究光子晶体的晶粒尺寸、晶格结构等参数对随机增益介质的辐射特性的影响,为研制低阈值微型激光器提供理论依据.

2. 随机增益介质粉末的光场分布

为了研究光子晶体结构参数对随机增益介质

* 国家自然科学基金(批准号:60768001)和江西省自然科学基金(批准号:2007gzw2106)资助的课题.

† E-mail: hqwan@ncu.edu.cn

的辐射特性的影响,我们首先预设一个尺寸为 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 的随机粉末增益介质. 该介质中粉末颗粒的尺寸大约为 300 nm , 颗粒填充密度为 $\varphi_1 = 25\%$, 颗粒的介电常数用复数形式表示, 设其为 $\varepsilon_a = \varepsilon_{a1} + i\varepsilon_{a2}$, 其实部为普通的介电常数, 取 $\varepsilon_{a1} = 5.4$, 其虚部表示介质的增益或色散, 当 $\varepsilon_{a2} < 0$ 时表示介质的增益, 取 $\varepsilon_{a2} = -0.003 \exp[-4(\lambda - \lambda_0)^2 (\Delta\lambda)^{-2}]$, 其中 λ 为波长, λ_0 为增益的中心波长为 385 nm , $\Delta\lambda$ 为增益谱的半高宽; 随机粉末中的基质材料背景材料的介电常数 $\varepsilon_b = 2.75$. 如图 1 所示.

考虑到系统的开放性, 我们采用完全匹配层 (perfectly matched layers, PML) 吸收边界, 对于二维介质, 其 TM 模的有限时域差分 (FDTD) 的基本方

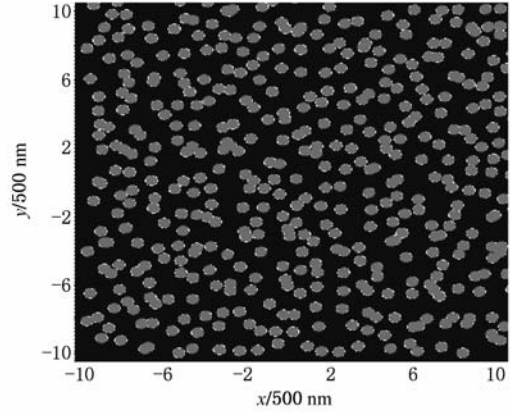


图 1 随机介质结构图

程为

$$H_x^{n+\frac{1}{2}}(i,j) = H_x^{n-\frac{1}{2}}(i,j) - \frac{\Delta t}{\mu} \frac{E_z^n(i,j + \frac{1}{2}) - E_z^n(i,j - \frac{1}{2})}{\Delta y}, \quad (1)$$

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

$$E_z^{n+1}(i,j) = E_z^n(i,j) - \frac{\Delta t}{\varepsilon(i,j)} \left[\frac{H_x^{n+\frac{1}{2}}(i,j + \frac{1}{2}) - H_x^{n+\frac{1}{2}}(i,j - \frac{1}{2})}{\Delta y} - \frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2},j) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i - \frac{1}{2},j)}{\Delta x} \right], \quad (3)$$

式中 $\Delta x, \Delta y$ 分别是计算时所用的介质在 x 和 y 方向上的空间步长, Δt 为时间步长. 取空间步长 $\Delta x = \Delta y = 10 \text{ nm}$, 时间步长 $\Delta t = 2.357 \times 10^{-17} \text{ s}$, 在介质的正中心引入一束时域高斯短脉冲的 TM 偏振光作为激励源, 脉冲持续时间 $t = 500\Delta t$, 即 1.18×10^{-2}

ps, 用 FDTD 法对图 1 所示的无序系统进行其光场分布的数值模拟, 分别获得第 10000, 20000 步 (即 $20t, 40t$) 时的 $|E_z|$ 的空间分布, 结果如图 2(a) 和 (b) 所示. 从图中可以看出在该纯无序的介质中整个空间的光强都比较小, 而且随时间的增加而略有

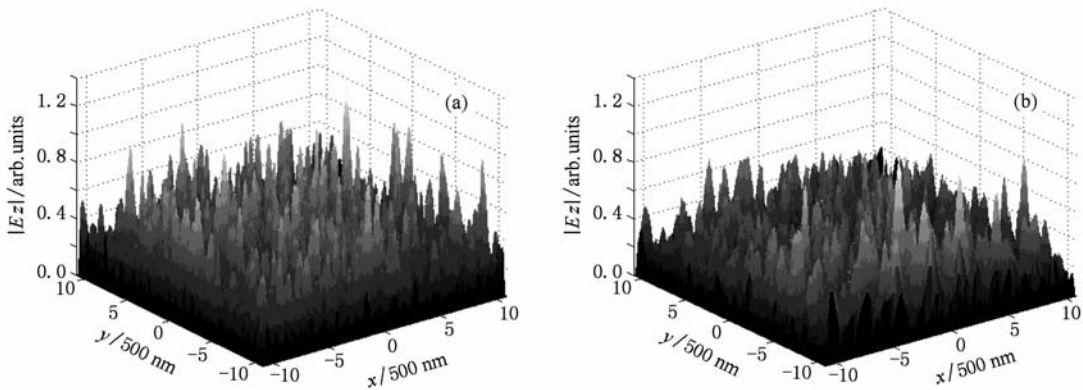


图 2 图 1 介质对应的光场能量的空间分布图

减小,这就说明单纯的粉末局域光的能力有限,只能在较强激发源的激发下才有可能会出现激光现象,激光阈值要求比较高.

3. 不同晶粒尺寸的光子晶体对随机增益介质粉末的辐射特性的影响

为了探讨光子晶体的晶粒尺寸对随机粉末介质辐射特性的影响,现将前面一节的随机粉末介质置于不同的晶粒尺寸的光子晶体薄层中,在同样的条件下研究其光场分布. 这些光子晶体的晶格常数均为 500 nm,介电常数为 2.5,基质材料的介电常数为 11.9,晶粒尺寸分别为 400 nm, 300 nm 和 200 nm,光子晶体中的材料均为非增益介质材料,如图 3 所示.

同样用前面所述的高斯脉冲光束在介质中心

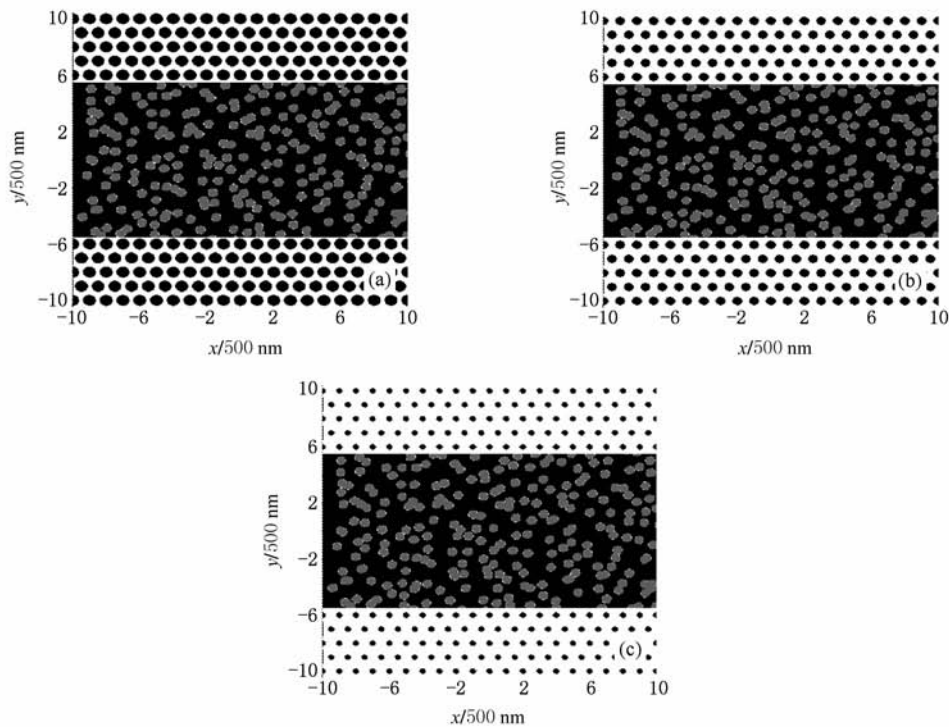


图3 介质结构图 (a),(b),(c)光子晶体颗粒的尺寸分别为 400 nm,300 nm 和 200 nm

在图 4(a) 还出现了一个有趣的现象:在中间的增益介质层能量聚集较少,而上下表面光子晶体中局域了大部分的能量. 而且通过动态观察能量分布时还发现:在激发初期有部分能量从中心位置向外传播,能量在介质的各部分分布也相对均匀;但一定时间后,能量开始逐渐向光子晶体聚集,而且随时间周期性变化,出现周期性振荡现象,这一点在

位置分别对它们进行激发,通过模拟获得它们 20000 步(即 $40t$) 时的光场能量的空间分布图,结果如图 4 所示. 比较它们可以发现:图 3(a),(b),(c) 中间介质层虽然是相同的,但其上下层光子晶体的颗粒尺寸不同,结果也不相同. 图 3(a) 中光子晶体的颗粒比中间发光层的颗粒要大,结果其对应的光场能量非常强,比没有光子晶体时图 2(b) 中的能量强了近万倍,如图 4(a),说明这一晶粒尺寸的光子晶体明显起到了局域光场能量的作用;而图 4(b) 中光子晶体的晶粒和中间发光层的颗粒同样大,结果其对应的光场能量虽然比没有光子晶体时的略强,但比图 4(a) 弱了几个数量级,能量没有被有效地局域在介质中;图 4(c) 中光子晶体的颗粒比较小,同样其光场能量相比没有光子晶体时也略强些,相比图 4(a) 也弱很多,能量也没有被有效地局域在介质中.

后面图 7 中有所体现. 这是一个很有意思的结果,因为只有中间的随机层含有增益介质,而光子晶体中并没有增益介质,最后能量却大部分被局域在光子晶体中,显然这种晶粒尺寸的光子晶体对中间随机层辐射出的光起到了比较大的局域作用. 我们可以这样理解:中间增益层对光进行放大,辐射出的光向外传播时,其中大量的光传播到光子晶体区域后

被局域在光子晶体中而没有向系统外扩散,还有部分光继续滞留在增益层,而局域在光子晶体中的光相当于次光源又有部分会再向增益层中传播,这样光在系统中来回振荡就得到了很好地放大,使系统中光与增益介质的相互作用得到了加强.而在图 4

(b)和(c)中,光场能量的分布又没有出现这种奇特的现象,虽然这两个系统也都有光子晶体,但这两种光子晶体和中间介质层所形成的结构匹配不好,或者说是辐射光的频率与光子晶体的能带匹配不好,使得这两种光子晶体没有取得很好的调制效果.

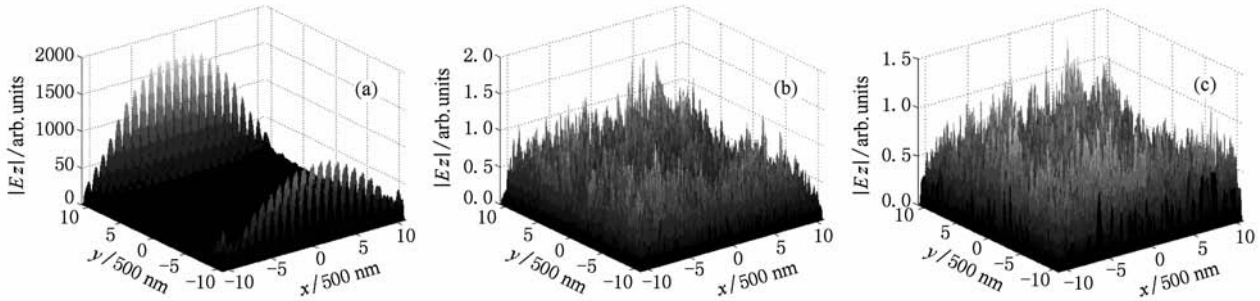


图 4 图 3 各介质对应的光场能量的空间分布图

同时我们还对它们的辐射谱进行了模拟,获得了 20000 步时的辐射谱,结果如图 5 所示.结果显示光子晶体对激光模式也有一定的调制作用,但不同的光子晶体调制能力不同.如图 5 (a)中在约 800 nm 处出现了一个比较强的谱峰,对比纯无序介质的辐射谱可知这个谱峰并非来自于中间的无序介质层,而是与上下表面的光子晶体有关,也就是说光子晶体将无序介质自发辐射的能量调制到光子晶体的振荡频率上,对无序介质的激光模式起到了调制作用;图 5 (b)中谱峰出现在 385 nm 附近,这个谱峰主要来源于中间的无序介质层,上下表面的光子晶体对自发辐射没有起到明显的抑制作用,对激光模式的调制能力弱;而图 5 (c)中光子晶体的谐振波长不明显,从图中看在 1400 nm 与 1800 nm 之间有两个较宽的谱峰,385 nm 附近的谱峰较弱,说明该光子晶体对自发辐射有一定的抑制作用,对激光模式的调制能力也比较弱.

频率为 0.2—0.24 之间存在一带隙,带隙宽度比前一光子晶体的要窄;而图 6 (c)没有出现光子带隙.光子带隙越宽其调制的频率范围越大,能力也就越强,因此图 6 (a)的光子晶体调制能力最强;而图 6 (b)光子带隙较窄,图 6 (c)甚至没有带隙,因此它们的调制作用也就极其有限了.

为了从理论上更好地分析其原因,这里利用能带理论对其进行解释.我们知道光子晶体的调制作用和光子晶体的带隙是密切相关的,而光子带隙不仅与晶体中的介质折射率差有关,也与晶格颗粒的占空比或填充比有关.以上三种光子晶体折射率差虽然是一致的,但晶粒尺寸不同,即占空比不同,因此能带就当然不同.我们用平面波展开法计算了以上三种光子晶体对应的能带结构,如图 6 所示.比较三图可以看出:图 6 (a)在归一化频率为 0.24—0.3 之间存在一带隙,而且带隙最宽;图 6 (b)在归一化

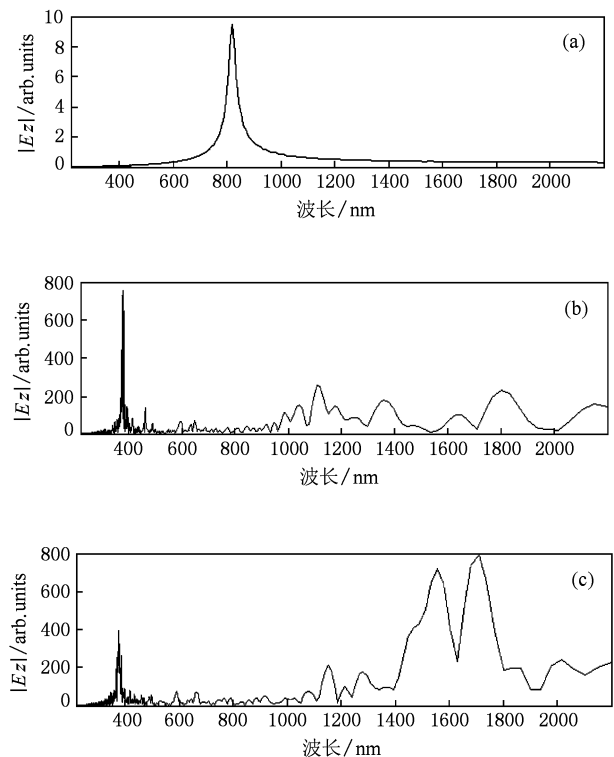


图 5 图 3 各介质对应的辐射谱

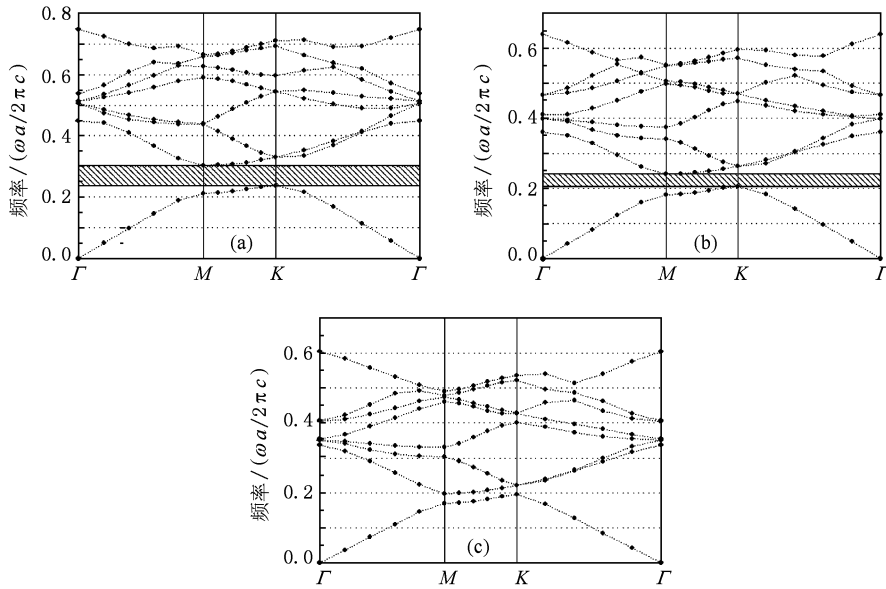


图6 图3中对应的光子晶体能带图

4. 光子晶体的结构类型对辐射特性的影响

下面将探讨不同结构类型的光子晶体对随机粉末辐射特性的影响. 这里列举了两种结构类型的光子晶体: 第一种排列是三角格子, 第二种是四方格子, 这两光子晶体材料参数一致, 只是排列结构不同, 如图7(a), (b)所示. 采用这两种光子晶体去调制同一随机粉末介质, 观察输出特性的变化, 研究光子晶体的结构类型对辐射特性的影响.

用前面所述同样的激励源去激发这两系统, 分

别获得不同时间的输出光场空间分布图, 如图8所示. 其中图8(a), (b), (c), (d), (e), (f)和(g), (h), (i), (j), (k), (l)分别对应于图7(a)和(b)的第 $20t$, $30t$, $80t$, $120t$, $160t$, $200t$ 时刻的光场空间分布图.

从图中可以看出: 在这两种结构的光子晶体的作用下, 随机粉末中的能量以几乎同样的速度和方式随时间变化, 两种光子晶体均起到了局域光场能量的作用, 均能使系统中光与增益介质的相互作用加强. 如图8(a), (b), (c), (d), (e), (f)和(g), (h), (i), (j), (k), (l)中无论是能量的空间分布还是强度大小都非常相似. 在激发初期, 在两介质中各部分的能量分布相对均匀; 而经

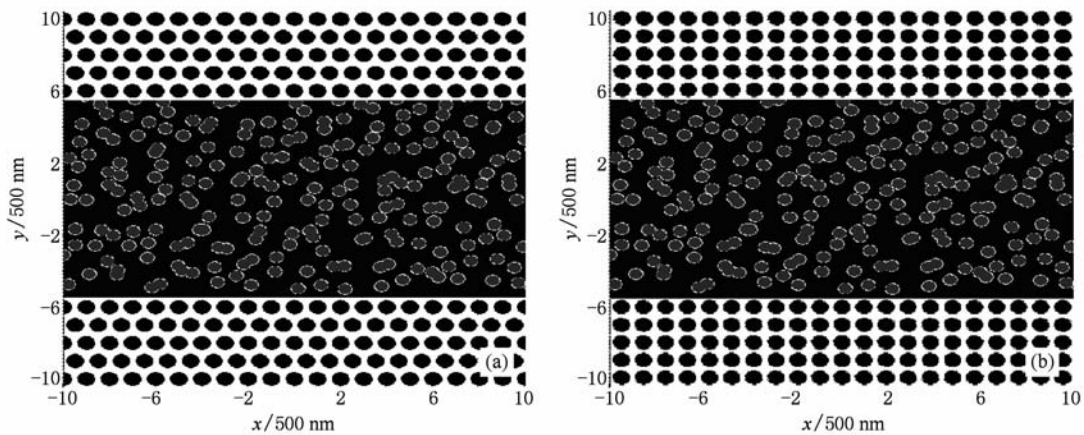


图7 三角格子和四方格子光子晶体中的随机粉末

过了一定时间后,能量开始逐渐向光子晶体聚集,到第 $30t$ 时,能量都已经主要分布在光子晶体中了. 动态观察输出过程时同样都发现:光场分布会出现周期振荡,大约每 500 步完成一次周期振荡. 当然这两种光子晶体对随机介质的调制效果有一些细微的差别:在能量逐渐向光子晶体聚集的过

程中,四方格子的光子晶体聚集略快一些,如在 $30t$ 时 7(b) 中的最大能量为 20 a. u., 而 8(h) 的最大能量达到了近 170 a. u., 因此能量在上下表面的光子晶体之间出现振荡的时间点不一致;振荡周期大体一致,但不完全是同一节奏,这从后面的几幅图可以看出.

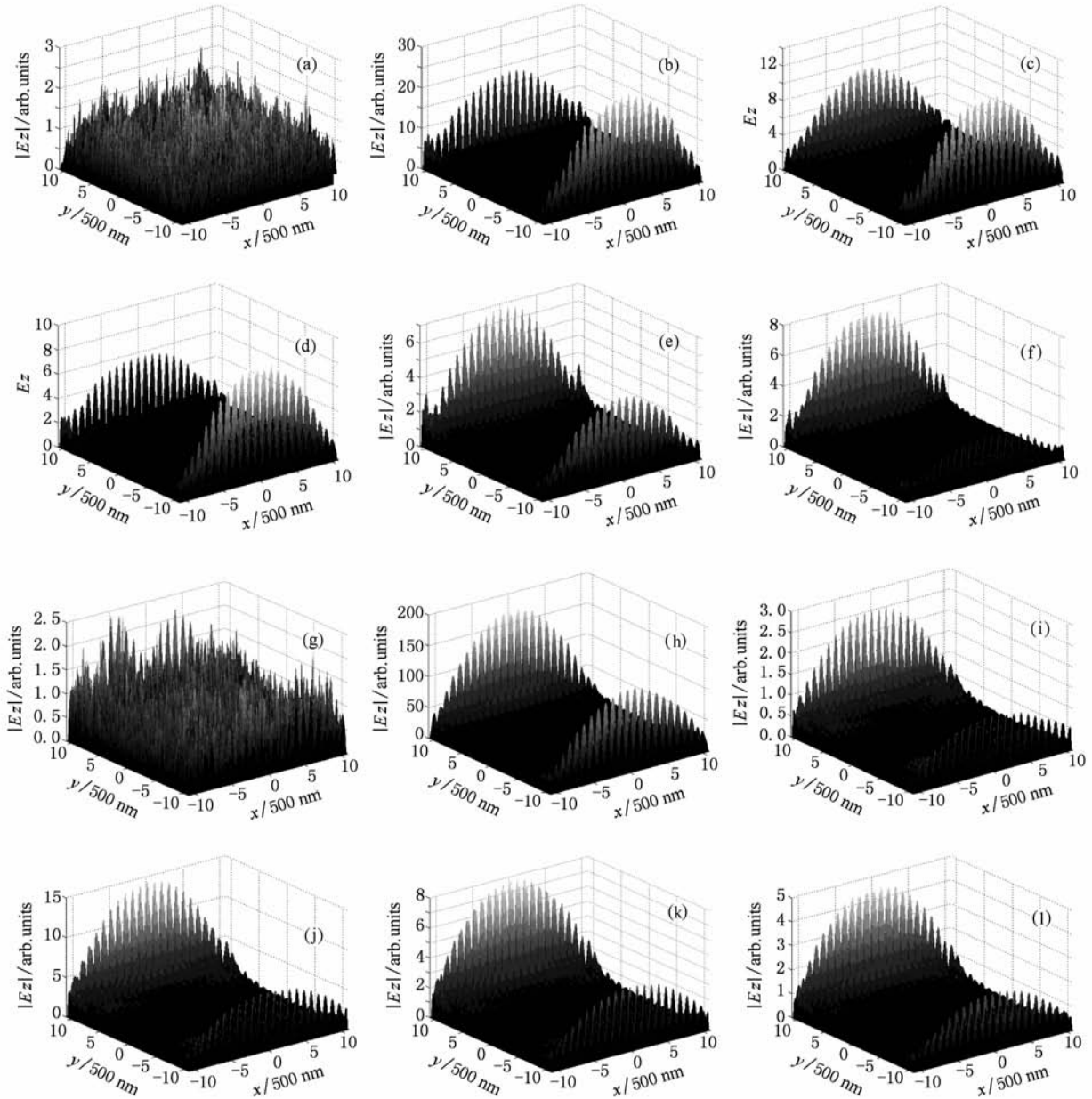


图8 图7各介质不同时间的光场能量的空间分布图 (a),(g) 10000步;(b),(h) 15000步;(c),(i)40000步;(d),(j) 60000步;(e),(k) 80000步;(f),(l) 100000步

同样地,我们对它们的辐射谱也进行了模拟,分别获得了激发后辐射谱强度分布随时间演化图,如图9所示. 从这两组谱也可以发现:两种光子晶体对随机粉末辐射特性的调制作用比较相

似. 如图9(a)和(b)各图无论是谱的结构还是谱的演化过程都非常相似,尤其是越到后面越相似. 当然两组谱还是存在一些不同,如四方格子的光子晶体调制激光模式更快一些,而且谐振波长也

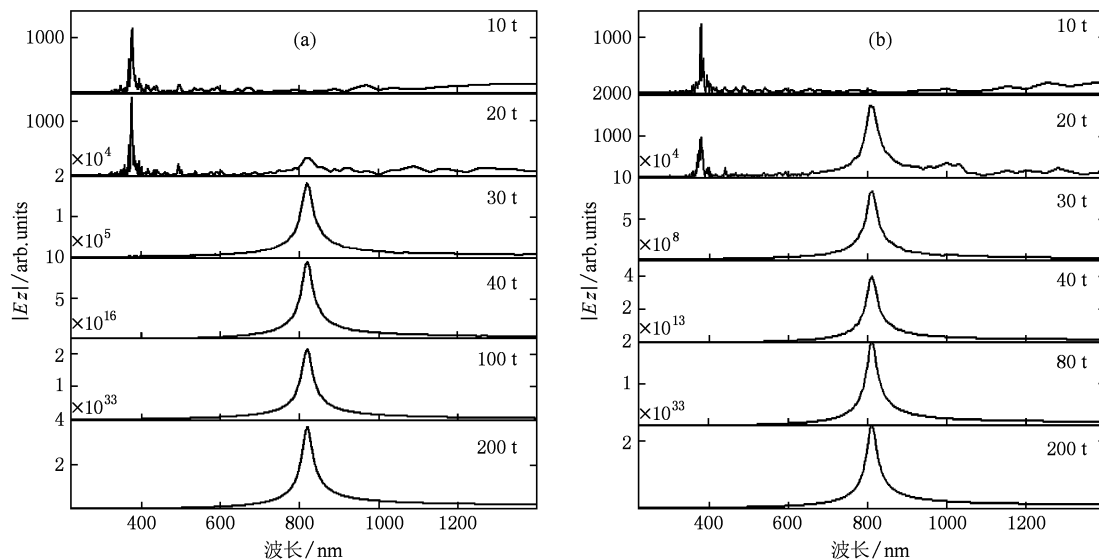


图9 图7各介质不同时间的发射谱

略小一些.

5. 结 论

研究了光子晶体对随机激光器的输出特性的控制,并分析了光子晶体的晶粒尺寸和排列结构等对调控作用的影响.对于同一随机介质而言,上下表面用同种材料不同晶粒尺寸的光子晶体覆盖,结果显示晶粒尺寸对系统的光场的等辐射特性影响很大,晶粒尺寸合适的光子晶体会起到更好的局域光场能量的作用,会使光在系统中来回振荡从而就得到很好的放大,使系统中光与随机增益介质的相

互作用加强,激光阈值降低;同时还对激光模式有较强的调制能力,能在一定程度上抑制自发辐射,使之向所需要的频率内辐射.但如果光子晶体的晶粒尺寸与随机增益介质结构匹配不当,则光子晶体对激光模式调制能力较弱,光场能量不能有效地被局域在系统中,系统中能量消散得较快,系统需要较大的激光阈值.晶粒的排列结构对随机激光输出特性也有一定的影响.总之,利用光子晶体可以对随机激光器的输出特性进行控制,但存在一个最佳的光子晶体/随机介质组合,使随机激光阈值达到一个极小值,这一工作能为研制低阈值微型激光器提供理论依据.

[1] Lawandy N M, Balachandran R M, Gomes A S L, Sauvain E 1994 *Nature* **368** 436

[2] Cao H, Zhao Y G, Ho S T, Seelig E W, Wang Q H, Chang R P H 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 2278

[3] Cao H, Xu J Y, Zhang D Z, Chang S H, Ho S T, Seelig E W, Liu X, Chang R P H 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 5584

[4] Wiersma D S 2000 *Nature* **406** 132

[5] Zacharakis G, Papadogiannis N A, Papazoglou T G 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 2511

[6] Burin A L, Ratner M A, Cao H 2003 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **9** 124

[7] Chang S H, Cao H, Ho S T 2003 *IEEE J. Quantum Electron.* **39** 364

[8] Kleppner D 1946 *Phys. Rev. Lett.* **47** 233

[9] Purcell E M 1946 *Phys. Rev.* **69** 681

[10] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059

[11] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486

[12] Xie Y M, Liu Z D 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 2827

[13] Wang H Q, Liu Z D, Wang B 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2186 (in Chinese) [王慧琴、刘正东、王冰 2008 物理学报 **57** 2186]

[14] Wang H Q, Liu Z D, Wang B 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5550 (in Chinese) [王慧琴、刘正东、王冰 2008 物理学报 **57** 5550]

[15] Wang H Q, Liu Z D 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1648 (in Chinese) [王慧琴、刘正东 2009 物理学报 **58** 1648]

The dependence of radiation characteristics of random laser on the size and arrangement of crystal grains in PCs *

Wang Hui-Qin^{1)†} Fang Li-Guang¹⁾ Wang Yi-Fan²⁾ Yu Ao-Lie²⁾

1) (*Physics Experiment Center, Nanchang University, Nanchang 330031, China*)

2) (*Physics Department, Nanchang University, Nanchang 330031, China*)

(Received 29 December 2009; revised manuscript received 8 April 2010)

Abstract

The modulation on radiation characteristics of random laser caused by photonic crystals (PCs) was studied, and its dependence on the size and arrangement of the crystal grains was analyzed. For a random medium, if it is covered by different photonic crystals on its upper and lower surfaces respectively, its output characteristics should be different. The results showed that the grain size of the PCs has a great effect on the radiation characteristics of the system. The PC with a suitable grain size plays a better role in trapping the energy in the system and it can modulate the laser modes effectively. It leads the light to oscillate back and forth, enhancing the interaction between the random gain medium and the light to achieve a greater amplification, and consequently reduces the lasing threshold. It also controls the spontaneous emission and leads it to the target frequency in the emission spectra. However, if crystal grain size does not match the structure of random gain medium, the laser modes could not be modulated as we wish and the energy of the light field could not be localized effectively in the system, thus the laser system has a higher lasing threshold. The arrangement of crystal grains should affect the output characteristics also. In short, there exists an optimum PC/ random medium combination for lasing, for which the lasing threshold reaches a minimum.

Keywords: finite difference time domain method, photonic crystal, random laser, radiation characteristics

PACS: 42.25.Dd, 42.55.Ye, 42.55.Zz, 42.60.Da

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60768001) and the Natural Science Foundation of Jiangxi Province, China (Grant No. 2007gzw2106).

† E-mail: hqwan@ncu.edu.cn