

# 随机性对部分随机介质激光器阈值的影响<sup>\*</sup>

王 宏<sup>1)†</sup> 欧阳征标<sup>1)†</sup> 韩艳玲<sup>3)†</sup> 孟庆生<sup>1)</sup> 罗贤达<sup>1)</sup> 刘劲松<sup>5)</sup>

1) 深圳大学太赫兹技术研究中心, 深圳大学工程技术学院, 深圳 518060)

2) 成都电子科技大学物理电子学院, 成都 610054)

3) 中国地质大学(武汉)数理系, 武汉 430074)

4) 华中科技大学图像所, 武汉 430074)

5) 华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

(2006 年 7 月 5 日收到, 2006 年 8 月 30 日收到修改稿)

基于速率方程和 Maxwell 方程相结合的模型, 采用时域有限差分法(FDTD)研究了介质的随机性和层数对部分随机介质激光器阈值的影响. 模拟结果显示, 当抽运速率超过阈值时, 出现一个或者多个振荡模. 随机性或者系统的尺度增加时, 振荡模数量也增加. 部分随机介质激光器的阈值在一定的随机强度和层数下将达到最小值, 它与完全随机情况下的结论有所不同. 对所得到的结论给出了物理解释. 这些结果对于制作随机激光器和光集成潜在应用价值.

关键词: 激光物理, 随机激光器, 阈值, 时域有限差分法

PACC: 4220, 4260D, 4265C, 4255

## 1. 引 言

随机激光器是一种新型微腔激光器, 其特殊的形成机理和潜在的应用前景受到了人们的广泛关注<sup>[1-25]</sup>. 但与目前其他几种微腔激光器, 例如光子晶体激光器、带边激光器等相比, 随机激光器的阈值也是较高的. 降低随机激光器的阈值是最近随机激光器研究中的重要课题<sup>[14-19]</sup>.

在传统的激光理论中, 随机性对随机激光的形成是有害, 但随机激光器的产生改变了人们的这一观念. 揭示了随机性有助于激光产生的一面, 即随机性延长了光波在介质中的滞留时间, 有利于光波的放大. 目前的随机激光器理论也都证明了这一点, 但同时随机性对随机激光器有害的一面也是明显的, 例如由于散射颗粒对光波的多重散射, 散射损耗很大, 极大地增加了随机激光器的阈值. 为此人们提出了双光子抽运的方法, 提高介质的吸收, 从而降低随机激光器的阈值, 实验证明该方法是有用的, 但成本很高<sup>[14]</sup>. 另外一种可行的方法是, 控制改变介质的

随机性来降低阈值. Cao 等人提出了这种方法, 并用光子局域化的理论解释了这一方法的可行性, 并用 TMM 法研究了随机性对准态模  $Q$  值的影响. 他们的计算结果证明在部分随机介质值中, 随机激光器的阈值在一定的随机强度下达到最小值<sup>[15]</sup>. Feng 提出了一个理论模型说明部分随机介质中的阈值特性, 认为部分随机介质可以降低随机激光的阈值<sup>[16]</sup>. 这一思路随后被 Miller 等人的实验研究所证明, 他们在一个精心设计的部分随机介质中, 实现了随机激光的低阈值运行<sup>[17]</sup>. 虽然实验中已经在部分随机介质中观测到了低阈值随机激光, 但理论上还不能很好地解释这一现象, 对于随机性对光学特性的影响这一关键问题, 人们还了解得不多, 有待进一步深入研究.

目前的随机激光理论已经证明, 随机激光是由随机介质中的准态模放大形成的<sup>[19]</sup>. 这些准态模是由光在强随机介质中, 折射率的随机起伏导致的光波局域化形成的. 这相当于在介质中, 形成了若干个可称之为准态腔的类光腔结构. 这些类光腔结构同传统光腔一样, 同样能支撑光波模式, 其作用等同于

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号 60471047, 60378001), 广东省自然科学基金(批准号 D4011308), 湖北省自然科学基金(批准号 2006ABA345), 深圳大学科研启动基金(批准号 200647)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: zhouyang@szu.edu.cn

传统激光理论中的冷腔模.当随机介质获得增益并超过阈值后,这些准态模就能被激发为激光模式.介质结构决定准态腔的形成和特性.理论上人们已经对于这些准态模的形成机理、演化过程、品质因素、以及填充率、颗粒半径、边界形态对它影响等问题,进行了详细研究.

本文采用随机激光器研究中广泛采用的数率方程和 Maxwell 方程相结合的模式,用有限时域差分法(FDTD)研究了随机性对随机激光阈值以及功率谱的影响<sup>[9,19]</sup>.模拟结果显示,随机强度和层数制约准态模的数量和阈值.在一定的随机强度和层数下,介质中形成一些低损耗的准态模,这些准态模具有较小的阈值  $P_r$ ,将首先放大形成随机激光.这些结论不但对于研究低阈值随机激光器是有意义的,而且有助于理解随机性对光波传输特性的影响.

## 2. 基本模型

考虑一维随机介质,它由厚度  $a_n$  介电常数  $\epsilon_1$  的增益介质层和厚度  $b$  介电常数  $\epsilon_2$  的非增益层,交替叠合而成.定义增益介质的厚度总和占随机介质长度的比为介质的填充率  $\Phi$ ,它反映了随机介质的散射强弱.增益层的厚度随机变化, $a_n = a_0(1 + w\gamma)$  其中  $a_0$  是介质的平均厚度, $w$  是随机强度, $\gamma$  是变化范围  $[-0.5, 0.5]$  的随机变量.当介质参数  $a_0, \epsilon_1, \epsilon_2, b$  给定后,改变随机强度  $w$  的大小将形成不同的随机介质, $w$  值越大表明介质的随机性越强,反之越弱.如果  $w = 0$ ,系统退化为光子晶体.模拟中我们设定  $\epsilon_1 = \epsilon_0, \epsilon_2 = 4\epsilon_0, a_0 = 300 \text{ nm}, b = 180 \text{ nm}, \Phi \approx 60\%$ .图 1 典型地给出了一个随机介质结构.

需要注意的是,这一系统兼有有限性和随机性的特点.由于这个系统中只有增益层的厚度是随机变化的,而介质层的厚度保持不变,随机性则由增益层厚度的随机变化体现,所以这种介质的无序性是有限的,通常我们称这种介质为部分随机介质.由于结构上这种介质兼有有序和无序的特性,这种介质兼有光子晶体和强随机介质的光学特性,例如光子禁带和缺陷模等,我们这里主要研究其辐射特性.

Jiang 和 Soukoulis 通过将 Maxwell 方程组与速率方程相结合,建立了一个模拟一维强随机介质中随机激光现象的模型<sup>[9,19]</sup>. Maxwell 方程为

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \quad (1a)$$

$$\nabla \times H = \epsilon_0 \epsilon_i \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial t}, \quad (1b)$$

其中  $P$  为极化强度,  $\epsilon_i = n_i^2, i = 1, 2$ . 四能级系统的方程为

$$\frac{dN_3(x, t)}{dt} = P_r N_0(x, t) - \frac{N_3(x, t)}{\tau_{32}}, \quad (2a)$$

$$\frac{dN_2(x, t)}{dt} = \frac{N_3(x, t)}{\tau_{32}} + \frac{E(x, t)}{\hbar\omega_a} \frac{dP(x, t)}{dt} - \frac{N_2(x, t)}{\tau_{21}}, \quad (2b)$$

$$\frac{dN_1(x, t)}{dt} = \frac{N_2(x, t)}{\tau_{21}} - \frac{E(x, t)}{\hbar\omega_a} \frac{dP(x, t)}{dt} - \frac{N_1(x, t)}{\tau_{10}}, \quad (2c)$$

$$\frac{dN_0(x, t)}{dt} = \frac{N_1(x, t)}{\tau_{10}} - P_r N_0(x, t), \quad (2d)$$

这里  $P_r, E(x, t)$  分别是抽运速率和电场强度,  $\tau_{32}, \tau_{21}, \tau_{10}$  分别是第 3, 2, 1 能级的寿命,  $N_3, N_2, N_1, N_0$  是各能级的粒子数.  $N_2, N_1$  能级又叫做上、下激光能级,电子首先由基态  $N_0$  跃迁到  $N_3$ , 然后无辐射跃迁到  $N_2$  态,然后由上激光能级  $N_2$  跃迁到下激光能级  $N_1$  形成受激辐射,最后由  $N_1$  能级返回到基态  $N_0$ . 辐射光的中心频率  $\omega_a = (E_2 - E_1)/\hbar, E_2, E_1$  是能级能量.极化强度  $P$  满足如下公式:

$$\frac{d^2 P(t)}{dt^2} + \Delta\omega_a \frac{dP(t)}{dt} + \omega_a^2 P(t) = \kappa \Delta N(t) E(t), \quad (3)$$

其中  $\Delta N = N_2 - N_1$  是单位体积激光上下能级的粒子数差值,  $\Delta\omega = 1/\tau_{21} + 2/T_2$  为原子辐射光谱线宽为  $T_2$  为原子的碰撞时间,  $\kappa$  为常量,满足  $\kappa = 6\pi\epsilon_0 c^3/\omega_a^2 \tau_{21}, c$  是真空中光速.当  $\Delta N < 0$  时,在外部抽运的作用下出现了粒子数反转,可以对入射光进行放大.

当随机介质给定后,采用 FDTD 方法数值求解方程组(1a)(1b)(2a)–(2d)以及(3),我们可以数值求解随机介质内的电场强度和磁场强度, Fourier 变换后,就可以得出随机激光器腔内存在模式的分布和频谱特性.这个系统能够反映模式的空间分布、频谱特性以及模式饱和、竞争和阈值等放大特性,已经在随机激光器的研究中广泛采用.我们这里也采用这一模型,计算不同随机介质的阈值.这个模型可以自然的扩展到二维随机介质,但出于计算量的考虑,我们这里限于研究一维随机介质,二维随机介质的阈值特性有待进一步研究.模拟中以上方程的参

数为

$$T_2 = 2 \times 10^{-14} \text{ s}, N_0 = \sum_{i=1}^4 N_i = 3.313 \times 10^{24} \text{ m}^{-3},$$

$$\tau_{10} = 5 \times 10^{-12} \text{ s}, \tau_{21} = 10^{-10} \text{ s}, \tau_{32} = 10^{-13} \text{ s},$$

$$f_a = \omega_a / 2\pi = 6.45 \times 10^{14} \text{ Hz}.$$

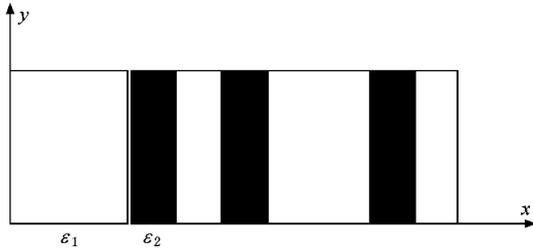


图 1 一维随机介质模型. 模拟中  $\epsilon_1 = \epsilon_0$ ,  $\epsilon_2 = 4\epsilon_0$ ,  $a_0 = 300 \text{ nm}$ ,  $b = 180 \text{ nm}$ ,  $\Phi \approx 60\%$

### 3. 模拟结果和讨论

#### 3.1. 随机性对功率谱的影响

为了在初始时刻激发系统, 采用一个具有任意振幅的 Lorentz 脉冲作为激励源<sup>[9]</sup>. 空间步长和时间步长分别为  $\Delta x = \Delta y = 10 \text{ nm}$  和  $\Delta t = \Delta x / (2c) \approx 1.67 \times 10^{-17} \text{ s}$ . 以空间步长为间隔将介质划分成许多小方格, 在某时刻  $t$ , 将所有格点处的  $E_z$  值相加, 就能得到  $t$  时刻随机介质的辐射功率的频谱分布, 我们称之为功率谱. 给出不同时刻的功率谱, 就能分析出准态模的频谱时间演化特性. 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<sup>[21]</sup>.

为了与  $\text{TiO}_2$  染料激光实验相对应, 我们集中讨论了频率为 400—800 THz 波段内功率谱的演化特性. 图 2 显示了  $P_r = 0$  不同随机强度下随机介质的功率谱. 从中可以看出, 随机性的强弱变化导致功率谱发生改变, 表现为功率谱中谱线的多少、位置发生改变, 一些谱线消失了, 一些光谱线产生了, 这些变化是随机的, 没有一个确定的规律, 但我们发现, 随机强度较小时, 功率谱的变化较大, 随机强度较大时, 功率谱趋于稳定, 谱线的数量趋于饱和. 功率谱中的谱线显示了随机介质中准态腔的共振频率, 谱线的产生和消失反映了准态模的变化特性.

模拟结果显示, 随机性<sup>③</sup>约着介质中微腔的数

量. 随机性比较小时, 系统接近于没有缺陷的理想光子晶体, 没有缺陷模式出现; 当随机性增加时, 光子晶体内部出现缺陷, 从而产生缺陷模, 每个缺陷模对应一条谱线, 在一定范围内, 随机性越大, 符合局域条件的缺陷模越多; 当随机性超过一定范围时, 所有符合局域条件的缺陷模均已经出现, 这时缺陷模的数量就不会再继续增加了.

另外, 我们研究了随机介质的尺度大小对功率谱的影响. 为了研究介质尺寸的增加对功率谱的影响, 我们采取下列方法形成随机介质. 首先设计了一个随机介质, 截取其中的一部分, 去除其余的部分就构成一个随机介质, 然后逐步增加截取部分的尺寸, 就可以形成一系列不同大小的随机介质. 这样形成的随机介质除了增加部分, 其余部分的内部结构是完全一样. 采用以上介质, 可以区分出原介质和增加部分两种不同因素对功率谱的影响, 确定介质的增加导致的功率谱的变化. 图 3 显示了不同介质尺度下电场的功率谱. 从中可以看出, 介质尺度的改变导致功率谱发生改变, 表现为随着介质尺寸的增加, 功率谱中谱线的数量随之增加, 呈现出一种随介质尺寸累积增加的规律. 但和图 2 相似的一点是, 随着尺寸的进一步增加, 光谱的数量也趋于饱和了. 模拟结果说明, 随机介质的大小同样影响微腔的数量. 一定的尺度范围内会形成一定数量的局部谐振模式, 当尺度增加时, 会有机会产生更多的局部谐振模式, 但是当尺度继续增加时, 所有的符合条件的模式均已经出现, 这时谐振模式的数量就不会再增加了.

综合考虑图 2、图 3 中各因素, 我们认为随机介质中存在多个准态模, 构成一个准态模族, 族的大小决定于随机性的强弱和介质的大小, 并在一定限度中随随机性强度和尺度的大小而增加, 但进一步增加随机性的强弱和尺度的大小, 准态模的数量趋于饱和, 族的大小趋于稳定.

根据随机激光理论, 准态模形成于多重散射导致的光子局域化. 加强随机强度和增加尺寸将导致散射微粒对光波的多重散射增强, 从而减小光波的损耗. 这意味着改变随机性的强弱和介质的大小, 将可能导致阈值的降低. 理论上已经证明, 对于某个确定的随机介质, 不同的准态模具有不同的空间分布和品质因素, 某个模式具有最低的阈值. 如果我们合理的调整介质的随机性, 和增加介质尺度, 将可能导致最低阈值进一步降低. 下面详细讨论这个问题.

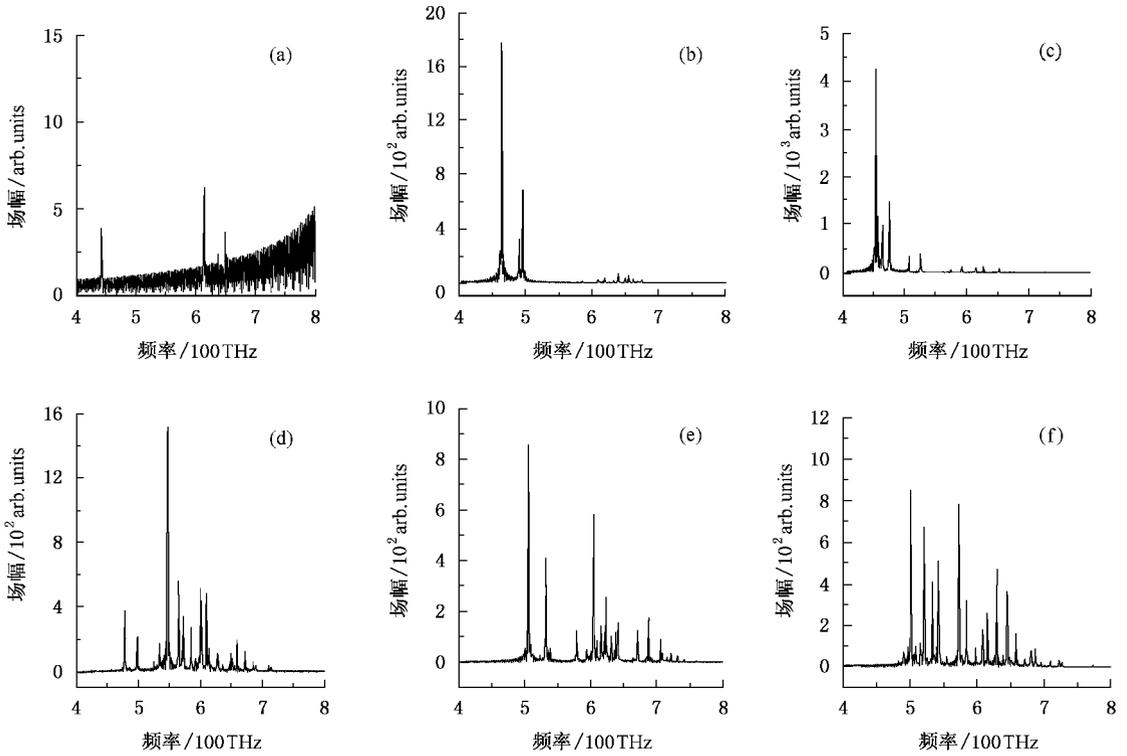


图2 不同随机强度下的功率谱,层数  $n_{\text{cell}} = 80$  (a)  $w = 0.2$  (b)  $w = 0.4$  (c)  $w = 0.5$  (d)  $w = 0.7$  (e)  $w = 1.4$  (f)  $w = 1.8$

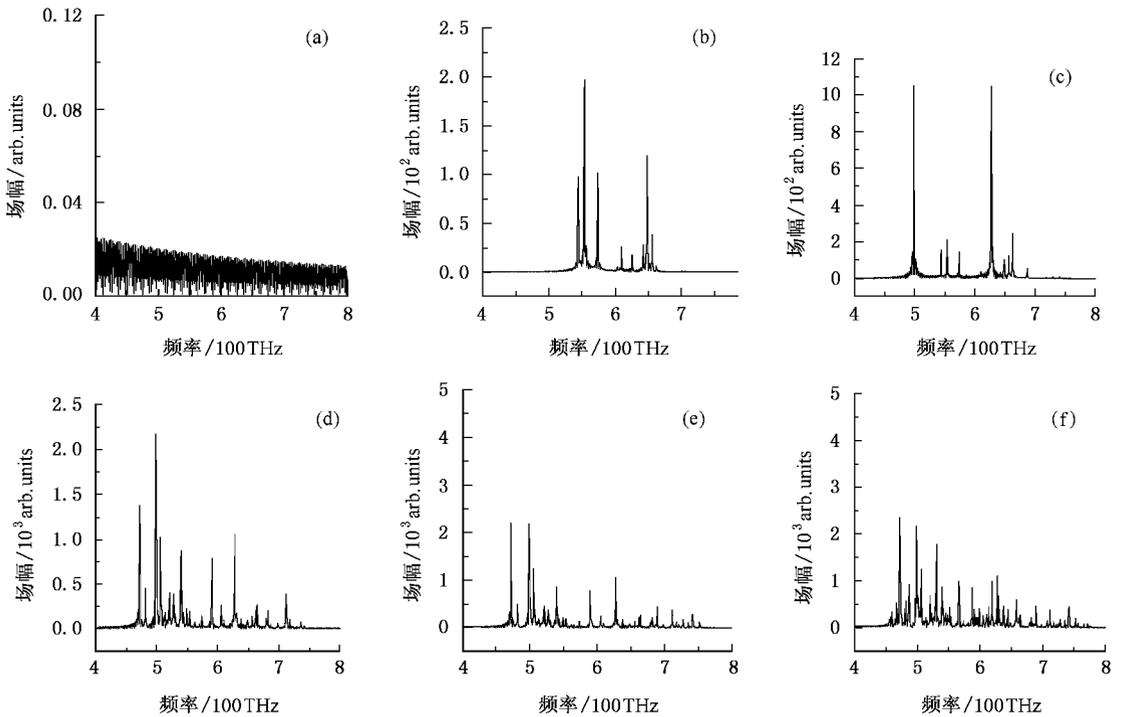


图3 不同介质尺度下的功率谱,随机强度  $w = 1.4$ ,层数  $n_{\text{cell}}$ (a) 20 (b) 40 (c) 60 (d) 100 (e) 120 (f) 180

### 3.2. 随机性对阈值特性的影响

下面考虑不同的增益水平下( $P_r > 0$ ),随机介质的频谱特性.首先计算不同抽运速率 $P_r$ 下随机介质的频谱特性,确定随机激光器的最低阈值.然后改变随机强度 $w$ ,研究随机强度的改变对阈值的影响.

为了确定准态模的最低阈值,首先一个明显的方法是根据这些准态模的衰减特性确定其 $Q$ 值,但由于准态模数量巨大,逐个研究每个准态模是一项艰巨的任务.另外利用增益选模的方法也可以确定最低阈值.因为位于增益曲线中心的模式将获得更多的增益,所以我们可以采用移动 $\omega_a$ 的方法来激发不同的模式.为了确定最小阈值,我们在400—800 THz范围内移动 $\omega_a$ 的位置,由于增益曲线的半宽度 $\Delta\omega = 100$  THz,所以只有部分准态模落在增益曲线内.在这个频谱范围内,首先给定一个较小的抽运速率 $P_r$ ,然后逐步增加抽运速率 $P_r$ ,直到频谱图中出现一个线宽很窄的峰值,这时的抽运速率 $P_r$ 就是这个区域的最低阈值 $P_{th}$ .通过这个方法可以确定多个不同频谱范围内的最低阈值 $P_{th}$ ,其中的最小值就是最低阈值.图4显示了不同抽运速率 $P_r$ 下的频谱图,当 $P_r$ 较低时,频谱图中没有尖锐峰值出现,类似于一般的噪声,说明 $P_r$ 低于准态模的损耗,没有准态模谐振,当 $P_r$ 远大于阈值时,多个频谱峰出现在频谱图中,说明 $P_r$ 大于多个准态模的损耗,多个准态模产生谐振.但 $P_r$ 等于最低准态模的阈值时,仅有一个频谱峰值出现,说明仅有损耗最小的准态模达到了阈值,产生谐振,其他模式没有达到阈值,没有谐振.这种增益选模的方法在激光物理中已有详细的讨论.

采用以上方法,我们计算了不同随机介质中的最低阈值.图5显示了不同随机强度下阈值的演化规律,从图中可以看出,随机强度 $w$ 在(0.2—0.5)时,对随机激光阈值的影响最大,阈值迅速减小.但当随机强度 $w > 0.5$ ,随机强度对阈值已影响不大,随机激光器的阈值上下波动,趋于稳定,达到了最小值.图6显示了不同介质层数下阈值的演化规律.从图中可以看出,图6显示了和图5类似的演化规律,随着介质层数的增加,阈值降低,并且逐步趋于饱

和.具体的,层数 $N < 80$ 时,层数增加,阈值迅速减小,层数明显影响随机激光的阈值, $N > 80$ ,随机激光的阈值趋于饱和,影响已经不明显.该结论与以前得到的有所不同,这主要是因为我们讨论的是部分随机介质的情况,随机性是有限的,不同于以前讨论的完全随机介质<sup>[15]</sup>.

结合图2、图3,我们可以分析图5、图6的形成原因.首先,当随机强度比较小时,所讨论的结构接近于理想无缺陷的周期结构光子晶体,在这种情况下,不会出现准态模,也就是说不会形成谐振腔,从而不会产生激光振荡.而介质层数较少时会因为多重散射较弱,同样不会形成谐振腔,产生激光振荡.其次,当随机强度较强和介质层数增加时,相当于在光子晶体内部出现了许多缺陷,从而产生许多缺陷模式,产生低阈值模式的概率增大.由于随机性的缘故,这些模式是多样化的,其阈值也是不同的,但由于多重散射增强,多数准态模的损耗减少,其中的最低阈值也同样降低.最后,当随机强度进一步增强时,一方面导致局部谐振结构不太理想,另一方面导致杂散模式增加,与主振荡模竞争,这些都会导致激光振荡的阈值增加,使激光器的输出特性变差.此外,层数的增加会提高反射率,从而会降低阈值,但是反射率的最大值为1,会趋于饱和,所以阈值不会无限降低.因此,当介质层数增加到一定值时,作用就不明显了.这个结论对于周期性介质成立,对于随机介质也成立.

以上特性对于优化随机激光器的阈值是有参考价值的.根据模拟结果,随机介质的最小阈值可能出现在随机强度 $w > 0.5$ 的部分随机介质中,进一步增加随机性已经没有实际的意义,而且进一步考虑到增加随机性导致的对抽运光的强烈散射的负面作用,随机强度值不能太大,随机强度值应该在0.5—0.8范围内.在这种情况下,随机介质的禁带结构仍然存在,抽运光从通带附近入射到介质中,将受到较少的散射,渗透到介质更深的位置,有效的被介质吸收,从而降低激光阈值.此外,在部分介质中,随着介质层数的增加,激光器的阈值会下降,但是当介质的层数增加到一定值后,阈值趋于稳定.这一结果意味着随机激光可以在更小的介质体积中实现.这在未来的光子集成中,无疑能够满足现代光学器件高度集成化的要求,具有潜在的优势.

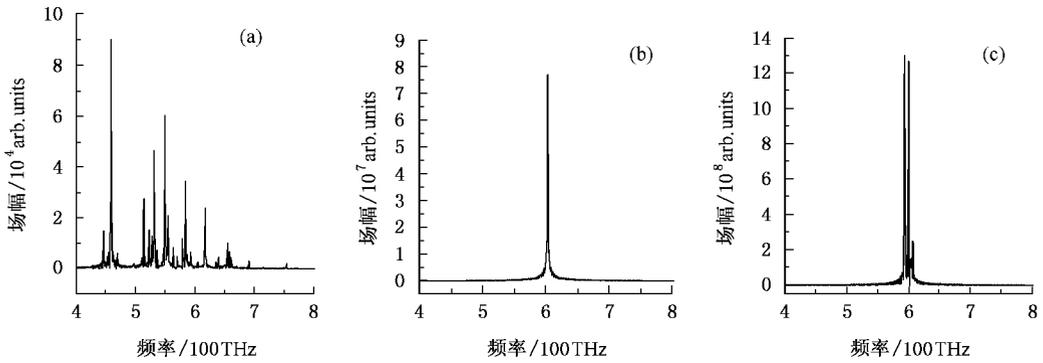


图4 不同光学增益条件下随机介质的功率谱(随机强度  $w = 0.6$ , 介质层数  $n_{\text{cell}} = 80$ ) (a)  $p_r = 5 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$  (b)  $p_r = 2 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$  (c)  $p_r = 1 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$

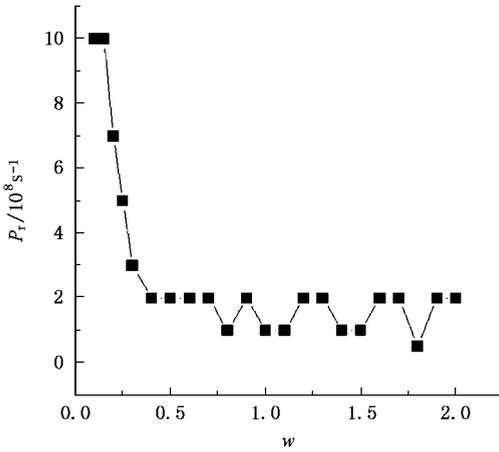


图5 随机激光阈值和随机强度的关系(介质层数  $n_{\text{cell}} = 80$ )

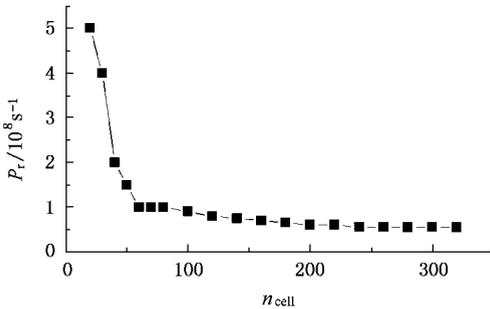


图6 随机激光阈值和介质层数  $n_{\text{cell}}$  的关系(随机强度  $w = 1.4$ )

## 4. 结 论

对称性和随机性对传输特性的影响历来是一个涉及多个学科的基本课题,引起了人们的广泛兴趣.对这个问题的研究已经取得了很多成果.例如在电子学领域,对称性的研究形成了能带结构理论,而随机性研究导致了 Anderson 局域化理论的建立.同样的,由于光子和电子的类似性,在光子的研究中也发现了类似的现象,例如介质结构的对称性导致了光子禁带的形成,而随机性和缺陷的引入将导致局域态的形成.这些理论成果加深了人们对复杂介质中电磁波传播特性的认识,但作为一个新领域,仍然有很多值得研究的问题.具体的就随机性和对称性的研究进展而言,无论是电子还是光子,人们对于对称性导致的光学特性已经有了深刻的认识,相关理论日益成熟和完善,而对于随机性导致的光学特性的研究还远远不够.我们用 FDTD 法计算了不同随机介质中准态模的阈值特性.模拟结果显示随机性和介质层数影响随机激光器的阈值.通过调整随机强度和介质的层数,可以有效的降低随机激光器的阈值.我们的模拟结果对于理解随机激光器的阈值特性以及随机性对光学特性的影响都是有意义的.

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

[2] Wiersma D S, van Albada M P, Lagendijk A 1995 *Phys. Rev. Lett.* **75** 1739

[3] Wiersma D S, Lagendijk A 1996 *Phys. Rev. E* **54** 4256

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

[5] Pradhan P, Kumar N 1994 *Phys. Rev. B* **50** 9644

[6] Cao H, Zhao Y G, Ho S T, Sellig E W, Wang Q H, Chang P H

- 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 2278
- [ 7 ] Cao H , Xu J Y , Zhang D Z , Chang S H , Ho S T , Sellig E W , Liu X , Chang R P H 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 5584
- [ 8 ] Frolov S V , Vardeny Z V , Yoshino K , Zakhidov A , Baughmen R H 1999 *Phys. Rev. B* **59** R5284
- [ 9 ] Jiang X Y , Soukoulis C M 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 70
- [ 10 ] Cao H , Jiang X Y , Ling Y , Xu J Y , Soukoulis C M 2003 *Phys. Rev. B* **67** 161101
- [ 11 ] Soukoulis C M , Jiang Xunya , Xu J Y , Cao H 2002 *Phys. Rev. B* **65** 041103
- [ 12 ] Ling Y , Cao H , Burin A L , Ratner M A , Liu X , Chang R P H 2001 *Phys. Rev. A* **64** 063808
- [ 13 ] Zhang Z Q 1995 *Phys. Rev. B* **52** 7960
- [ 14 ] Burin A L , Cao H , Ratner M A 2003 *IEEE Journal of Selected Topic in Quantumelectronics* **9** 124
- [ 15 ] Chang S H , Cao H , Ho S T 2003 *IEEE Journal of Quantumelectronics* **39** 364
- [ 16 ] Feng Y , Ueda k I 2004 *Optics Express* **12** 3307
- [ 17 ] Milner V , Genack A Z 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 073901
- [ 18 ] Burin A L , Ratner M A , Cao H , Chang S H 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 093904
- [ 19 ] Sebbah P , Vanneste C 2002 *Phys. Rev. B* **66** 144202
- [ 20 ] Wu X H , Yamilov A , Noh H , Cao H , Seelig E W , Chang R P H 2004 *Optics B* **21** 159
- [ 21 ] Berenger J P 1996 *IEEE Trans. Antennas and Propagation* **51** 110
- [ 22 ] Liu J S , Wang H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 4224 ( in Chinese ) 刘劲松、王宏 2004 *物理学报* **53** 4224
- [ 23 ] Wang H , Liu J S 2004 *Acta Optic. Sin.* **24** 793 ( in Chinese ) 王宏、刘劲松 2004 *光学学报* **24** 793
- [ 24 ] Han Y L , Wang H 2003 *Acta Photon. Sin.* **32** 1405 ( in Chinese ) [ 韩艳玲、王宏 2003 *光子学报* **32** 1405 ]
- [ 25 ] Wang H , Liu J S 2005 *Journal of Modern Optical* **52** 1309

## Effect of the strength of randomness on lasing threshold in one-dimensional partially random media \*

Wang Hong<sup>1)2)</sup> Ouyang Zheng-Biao<sup>1)†</sup> Han Yan-Ling<sup>3)4)</sup> Meng Qing-Sheng<sup>1)</sup> Luo Xian-Da<sup>1)</sup> Liu Jin-Song<sup>5)</sup>

1) *Center of THz Technology of Shenzhen University, College of Engineering and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China*

2) *University of Electronic Science and Technology of China, School of Physical Electronics, Chengdu 610054, China*

3) *Mathematics & Physics Department, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*

4) *State Education Commission Laboratory for Image Processing & Intelligent Control, Institute of Artificial Intelligence, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China*

5) *State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*

( Received 5 July 2006 ; revised manuscript received 30 August 2006 )

### Abstract

Based on the model of the Maxwell's equations coupled with the rate equations of electronic population, the lasing threshold of optical modes in partially random media is analyzed using the finite difference time domain method. The characteristics of random laser can be described by some factors, such as the strength of randomness, size of medium etc., which determine the lasing threshold in random medium. The simulated results show that one or more lasing modes appear when the pumping rate  $P_r$  increases beyond the threshold, and the number of modes will increase with random strength and size of medium. In addition, the simulated results demonstrate that the lasing threshold value will attain the minimum value under certain random strength and size of medium, which is at variance with the theoretical result in one-dimensional completely random medium. Such properties of the medium show potential advantage in future application for optical integration.

**Keywords** : laser physics, random lasers, lasing threshold, finite difference time domain method ( FDTD )

**PACC** : 4220, 4260D, 4265C, 4255

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 60471047, 60378001 ), the Natural Science Foundation of Guangdong Province, China ( Grant No. 04011308 ), the Natural Science Foundation of Hubei Province, China ( Grant No. 2006ABA345 ) and Project 200647 by SZU R/D Fund

† E-mail : zhouyang@szu.edu.cn