

随机光纤激光器中光纤与随机介质匹配问题的研究*

王慧琴^{1)2)†} 龚旗煌²⁾

1) (南昌大学理学院基础物理实验中心, 南昌 330031)

2) (北京大学物理学院人工微结构与介观物理国家重点实验室, 北京 100871)

(2013年5月14日收到; 2013年7月24日收到修改稿)

降低阈值是随机激光实用化的前提, 随机光纤激光器是将随机增益介质填充到空芯光子晶体光纤中利用其光子禁带来降低阈值的一种随机激光器. 理论分析表明: 在光子晶体光纤光子禁带的约束下, 随机光纤激光器中的大部分能量被集中在芯区传播, 这使局域在芯区的光与随机介质相互作用得到增强, 激发效率得以提高. 然而, 光纤填充介质后, 纤芯等效折射率发生了改变, 光子带隙也会随之移动, 因此当选用带隙光纤来降低阈值时, 只考虑光纤本身的带隙是不够的, 应考虑到介质的增益频率和填充后的光子带隙之间的匹配问题, 合理选择光纤或介质的材料, 如果匹配得当, 光子禁带对激光的调控能力会更强, 激光阈值有望得到更大程度的降低.

关键词: 随机激光, 光子晶体光纤, 光子禁带, 阈值

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

DOI: 10.7498/aps.62.214202

1 引言

随机激光被报道后引起了人们的广泛关注^[1-5], 它微小的尺寸、低廉的成本和无需外腔的简单结构一直是人们所期望的微型激光器的特点. 但传统的随机激光阈值较高, 这使其实用化困难, 因此降低阈值成了随机激光实用化的前提. 目前人们提出的降低阈值的方法大部分是建立在提高抽运成本或复杂的制备工艺上, 难以低成本地解决无序介质激光的阈值高的问题. 如 Zacharakis 等人提出的双光子抽运法就是建立在提高成本抽运的基础上的^[6]; Cao 等人提出把某种有序度结合到随机介质使阈值下降的有序无序结合法在工艺上难以实现^[7]; Dice 等人用 Ag 纳米颗粒置于若丹明染料溶液中, 在低阈值的情况下观察到了相干反馈激光^[8], 随后张新平的课题组用 Au 纳米岛来降低随机激光的阈值^[9], 但这些利用金属纳米结构降低阈值的研究目前都只在溶液或薄膜等开放系统上进行的, 若要做成微型激光器件, 由于金属纳米颗

粒的局域表面电磁场增强效应, 会不会出现样品烧伤等问题还有待研究

2006 年我们提出了用光子晶体来调控随机激光的辐射特性并降低其阈值的方案, 并通过数值模拟论证了其光子禁带可抑制自发辐射降低激光阈值这一理论^[10-12]. 2007 年 Matos 课题组将 PCF 应用到随机激光系统中, 将悬浮有 250 nm 的 TiO₂ 颗粒的若丹明溶液注入到一个空心的光子晶体光纤 (PCF) 中, 制备出了第一个随机光纤激光器 (RFL)^[13], 与一般的随机激光相比, 激光效率至少提高了 2 个数量级; 之后 Zhang 课题组也进行了相关的实验研究^[14]. 由于 PCF 的制备工艺已比较成熟, 相比而言, 在诸方法中使用 PCF 来降低阈值是易于实现的一种方案. 但目前人们尚未展开对光纤结构和随机介质材料之间的匹配问题的深入分析和详细讨论, 人们无法从中获取其基本规律. 本文在充分研究随机激光特性的基础上^[15-17], 将就 PCF 对随机增益介质辐射特性的影响问题上做深入的研究, 为研制低阈值随机光纤激光器提供一种理论依据.

* 国家自然科学基金 (批准号: 61168001)、江西省自然科学基金 (批准号: 2010gzw0045) 和江西省教育厅科技项目 (批准号: GJJ11365) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: hqwan@ncu.edu.cn

2 PCF 降低随机激光阈值的理论基础

PCF 具有无穷单模传输、高非线性、大模场面积、色散可控等优良的光学特性^[18-20], 为高功率激光器的实现提供了新的途径. RFL 就是将随机增益介质填充到空芯的 PCF 中利用 PCF 的光子禁带来约束随机激光输出的随机激光器. PCF 对应的光子禁带具有选模作用, 使落在光子禁带中的自发辐射模被抑制, 而被激发的激光模获得更多的能量, 从而达到降低激光阈值的目的. 从物理图像上看就像将光限制在一个柱形谐振腔中, 使光与随机增益介质反复相互作用, 因此激发效率就得到了提高, 激光阈值就下降了.

下面首先考察没有损耗的理想情况下 PCF 对随机增益介质激发效率的影响. 以 NKT Crystal Fibre A/S 公司的 HC-1550 型光纤的参数为依据, 设有一空芯 PCF, 其包层的空气孔呈三角形排列, 光纤材料为 Si, 取其介电常数 $\epsilon_{F1} = 11.4$, 空气孔间的间距为 $4 \mu\text{m}$, 孔径为 $3.5 \mu\text{m}$; 纤芯的大空气孔直径为 $12 \mu\text{m}$, 空气的介电常数 $\epsilon_{F2} = 1$. 在此光纤的纤芯填入悬浮有散射颗粒的激光染料溶液, 颗粒随机分布, 尺寸为 200 nm , 颗粒的填充率约为 0.03 , 设散射颗粒材料为 ZnO, 介电常数 $\epsilon_{R1} = 5.4$. 为模拟颗粒的随机分布, 我们引入随机函数, 设 (x, y) 是各散射颗粒的中心位置, 令 $x = ix_0 + \alpha\eta_x$, $y = jy_0 + \beta\eta_y$, 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 x, y 方向上相邻颗粒之间的平均间隔, 取 $1 \mu\text{m}$, η_x, η_y 是满足正态分布在 $[-1, 1]$ 范围内的随机数, α, β 为可调系数, 表示颗粒在 x, y 方向上的空间涨落, 取 0.3 . 增益介质溶液介电常数 $\epsilon_{R2} = 2.4 - i * 0.003 \exp[-4(\omega_0/\omega)^2(\omega - \omega_0)^2/(\Delta\omega)^2]$, 其虚部表示介质的增益, 其中 ω 为频率, ω_0 为增益的中心频率, $\Delta\omega$ 为谱线宽, 如图 1(a) 是模拟的此二维系统截面介电常数分布图.

引入一束时域高斯短脉冲光作为激励源从光纤芯区抽运, 设激发光以归一化频率 $\omega_0 = 0.36$ 为中心高斯输出, 在 TE 模式下用有限时域差分法对光纤截面的光场空间分布进行模拟, 探测图 1(a) 中芯区中心点 A 和包层外围某点 B 的能量随时间的变化, 所用的时间步长 $\Delta t = 2.357 \times 10^{-17} \text{ s}$, 模拟结果如图 1(b) 所示, 图的上半部分是包层外围某点能量随时间的变化, 下半部分是纤芯中心点能量随时间的变化, 其中插入的三张小图分别是三个阶段的局部放大图. 从图中可以看出: 在激发初期, 如

从 0 到 5000 步, 光纤的芯区及包层能量都较小, 都不超过 30 a.u. , 芯区能量略比包层大, 另外芯区在 10000 步之前能量略大是因为输入的短脉冲激发发光的原因; 从 5000 到 15000 步, 芯区的能量随时间呈指数规律增加, 而包层的能量却基本保持不变, 如在 10000 步时芯区能量大约是 3000 a.u. , 到 15000 步时已上升到大约为 $3 \times 10^6 \text{ a.u.}$ 了, 而此过程中包层的能量却一直保持在 5 a.u. 以下没有增加, 两者的差异大约 6 个数量级; 从 15000 步到 20000 步, 芯区的能量进一步快速增加, 到 20000 步时芯区能量最大值已经达到 $7 \times 10^9 \text{ a.u.}$, 包层的能量随着芯区的能量快速增长也略有增加, 但两者的差异进一步加大, 已达到 8 个数量级. 图 1(c) 为 20000 步时的光纤截面光场分布图, 从此图中也可明显看出光被绝大部分集中在芯区

这些结果表明: 在不考虑损耗的情况下, 填充在纤芯中的随机增益介质被激发后, 激发光几乎都集中在纤芯中传播, 包层中的光场能量相对来说非常弱, 芯区的能量比包层的能量高出几个数量级. 充分说明: 在带隙光纤光子禁带的约束下, 被局域在芯区的光与纤芯中的增益介质反复相互作用, 使随机激光的激发效率得到提高.

3 同一结构的 PCF 对不同随机增益介质的辐射特性的影响

同样以 HC-1550 型光纤为例, 考察存在损耗的情况下此类型光纤对不同随机增益介质的输出特性的影响. 若在图 1(a) 的 PCF 中填充不同的随机介质悬浮溶液, 这些悬浮溶液具有相同的空间结构, 即具有相同的散射颗粒的尺寸和填充密度, 而溶液的材料本身不同, 即溶液的增益频率不同, 通过模拟它们在激励后的同一时间点的光场分布, 分别计算芯区的能量总和与包层区域能量总和, 求出两者之间的比值, 找出比值最大的位置, 即对应着与此光纤最匹配的增益频率, 也就找到了与此光纤最匹配的随机激光介质. 图 2(a) 为归一化频率 ω 从 $0.1-0.9$ 范围内芯区与包层的能量总和之比, 从图中可以看出在 $\omega = 0.36-0.5$ 和 $0.76-0.8$ 区间内比值较大, 且 $\omega = 0.4$ 和 $\omega = 0.76$ 分别出现了比值的次最大和最大值, 说明在这些频率区间上系统对输出光的约束能力较强.

为了进一步说明光纤的光子禁带对随机激光的约束作用, 我们用平面波展开法对图 1(a) 结构的

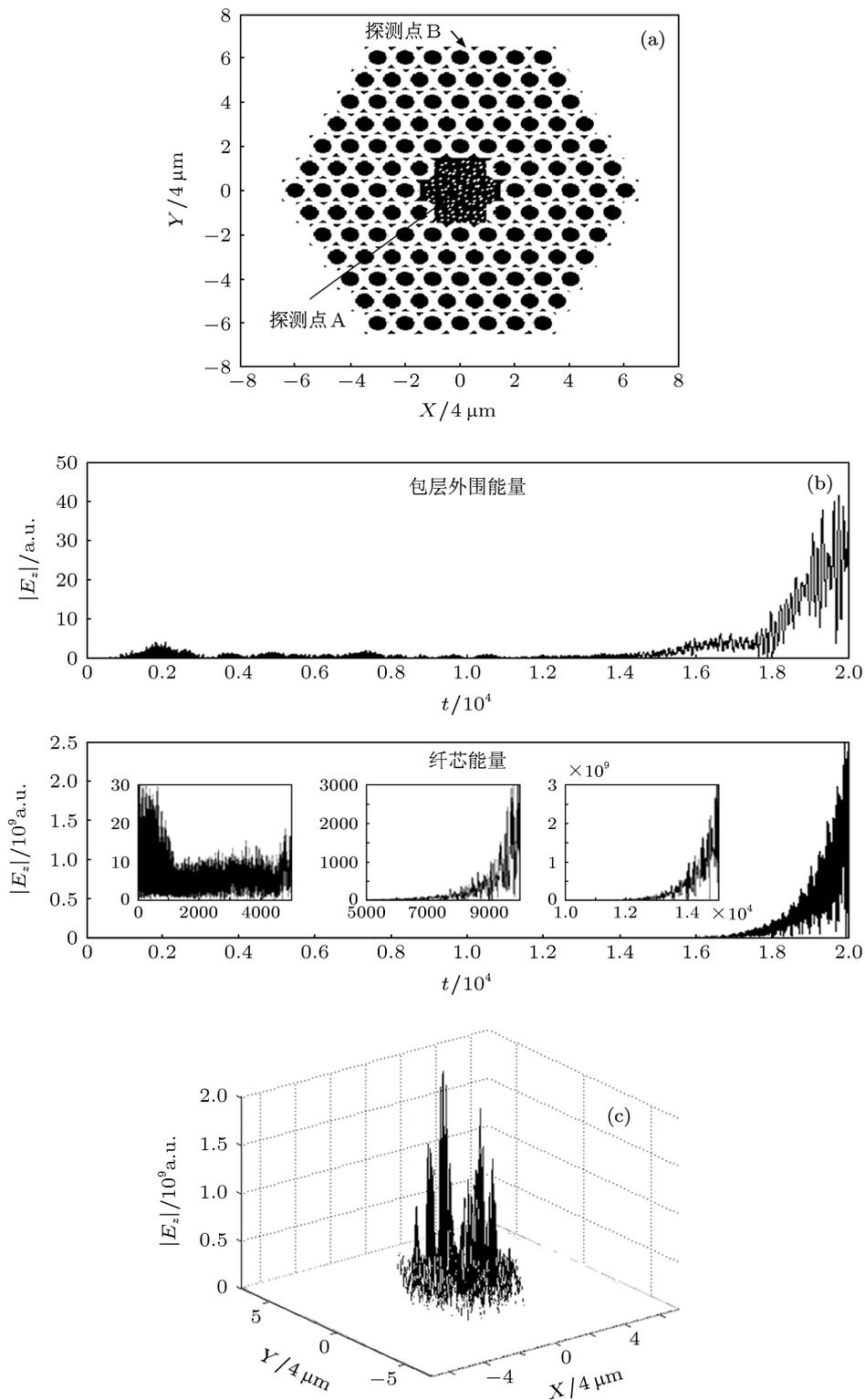


图1 RFL 截面结构图及光场能量分布 (a) RFL 截面结构图; (b) 包层及芯区光场能量随时间的变化; (c) 激光器截面光场分布

光纤的能带进行计算, 图 2(b) 即为其 TE 模的能带结构, 从图中可以看出在归一化频率为 0.23—0.34 区间存在一个较宽的带隙, 在 0.66—0.7 之间存在一个较窄的带隙。

比较 2(a) 与 (b) 两组结果可以看出它们基本是自洽的, 也就是说 (a) 图中的比值较大的频率区间和 (b) 图带隙位置基本对应, 都分别在低频段和高频段各存在一个禁带, 且低频段带隙较宽而高频段

带隙较窄,带隙宽度也基本符合.同时我们也注意到两组结果的禁带位置有所差异,这是因为前一组结果是用有限时域差分法模拟的,这种方法可以做到较真实地模拟光纤填充随机介质后光的传播和输出;而后面的结果是用平面波展开法计算获得的,只能考虑到光纤的有序结构部分,无法将随机介质考虑进去计算.我们知道,光纤填充介质后,纤芯等效折射率发生了改变,光子带隙也就必然会随之移动,因此两组结果在禁带位置有一点小的差异是

正常的.

为了更清晰地展示光纤对不同随机增益介质的输出特性的影响,我们选取了两个不同频率所对应的光纤截面能量分布图来进行比较,如图3(a)和(b)分别是增益频率 $\omega = 0.2$ 和 $\omega = 0.76$ 时经历20000步时的光纤截面能量分布图,比较两图我们也可以看出:在 $\omega = 0.2$ 时,可明显看出有部分能量泄漏到包层中;而在 $\omega = 0.76$ 时,包层中能量非常小,几乎没有能量外泄漏到包层中.

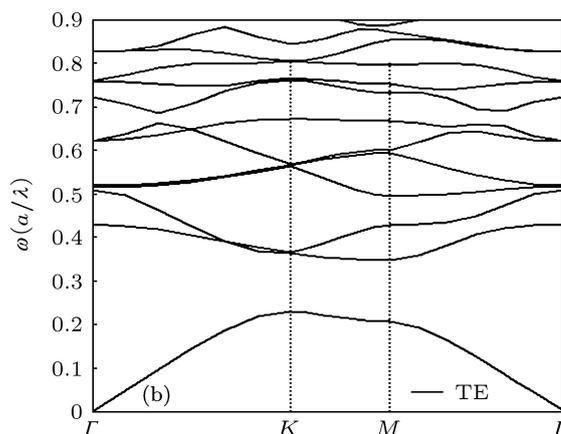
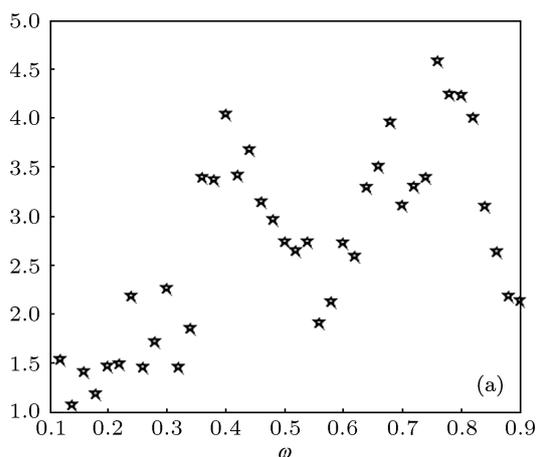


图2 光纤对不同增益介质输出特性的影响及其能带结构 (a) 纤芯与包层的能量比值随介质增益频率的变化; (b) 光纤的能带结构图

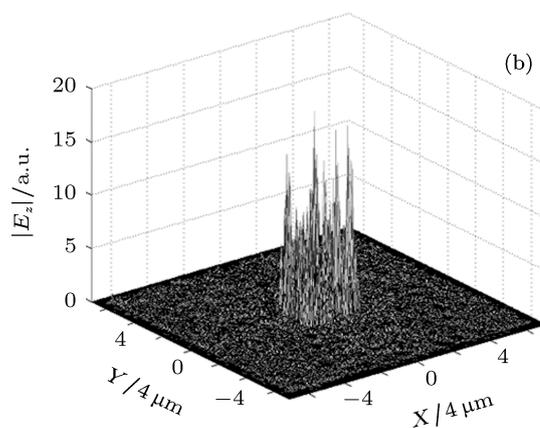
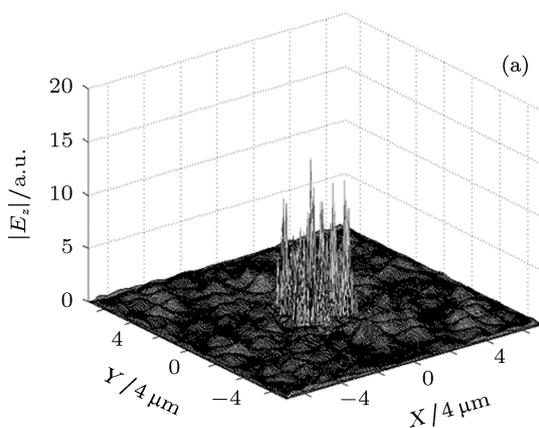


图3 增益频率 ω 为不同值时光纤截面的能量分布图 (a) $\omega = 0.2$; (b) $\omega = 0.76$

由此可见,当我们要用带隙光纤来实现随机光纤激光时,要合理选择光纤或介质的材料和结构,由于填充介质后的光纤带隙位置会有小范围的移动,因此单纯根据光纤本身的光子禁带来选择随机激光介质是不够的,必须考虑填充介质后实际的带隙位置,同时还要考察实际的带隙位置和介质的增益频率是否符合,这样才能更准确地选择光纤或介质的结构,达到更大程度降低随机激光阈值的目的.

4 结论

通过研究RFL中PCF对随机增益介质输出特性的影响,充分表明在PCF的光子禁带约束下,大部分能量能被集中在芯区传播,这使局域在芯区中的光与随机介质相互作用得到增强,激发效率得以提高.而对于同一种光纤而言,填充不同的随机介质后结果是不同的,因此在组建RFL系统时,应考

虑 PCF 和介质之间的匹配问题, 如果 PCF 与随机介质匹配合适, 光子禁带对激光的调控能力会更强, 激光阈值有望得到更大程度的降低. 研究还表明光纤填充介质后, 由于纤芯的等效折射率发生了改变, 光子带隙也就必然会随之移动, 因此单纯根据光纤

本身的光子禁带来选择随机介质是不够的, 必须考虑填充介质后带隙的实际位置与介质的增益频率之间是否吻合, 合理选择光纤或介质的材料和结构, 这样才能更准确地选择光纤或介质的结构, 达到更大程度降低随机激光阈值的目的.

- [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] Wiersma D S 2000 *Nature* **406** 132
- [4] Türeci H E, Li G, Rotter S, Stone A D 2008 *Science* **320** 623
- [5] Xu Y, Li Y P, Jin L, Ma X Y, Yang D R 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 084207 (in Chinese) [徐韵, 李云鹏, 金璐, 马向阳, 杨德仁 2013 物理学报 **62** 084207]
- [6] Zacharakis G, Papadogiannis N A, Papazoglou T G 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 2511
- [7] Chang S H, Cao H, Ho S T 2003 *IEEE J. Quantum Electron* **39** 364
- [8] Dice G D, Mujumdar S, Elezabab A Y 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 131105
- [9] Zhai T R, Zhang X P, Pang Z G, Su X Q, Liu H M, Feng S F, Wang L 2011 *Nano Lett.* **11** 4295
- [10] Wang H Q, Fang L G, Wang Y F, YU A L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 014203 (in Chinese) [王慧琴, 方利广, 王一凡, 余奥列 2011 物理学报 **60** 014203]
- [11] 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]
- [12] Wang H Q, Ouyang H, Han D F, Wang Y F 2011 *Optoelectronics Letters* **7** 179
- [13] Matos C J S, Menezes L S, Brito-Silva A M, Martínez Gámez M A, Gomes A S L, Araújo C B 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 153903
- [14] Hua Z J, Zheng H J, Wang L J, Tian X J, Wang T X, Zhang Q J, Zou G, Chen Y, Zhang Q 2012 *Optics Commu.* **285** 3967
- [15] Lü J T, Wang K J, Liu J S, Yao J Q, Zhu Q H, Zhang Q Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 074203 (in Chinese) [吕健滔, 王可嘉, 刘劲松, 姚建铨, 朱启华, 张清泉 2011 物理学报 **60** 074203]
- [16] 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]
- [17] Xie Y M, Liu Z D 2005 *Phys. Lett. A* **341** 339
- [18] Shen X W, Yuan J H, Sang X Z, Yu C X, Rao L, Xia M, Han Y, Xia C M, Hou L T, Wu Z C, He X L 2013 *Chin. Phys. B* **22** 014102
- [19] Qin W, Li S G, Xue J R, Xin X J, Zhang L 2013 *Chin. Phys. B* **22** 074213
- [20] Shen X W, Y J H, Sang X Z, Yu C X, Rao L, Xin X J, Xia M, Han Y, Xia C M, Hou L T 2012 *Chin. Phys. B* **21** 074209

Discussion on the problem of random media matching with the PCF for RFL*

Wang Hui-Qin^{1)2)†} Gong Qi-Huang²⁾

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

2) (State Key Laboratory for Mesoscopic Physics & Department of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

(Received 14 May 2013; revised manuscript received 24 July 2013)

Abstract

To reduce the threshold is an important requirement for utilizing the random laser. RFL (random fiber laser) is a new random laser which use the photonic bandgap of PCF to lower the threshold by filling the random medium into a hollow-core PCF. Theoretical analysis shows that most of the emitted light is concentrated in the core of the fiber because of the controlling of the bandgap, which should enhance the interaction between the random medium and the localized light for the light oscillating back and for the thin core region, therefore the excitation efficiency of the random laser could be improved. However, the band gap of PCF filled with the random medium should be changed, so when choosing fiber to reduce the threshold for RFL, we should consider the matching between the new bandgap of the padded fiber and the gain frequency of the medium, and arrange the fiber and medium in pairs reasonably. If the PCF matches with the medium, the lasing may be enhancedly regulated and controlled and the threshold can be reduced greatly.

Keywords: random laser, photonic crystal fiber, photonic bandgap, lasing threshold

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

DOI: 10.7498/aps.62.214202

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61168001), the Natural Science Foundation of Jiangxi Province, China (Grant No. 2010gzw0045), and the Technology Project of Education Department in Jiangxi Province, China (Grant No. GJJ11365).

† Corresponding author. E-mail: hqwan@ncu.edu.cn