

低阈值随机分布反馈光纤激光器的输出特性

朱俊梅 张伟利 饶云江 王子南 贾新鸿 吴宇 龚元

(电子科技大学光纤传感与通信教育部重点实验室, 四川 成都 611731)

摘要 随机分布反馈光纤激光器(RDF-FL)作为一种基于分布式瑞利散射和拉曼放大效应的新型光源,具有结构简单、方向性好、传输距离长等特点,因而在光纤传感及光纤通信等领域有着广泛的应用前景。但由于形成反馈的瑞利散射较弱,其激射阈值很高。研究了两种降低光纤随机激光阈值的方法,即单边光纤布拉格光栅(FBG)线形腔法和超长环形腔法。在此基础上,从理论和实验上对随机激光的输入输出及频谱特性进行了详细分析与探讨。结果表明,单边 FBG 线形腔与超长环形腔结构分别将一阶随机激光阈值降低到 0.8 W 和 1.0 W。研究有助于对随机激光机理的深入认识以及新型光纤随机激光器的设计。

关键词 激光器;随机激光;拉曼放大;瑞利散射

中图分类号 O437.3 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0302007

Output Characteristics of Low-Threshold Random Distributed Feedback Fiber Laser

Zhu Junmei Zhang Weili Rao Yunjiang Wang Zinan Jia Xinhong Wu Yu Gong Yuan

(Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

Abstract Random distributed feedback fiber laser (RDF-FL) is a novel kind of light source based on distributed Rayleigh scattering and Raman amplification, which has characteristics such as simple structure, good directionality as well as long-distance transmission and shows a broad prospect in the application of optical fiber sensing and communications. However, the pump threshold is relative high just because of the weak Rayleigh scattering feedback. In this paper, two methods, half-opened cavity and ultra-long ring cavity structures, are used to reduce the threshold of the RDF-FL. On this basis, the input-output characteristics and frequency spectra of the RDF-FL are analyzed theoretically and experimentally. The results show that the first-order threshold of the RDF-FL can be reduced to 0.8 W and 1.0 W respectively. This research is helpful to further understanding the mechanism of RDF-FLs as well as the design of novel random fiber lasers.

Key words lasers; random lasing; Raman amplification; Rayleigh scattering

OCIS codes 060.3510; 190.5650; 290.5870

1 引 言

自 Letokhov^[1]首次证明随机增益介质的激光现象以来,随机激光器便因其体积小、结构简单、易实现等独特优点得到人们的关注^[2~6],并被广泛应用于激光显示、光纤通信、光纤传感等领域^[7~9]。

2007年,de Matos等^[10]将随机激光引入光纤,改

善了随机激光输出的方向性。2010年4月,Turitsyn等^[11]正式提出了随机分布反馈光纤激光器(RDF-FL)这一概念,利用单模光纤中的瑞利散射和拉曼放大效应实现了随机激光激射。与传统光纤激光器相比,RDF-FL没有谐振腔,仅包括抽运源与增益介质两部分,其结构简单、方向性好、输出连续稳定,在非

收稿日期: 2012-08-24; 收到修改稿日期: 2012-10-30

基金项目: 国家自然科学基金(61106045,61290312)及中央高校基本科研业务费专项基金(ZYGX2011J001)资助课题。

作者简介: 朱俊梅(1987—),女,硕士研究生,主要从事光纤随机激光器方面的研究。E-mail: qingyue_2005@126.com

导师简介: 饶云江(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感与光纤通信方面的研究。

E-mail: yjrao@uestc.edu.cn(通信联系人)

线性光学、光传感与光通信等领域具有广泛的潜在应用前景^[12~14],因而被认为是一种重要的新型光源。

在此基础上,RDF-FL 的各种相关研究也开始逐步展开。例如:Churkin 等^[15]提出具有多种结构的 RDF-FL,并对其特性进行了详细分析;Babin 等^[16]基于瑞利散射实现了随机激光输出的宽带波长可调;Vatnik 等^[17]报道了工作波长为 $1.2 \mu\text{m}$ 的级联 RDF-FL。此外,也有学者将分布式随机瑞利散射与多个光纤布拉格光栅(FBG)结合用以实现应变-温度光纤传感及多波长激光输出^[18,19],从而为 RDF-FL 在光传感及光通信领域的应用奠定了基础。

就目前的研究而言,RDF-FL 的实现阈值较高且相关机理和特性还有待进一步深入探索。在课题组前期工作的基础上^[20,21],本文研究了两种可降低 RDF-FL 阈值的方法,即单边 FBG 线形腔法和超长环形腔法,并探讨了两种结构 RDF-FL 的频谱演变特性;此外,通过理论和实验分析进一步揭示了光纤随机激光的形成机理。

2 实验装置

单向抽运线形腔与环形腔的结构如图 1 所示。其中,图 1(a)为典型的无腔镜线形结构 RDF-FL,抽运光波通过波分复用器(WDM)注入到标准单模光纤(SMF)中,SMF 作为随机增益介质,在抽运光的激发下由于拉曼效应而产生一阶及高阶斯托克斯光,同时光纤中的瑞利散射为其提供随机分布反馈,当增益大于其损耗时,则可由光纤末端得到稳定激光输出^[15]。

图 1(b)和(c)为本文研究的两种光纤随机激光器结构。图 1(b)采用单边 FBG 线形腔结构,与图 1(a)不同,该结构在 SMF 前端加入一个 FBG,其中心波长与抽运激发产生的一阶斯托克斯光相对应,实验所用抽运光源波长为 1365 nm ,所加 FBG 中心波长为 1453.8 nm ,其反射率为 0.979 ,选择其末端为激光输出端口。图 1(c)为环形腔结构,其抽运光由 WDM 注入光纤,并通过 SMF 将 WDM 另两个端口相连形成闭合环形,同时在 WDM 公共端与 SMF 间接入 $1:99$ (光功率比)的分束器,其 1% 端口为激光输出端。需要说明的是,环形腔结构中存在两种反馈机制,其中一种为环形腔的谐振效应,另一种为分布式瑞利反馈效应。在抽运功率较高的情况下,随着谐振腔腔长的不断增加,谐振效应逐渐减

弱,瑞利散射开始占据主导地位,此时所得激光输出为无模式的混合输出。选取腔长为 100 km ,环形腔的谐振效应被极大弱化,在激光出射后,分布式瑞利反馈效应逐渐起主导作用,输出激光呈随机特性^[22],因而将其与随机激光一并进行讨论。

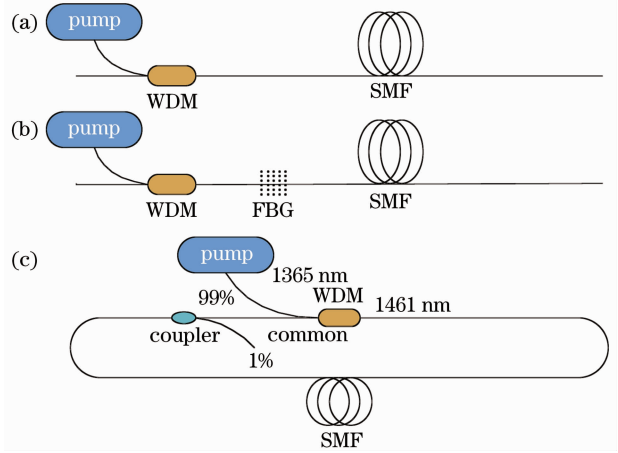


图 1 单向抽运 RDF-FL 结构示意图。(a)无 FBG 线形腔;(b)单边 FBG 线形腔;(c)环形腔

Fig. 1 Structure diagrams of directionally pumped RDF-FL. (a) Linear cavity without FBG; (b) linear cavity with single FBG; (c) ring cavity

3 实验结果与分析

3.1 随机分布反馈激光输入输出特性分析

实验中所用 SMF 长度均为 100 km ,抽运功率在 $0 \sim 3.5 \text{ W}$ 之间。图 2 为单向抽运方式下随机激光($\lambda = 1453.8 \text{ nm}$)的输入输出特性曲线。由图 2 可得,无 FBG 线形腔结构对应的激射阈值最高,约 1.4 W ,其输出功率随抽运功率增大而增大,抽运功率越高,输出斜率越小,这是由多余光纤的损耗所引起的。单边 FBG 线形腔结构对应阈值最低,约为 0.8 W ,这是由于光纤中背向瑞利散射大部分被 FBG 反馈,重新进入光纤,增强了受激拉曼效应,极

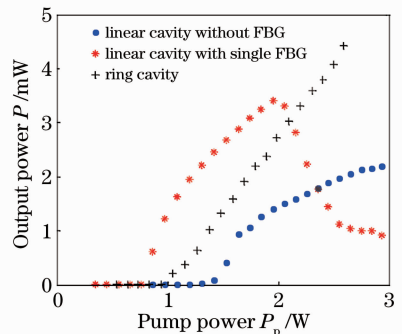


图 2 RDF-FL 输入输出特性曲线

Fig. 2 Input-output characteristic curves of RDF-FL

大降低了随机激光阈值。抽运功率为2 W时输出功率最大,此后随着抽运功率的增大输出功率急剧下降,这是由于级联拉曼效应产生了高阶随机激光(即高阶斯托克斯光),一阶随机激光被消耗^[20]。环形腔结构对应阈值为1.0 W,且输出功率随抽运功率线性增加,其阈值降低主要是源于环形腔的谐振效应,由于谐振腔足够长,一旦形成激射,随机瑞利散射将起主导作用^[22]。

3.2 随机分布反馈激光频谱分析

RDF-FL 基于光纤中分布式瑞利散射和拉曼放大效应产生随机激光,因而在达到阈值前其光谱特性与拉曼增益谱类似。图3为单向抽运无FBG线

形腔对应输出光谱曲线,可见,在1365 nm抽运光作用下,一阶斯托克斯光随着抽运功率的增大而增大,当抽运功率逐渐接近阈值功率时,输出频谱呈不稳定状态,有毛刺出现,且逐渐增多,如图3(b)、(c)所示,这是由布里渊级联效应引起的。当抽运功率大于某一临界值时,输出趋于稳定,频谱变平滑,如图3(d)所示,这是由于激射功率增大伴随的非线性效应(如自相位调制、交叉相位调制等)引起频谱展宽,抑制了布里渊效应。实验获得的稳定随机激光输出频谱峰值在1453 nm,带宽约为1 nm,其3 dB带宽能量约占总能量的95%,该结果与文献报道的实验结果一致^[11]。

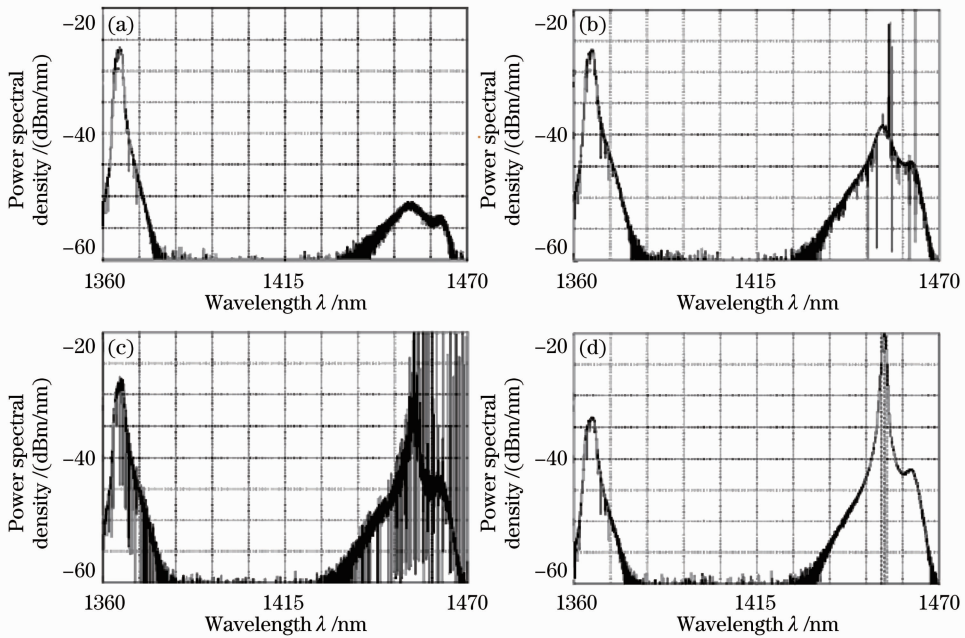


图3 单向抽运无FBG线形腔输出光谱。(a) $P_p=1.20$ W; (b) $P_p=1.51$ W; (c) $P_p=1.64$ W; (d) $P_p=2.23$ W

Fig. 3 Output spectra of directionally pumped RDF-FL with linear cavity without FBG. (a) $P_p=1.20$ W;

(b) $P_p=1.51$ W; (c) $P_p=1.64$ W; (d) $P_p=2.23$ W

图4为单向抽运单边FBG线形腔RDF-FL输出光谱,由于FBG的频率选择反馈,输出的随机激光频谱由FBG反射谱决定。但是该情况不同于传统的由两个FBG构成的线形法布里-珀罗(F-P)腔,其频谱演变过程与图3类似,随着抽运功率的不断增大,激光输出光谱均由非稳定状态逐渐趋于平滑,最终得到稳定输出。这表明输出为无模式的随机激光。

该结构对应的阈值较低,当功率大于2 W时,产生的随机激光本身作为抽运光,激发出二阶随机激光,如图5所示。该结果也与图2中一阶输出功率下降对应。

环形腔结构对应的随机激光频谱如图6所示。在激光产生时,环形腔的谐振效应和瑞利散射共同提供正反馈,降低了激射阈值。另一方面,分布式瑞利散射在环形腔中不断累积放大,输出最终呈现出随机激光特性,图6中所示频谱演变过程与文献^[11]一致,只是对应的抽运功率降低了很多。

4 理论模型及模拟仿真

对于RDF-FL系统,在同时考虑抽运光损耗、放大自发辐射及双向瑞利散射的情况下,其抽运光和随机激光特性可通过以下简单理论模型进行描述^[11,15,16,19,23]:

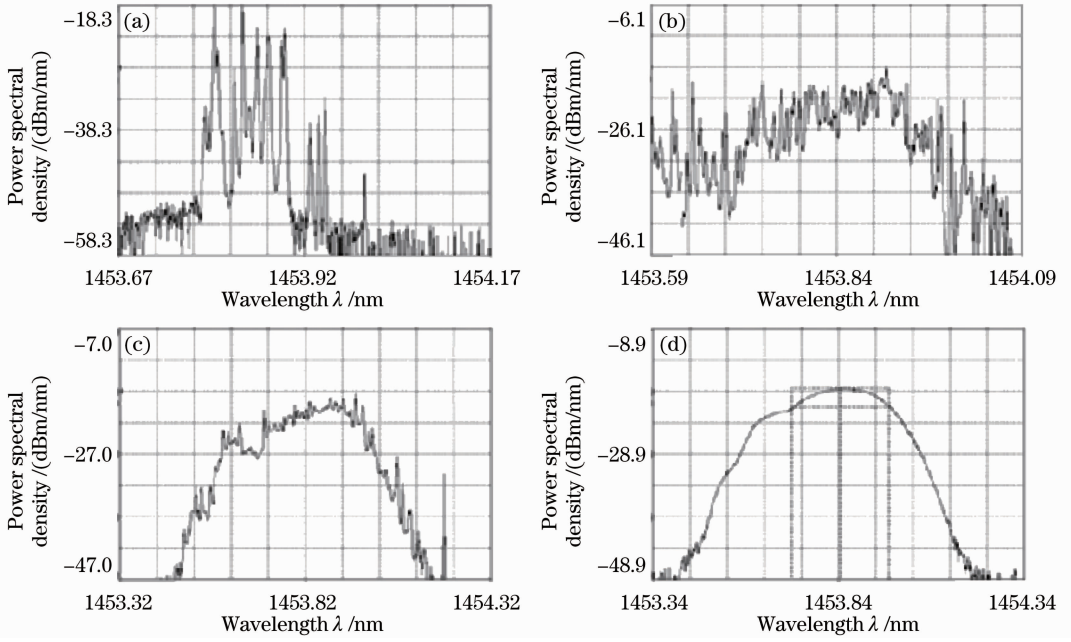


图 4 单向抽运单边 FBG 线形腔一阶输出光谱。 (a) $P_p=0.76$ W; (b) $P_p=0.81$ W; (c) $P_p=0.87$ W; (d) $P_p=0.90$ W
 Fig. 4 The 1st order output spectra of directionally pumped RDF-FL with linear cavity with single FBG.

(a) $P_p=0.76$ W; (b) $P_p=0.81$ W; (c) $P_p=0.87$ W; (d) $P_p=0.90$ W

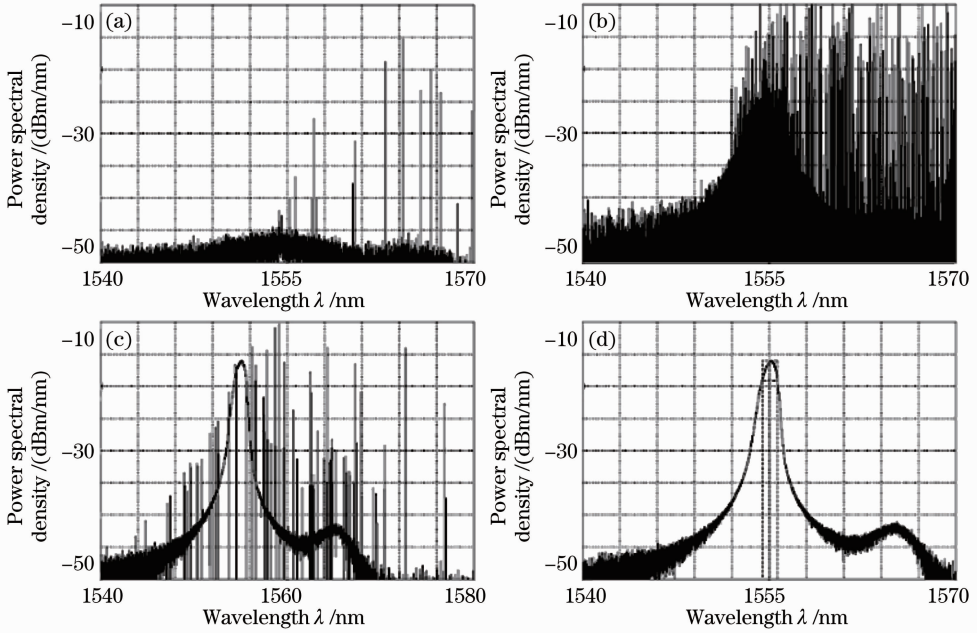


图 5 单向抽运单边 FBG 线形腔二阶输出光谱。 (a) $P_p=2.04$ W; (b) $P_p=2.25$ W; (c) $P_p=2.74$ W; (d) $P_p=2.75$ W
 Fig. 5 The 2nd order output spectra of directionally pumped RDF-FL with linear cavity with single FBG.

(a) $P_p=2.04$ W; (b) $P_p=2.25$ W; (c) $P_p=2.74$ W; (d) $P_p=2.75$ W

$$\frac{dP_p^\pm}{dz} = \mp \alpha_p P_p^\pm \mp g_p \frac{f_p}{f_1} P_p^\pm \left\{ P_1^+ + P_1^- + 4hf_1 \Delta f_1 \left\{ 1 + \frac{1}{\exp[h(f_p - f_1)/K_B T] - 1} \right\} \right\} \pm \epsilon_p P_p^\mp, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_1^\pm}{dz} = & \mp \alpha_1 P_1^\pm \pm g_p \left\{ P_1^+ + 2hf_1 \Delta f_1 \left\{ 1 + \frac{1}{\exp[h(f_p - f_1)/K_B T] - 1} \right\} \right\} (P_p^+ + P_p^-) \mp \\ & g_1 \frac{f_1}{f_2} P_1^\pm \left\{ P_2^+ + P_2^- + 4hf_2 \Delta f_2 \left\{ 1 + \frac{1}{\exp[h(f_1 - f_2)/K_B T] - 1} \right\} \right\} \pm \epsilon_1 P_1^\mp, \end{aligned} \quad (2)$$

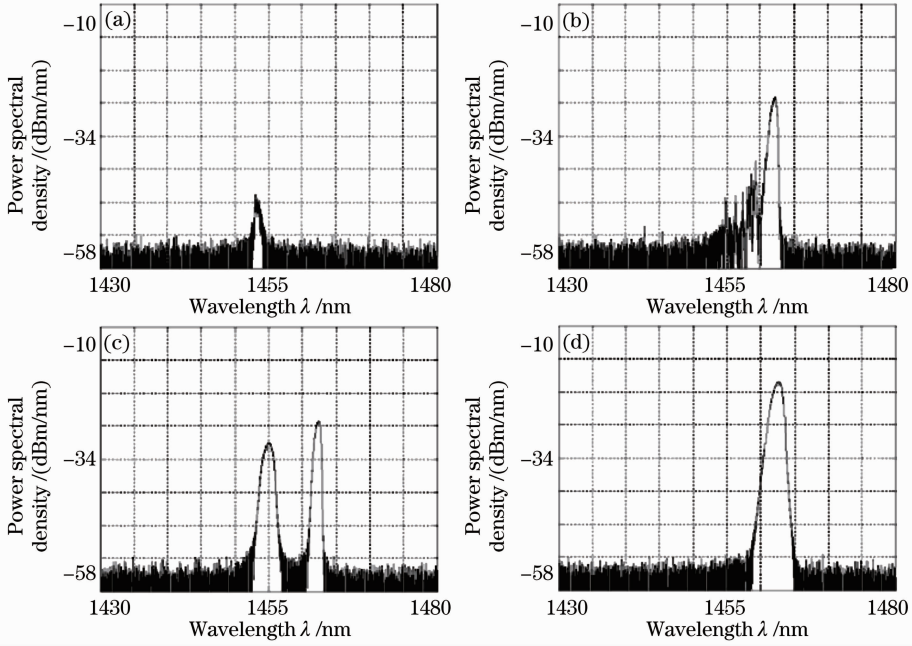


图6 环形腔输出光谱。(a) $P_p = 0.94$ W; (b) $P_p = 1.19$ W; (c) $P_p = 1.27$ W; (d) $P_p = 2.35$ W

Fig. 6 Output spectra of RDF-FL with ring cavity. (a) $P_p = 0.94$ W; (b) $P_p = 1.19$ W; (c) $P_p = 1.27$ W; (d) $P_p = 2.35$ W

$$\frac{dP_2^\pm}{dz} = \mp \alpha_2 P_2^\pm \pm g_1 \left\{ P_2^\pm + 2hf_2 \Delta f_2 \left\{ 1 + \frac{1}{\exp[h(f_1 - f_2)/K_B T] - 1} \right\} \right\} (P_1^+ + P_1^-) \pm \epsilon_2 P_2^\pm, \quad (3)$$

其中,上标“+”、“-”分别表示光波正向和反向传输方向, P_p 为抽运光功率, P_1 、 P_2 分别为一阶、二阶激光输出功率, f_i ($i = 1, 2$) 为光波对应频率, Δf_i 分别为有效带宽, g_i 为相应拉曼增益系数, α_i 为光纤衰减系数, h 为普朗克常数, K_B 为玻尔兹曼常数, T 为光纤绝对温度, ϵ_i 为双向瑞利散射系数。

对应于实验所采用的单向抽运方式,相应边界条件可表述为

$$P_p^+(0) = P_{in}; \quad P_1^+(0) = R_1 P_1^-(0), \quad (4)$$

式中 P_{in} 为输入抽运光功率, R_1 为光纤前端中心波长为 1453.8 nm 的 FBG 对应的反射率。

采用打靶法来对上述理论模型进行数值仿真,其模拟过程所需参数值如表 1 所示。

表 1 数值仿真参数值

Table 1 Parameters of simulation

λ / nm	α / (dB·km ⁻¹)	g / (W ⁻¹ ·km ⁻¹)	ϵ / km ⁻¹	Δf / GHz	T / K
1365	0.306	0.53	1×10^{-4}		
1453.8	0.24	0.43	6×10^{-5}	50	300
1550	0.194	—	4.3×10^{-5}		

依据上述理论模型,分别对三种不同腔结构的 RDF-FL 系统进行数值仿真,相应输入输出特性曲线如图 7 所示,与图 2 对比可得,模拟仿真所得阈值

抽运功率及曲线变化趋势均可与实验结果较好吻合。

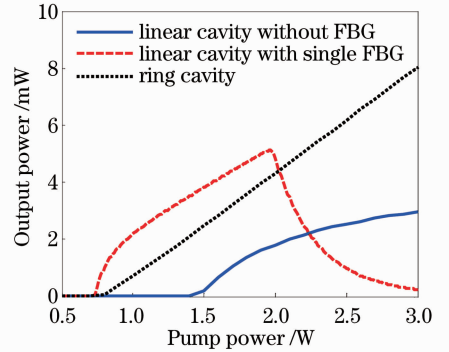


图 7 RDF-FL 输入输出特性曲线

Fig. 7 Input-output characteristics curves of RDF-FL

在此基础上,对随机激光功率分布特性进行了数值分析。图 8 为三种不同结构对应 RDF-FL 腔内功率分布曲线,其中,图 8(a)、(b) 对应抽运功率分别为 1.5 W 与 2.5 W。由图 8 可得,对于线形腔结构,其功率主要集中于 0~50 km 之间,且单边 FBG 线形腔功率分布更接近于抽运端,对于环形腔,其功率则在输出端即 WDM 公共端口处取得最大值,随着抽运功率的增大,三种腔结构对应功率均相应增大且分布更为集中。以上分析为激光输出位

置的选择及其在放大系统中的应用提供了参考^[24,25]。

由于瑞利散射随光纤长度的增加而增强,从该角度考虑增加光纤长度有助于提高随机激光输出效率。另一方面,光纤长度增加将引入额外损耗,降低输出功率。为了研究这两种作用对随机激光输出功率的影响,图 9 给出了三种腔结构随机激光输出功率随谐振腔长度变化的曲线,其中图 9(a)、(b)为无 FBG 线形腔结构,图 9(c)、(d)为单边 FBG 线形腔结构,图 9(e)、(f)为环形腔,左右两列子图分别对应抽运功率为 1.5 W 和 2.5 W 两种情况。对于两种线形腔结构,激光输出位于光纤末端,功率变化趋势

均为先增大然后线性下降,这表明当腔长达到某一拐点值时,抽运衰减到不再能够提供增益,瑞利散射产生的总反馈强度将不再随腔长增加而增大。而对于环形腔,其功率输出由 WDM 公共端所接分束器的 1% 端口测得,因而整体变化趋势为随腔长增加而逐渐减小并最终趋于稳定,这表明环形腔的谐振效应逐渐减弱,并最终对随机激光输出不再产生贡献。比较不同功率下的结果可以看出,功率越大拐点出现对应的谐振腔长度越短,这是因为分布式瑞利散射被抽运更好地放大,更有利于随机激光的产生。

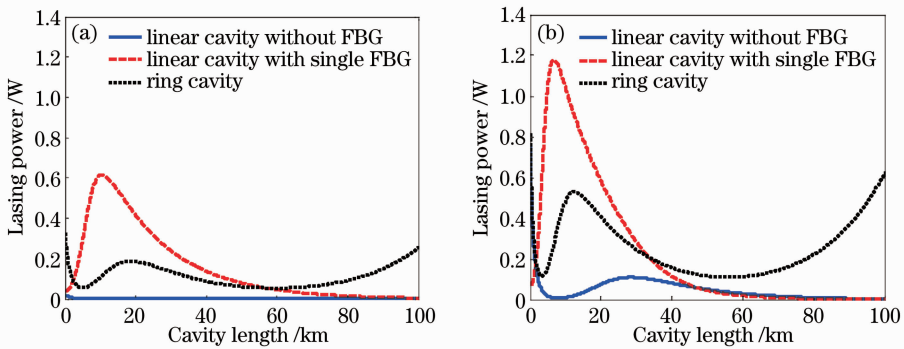


图 8 RDF-FL 功率分布曲线。(a) $P_p=1.5\text{ W}$; (b) $P_p=2.5\text{ W}$

Fig. 8 Curves of power distribution of RDF-FL. (a) $P_p=1.5\text{ W}$; (b) $P_p=2.5\text{ W}$

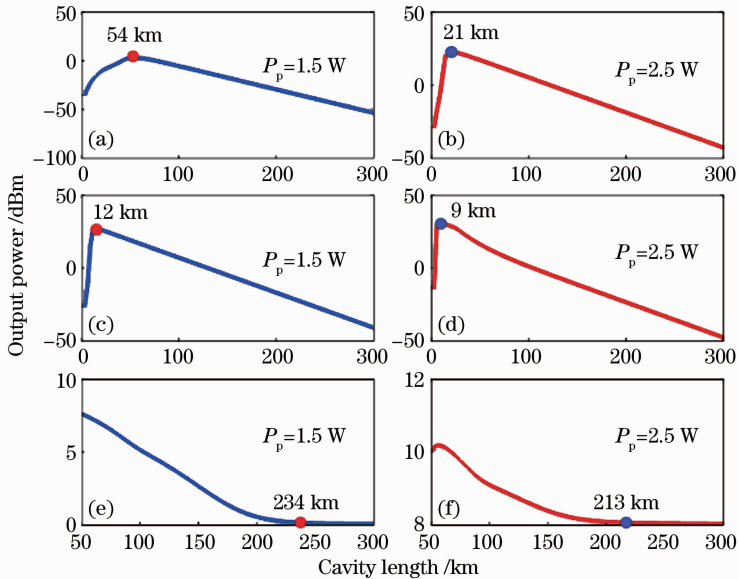


图 9 RDF-FL 输出功率随腔长变化。(a), (b)无 FBG 线形腔; (c), (d)单边 FBG 线形腔; (e), (f)环形腔

Fig. 9 Output power of RDF-FL versus cavity length. (a), (b) Linear cavity without FBG;

(c), (d) linear cavity with single FBG; (e), (f) ring cavity

5 结 论

针对 RDF-FL 研究了两种可降低阈值功率的

方法,并将其随机激光特性与典型开腔 RDF-FL 做比较。当腔长为 100 km 时,可得单边 FBG 线形腔

与环形腔对应阈值抽运功率分别为 0.8 W 与 1.0 W, 均远远低于线形开腔 RDF-FL 阈值。输出频谱的演变表明, 研究的两种新型光纤随机激光器的输出都将经历不稳定和稳定两种机制, 其中的不稳定状态主要源于光纤中的布里渊散射, 其最终实现稳定要归功于光纤中的非线性频谱展宽。基于光纤稳态传输方程对相应结果进行了理论分析, 与实验结果能很好地吻合。在此基础上, 进行了光纤随机激光器中功率分布以及光纤长度对输出功率影响的相关研究。这都为光纤随机激光器的设计提供了参考, 同时也有助于推动其在光纤传感及光通信领域的进一步应用。

参 考 文 献

- 1 V. S. Letokhov. Generation of light a scattering medium with negative resonance absorption[J]. *Sov. Phys.*, 1968, **26**(8): 835~840
- 2 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
- 3 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
- 4 D. Wiersma. Laser physics—The smallest random laser[J]. *Nature*, 2000, **406**(6792): 132~135
- 5 S. F. Yu, Clement Yuen, S. P. Lau *et al.*. Random laser action in ZnO nanorod arrays embedded in ZnO epilayers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(17): 3241~3243
- 6 V. Milner, A. 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
- 7 Guo Jingzhong, Yu Jinlong, Wang Wenrui *et al.*. Optical frequency up-conversion by injection locking semiconductor laser with directly modulated baseband signal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0205003
郭精忠, 于晋龙, 王文睿等. 利用基带直调信号注入锁定半导体激光器产生全光上变频信号的研究[J]. *中国激光*, 2012, **39**(2): 0205003
- 8 Chen Fuchang, Hu Jiacheng, Zhang Chengtao *et al.*. Distributed Brillouin optical fiber temperature sensor based on high frequency microwave technology[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(6): 0605009
陈福昌, 胡佳成, 张承涛等. 基于高频微波技术的分布式布里渊光纤温度传感器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(6): 0605009
- 9 Sun Hao, Hu Manli, Qiao Xueguang *et al.*. Fiber refractive index sensor based on fiber core mismatch multimode interference[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0205001
孙浩, 忽满利, 乔学光等. 基于纤芯失配多模干涉的光纤折射率传感器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(2): 0205001
- 10 C. J. S. de Matos, L. de S. Menezes, A. M. Brito-Silva *et al.*. Random fiber laser[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, **99**(15): 153903
- 11 S. K. Turitsyn, S. A. Babin, A. E. El-Taher *et al.*. Random distributed feedback fiber laser[J]. *Nature Photon.*, 2010, **4**(4): 231~235
- 12 D. D. Sampson. Staying coherent after Kent: from optical communication to biomedical optics[J]. *Photonic Sensors*, 2011, **1**(4): 323~350
- 13 Y. J. Rao. Study on fiber-optic low-coherence interferometric and fiber Bragg grating sensors[J]. *Photonic Sensors*, 2011, **1**(4): 382~400
- 14 Hu Pengbing, Dong Xinyong. Research progress in random distributed feedback fiber lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(11): 110606
胡朋兵, 董新永. 随机分布反馈光纤激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(11): 110606
- 15 D. V. Churkin, S. A. Babin, A. E. El-Taher *et al.*. Raman fiber lasers with a random distributed feedback based on Rayleigh scattering[J]. *Phys. Rev. A*, 2010, **82**(3): 033828
- 16 S. A. Babin, A. E. El-Taher, P. Harper *et al.*. Tunable random fiber laser[J]. *Phys. Rev. A*, 2011, **84**(2): 021805
- 17 I. D. Vatnik, D. V. Churkin, S. A. Babin *et al.*. Cascaded random distributed feedback Raman fiber laser operating at 1.2 μm [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(19): 18486~18494
- 18 O. Frazão, C. Correia, J. L. Santos *et al.*. Raman fibre Bragg-grating laser sensor with cooperative Rayleigh scattering for strain-temperature measurement [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2009, **20**(4): 045203
- 19 A. E. El-Taher, M. Alcon-Camas, S. A. Babin *et al.*. Dual-wavelength, ultralong Raman laser with Rayleigh-scattering feedback[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(7): 1100~1102
- 20 W. L. Zhang, Y. J. Rao, J. M. Zhu *et al.*. Low threshold 2nd-order random lasing of a fiber laser with a half-opened cavity[J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(13): 14400~14405
- 21 Z. N. Wang, X. H. Jia, Y. J. Rao *et al.*. Novel long-distance fiber-optic sensing systems based on random fiber lasers[C]. *SPIE*, 2012, **8351**: 835142
- 22 Y. J. Rao, W. L. Zhang, J. M. Zhu *et al.*. Hybrid lasing in an ultra-long ring fiber laser[J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(20): 22563~22568
- 23 J. D. Ania-Castañón. Quasi-lossless transmission using second-order Raman amplification and fibre Bragg gratings[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(19): 4372~4377
- 24 X. H. Jia, Y. J. Rao, Z. N. Wang *et al.*. Detailed theoretical investigation on improved quasi-lossless transmission using third-order Raman amplification based on ultra-long fiber lasers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2012, **29**(4): 847~854
- 25 X. H. Jia, Y. J. Rao, K. Deng *et al.*. Experimental demonstration on 2.5-m spatial resolution and 1 $^{\circ}\text{C}$ temperature uncertainty over long-distance BOTDA with combined Raman amplification and optical pulse coding [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2011, **23**(7): 435~437