

基于增强瑞利反馈的单模窄线宽随机激光器

李阳 刘艳 刘志波 简水生

Single-mode narrow linewidth random fiber laser with enhanced feedback from Rayleigh scattering

Li Yang Liu Yan Liu Zhi-Bo Jian Shui-Sheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 084206 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.084206

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084206>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I8>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

覆盖可见光波长的掺 Er 光纤飞秒光学频率梳

Er-fiber femtosecond optical frequency comb covering visible light

物理学报.2015, 64(9): 094204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094204>

光子晶体光纤飞秒激光非线性放大系统的耦合动力学过程研究

Coupling dynamics for a photonic crystal fiber femtosecond laser nonlinear amplification system

物理学报.2015, 64(9): 094203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094203>

300W 侧面分布式抽运掺 Yb 全光纤放大器

300 W all-fiber amplifier with distributed side-coupled pump configuration

物理学报.2015, 64(8): 084205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084205>

高重复频率全光纤被动锁模掺铒光纤激光器

High-repetition-rate passively mode-locked erbium-doped all fiber laser

物理学报.2015, 64(6): 064206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064206>

脉冲激光沉积法制备的 ZnO 薄膜的低阈值电抽运紫外随机激射

Low-threshold electrically pumped ultraviolet random lasing from ZnO film prepared by pulsed laser deposition

物理学报.2013, 62(8): 084207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.084207>

基于增强瑞利反馈的单模窄线宽随机激光器*

李阳[†] 刘艳 刘志波 简水生

(北京交通大学, 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

(2014年9月21日收到; 2014年10月20日收到修改稿)

仿真说明了单模光纤(SMF)中瑞利散射(RS)的机理, 指出纤芯掺杂的不均匀性以及拉丝过程引起的光纤几何尺寸的随机变化是光纤中RS产生的主要原因, 并以此为基础制作了损耗为0.54 dB/km的散射光纤. 在通信波段, 5 km该散射光纤的瑞利背向散射(RBS)强度高于相同长度的SMF-28近5 dB. 在基于RBS单模随机激光器的数值模拟中, 大量的具有随机幅度和相位的纵模在经历不平坦增益的多次放大之后, 只有在增益最大点附近的模式能够克服损耗成为输出模式. 实验中以掺铒光纤作为增益介质, 500 m散射光纤提供随机反馈, 窄带布拉格光纤光栅(FBG)作为波长选择器件, 得到线宽约3.5 kHz、对比度近50 dB的单模激光输出. 与采用相同长度SMF-28的随机激光器相比, 其阈值电流降低了80 mA, 相同抽运条件下的最大输出功率提高了3 dBm. 该单模窄线宽随机激光器的输出波长的调谐特性仅由FBG的中心波长决定.

关键词: 随机激光器, 散射光纤, 单模窄线宽

PACS: 42.55.Zz, 42.55.Wd, 42.81.Wg

DOI: 10.7498/aps.64.084206

1 引言

光纤随机激光器由于光纤波导具有良好的方向性以及较高的抽运效率等优点, 近年来一直是随机激光器^[1,2]领域的研究热点之一. 相比于传统的固定腔激光器, 随机激光器不需要传统意义的腔来进行选模, 其输出模式是由大量的叠加在一起的具有随机幅度和相位的模式以及增益来共同决定的. 光纤随机激光器可以通过在光子晶体光纤的空气孔中填充纳米颗粒的悬浮液来实现随机反馈^[3,4]. 类似的光纤随机激光器还包括随机聚合物光纤^[5]和弱散射域的随机光纤激光器^[6]. 这类随机反馈是通过改变光纤波导中纤芯的成分来实现准一维随机激光输出. 由于光纤本身就是一种随机介质, 其极限损耗由瑞利散射(Rayleigh scattering, RS)所决定, 因此基于RS的光纤随机激光器得到了广泛的研究. 基于RS的随机激光器按照增益的不同可以分为拉曼增益下的非相干随机激光

器^[7-11], 掺铒光纤(erbium-doped fiber, EDF)增益的单模窄线宽随机激光器^[12-14]和基于布里渊增益的相干随机激光器^[15-17]. 在基于RS的随机激光器中, 由于在通信波段光纤材料的瑞利背向散射(Rayleigh backscattering, RBS)系数非常小, 通常需要数百米甚至数十公里的单模光纤(single-mode fiber, SMF)来提供有效的反馈. 因此, 减少反馈光纤长度、降低激光器的复杂程度成为研究人员的努力方向, 继而产生了通过后写入方式在光纤中引入随机的折射率调制来实现随机反馈^[18]. 这其中包括随机光栅阵列^[19-21]、光纤拉锥^[22]和二氧化碳激光器随机折射率调制^[23]等. 这类后处理方式在一定程度上打破了光纤材料自身原有的均匀随机性, 使得引入的随机性不再是均匀分布的. 因此, 这类激光器本质上是具有一定随机特点的准随机激光器.

本文首先分析了光纤中RS的起源, 在此基础上通过在光纤预制棒制作以及光纤拉丝过程中均匀地引入随机性, 制作得到了增强RBS的散射光

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2010CB328206)、国家自然科学基金重点项目(批准号: 60837002)、中央高等学校基本科研业务费专项资金(批准号: 2013JBM005)和北京市高等学校青年英才计划(批准号: YETP0530)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: 11111025@bjtu.edu.cn

纤; 继而理论和仿真分析了基于RS的单模随机激光器的原理; 最后利用制作的散射光纤搭建了基于EDF增益介质的随机激光器, 测量了该激光器的输出模式、线宽及波长调谐等特性, 并将该激光器与基于普通SMF的随机激光器进行了对比. 这种激光器结构简单, 输出特性良好, 并且减少了瑞利光纤的长度, 降低了激光器的复杂程度.

2 理论分析

2.1 散射光纤

通信用SMF的损耗极限主要由光纤中的RS所决定, 其产生的原因是由于光纤材料微观密度的不均匀性, 主要体现在光纤有效折射率的起伏上. 在各向散射的光子中, 有一小部分与入射光成 180° 的光子能够继续沿光纤背向传输, 这部分散射被称为RBS. 在 $1.55\ \mu\text{m}$ 波段, 普通SMF中RBS系数仅为 $4.5 \times 10^{-5}\ \text{km}^{-1}$. 因此, 在基于RBS的随机光纤激光器中, 通常需要数百米甚至数公里的SMF来提供有效的反馈. 为了减少反馈光纤的长度, 降低激光器的复杂程度, 需要提高RBS的系数. SMF中RS的起源主要有两种: 一种是在光纤预制棒制作过程中由于纤芯掺杂的不均匀性引起的分子水平上的随机散射; 另外一种是在光纤基模模场的随机变化产生的散射. 模场分布的变化主要是由于在拉丝过程中, 拉丝速度和温度的微小随机变化导致光纤几何尺寸的随机起伏, 如芯径变小、纤芯不圆度增加等. 图1为采用有限元方法模拟的SMF中基模模场的功率分布, 图1(a)为理想情况下SMF基模模场的分布图, 图1(b)和图1(c)分别为纤芯直径变小及纤芯非圆对称两种情况下的模场分布. 可以明显看出, 纤芯几何尺寸的变化会导致明显的模场面积的变化, 而这种沿光纤纵向的模场的随机变化会增强光纤中的RS, 提高散射光子返回到纤芯的概率, 最终增强RBS的强度.

基于以上两点, 通过在光纤预制棒制作以及拉丝两个过程中引入随机性, 制作了增强RBS的散射光纤. 与普通SMF相比, 其传输损耗系数由普通SMF的 $0.2\ \text{dB/km}$ 提高到了 $0.54\ \text{dB/km}$. 相应的RBS谱测量结果如图2所示, 内插图为测量方法. 尽管5 km散射光纤的前向损耗高于普通SMF约 $1.7\ \text{dB}$, 但是其RBS强度高于普通SMF近 $5\ \text{dB}$. 计算得到的RBS散射系数由SMF的 $4.5 \times 10^{-5}\ \text{km}^{-1}$ 提高至 $1.5 \times 10^{-4}\ \text{km}^{-1}$ ($@1.55\ \mu\text{m}$), 这将极大地

减少基于RBS的随机激光器中反馈光纤的长度, 提升激光器性能.

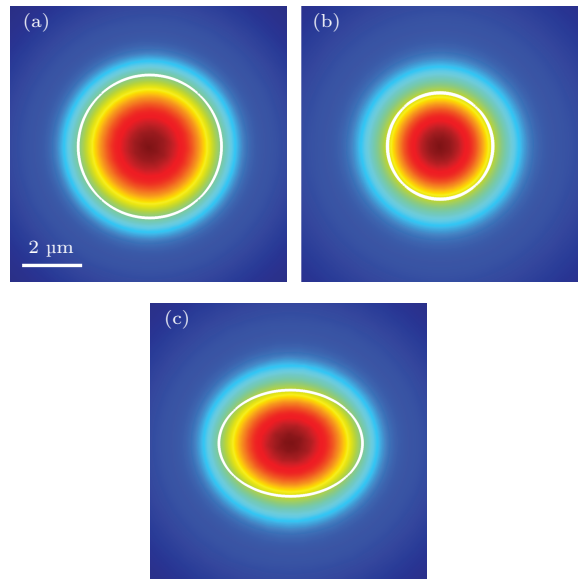


图1 (网刊彩色) 普通SMF中基模模式场分布 (亮线代表纤芯与包层的边界) (a) 理想情况下; (b) 芯径变小; (c) 纤芯不圆度增加

Fig. 1. (color online) Mode field of the fundamental mode in SMF (bright lines represent the interface of core and cladding). (a) Ideal case; (b) decreased core diameter; (c) increased non-circularity.

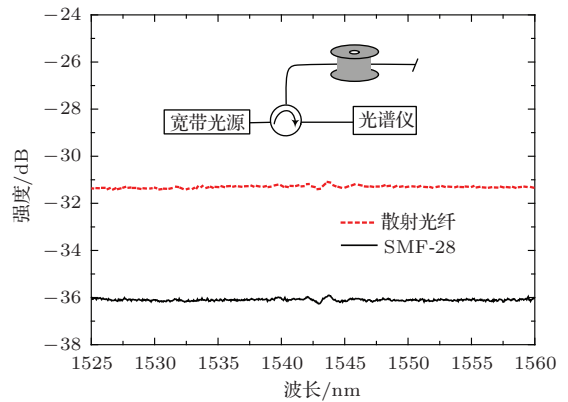


图2 (网刊彩色) 5 km 散射光纤与等长度的SMF-28的RBS光谱对比, 内插图为相应的测量框图

Fig. 2. (color online) The comparison of RBS spectra between 5 km scattering fiber and SMF-28 with the same length. Inset is the corresponding measurement setup.

2.2 原理及仿真

图3为SMF中RBS的示意图. 光纤中的随机不均匀性可以看作是一系列的“散射中心”纵向随机地分布在纤芯当中, 入射光子将会在“散射中心”向各个方向散射, 其中一小部分散射光与入射光成 180° , 这部分光将沿着光纤背向传输. 假设在一段

长度为 L 的光纤中存在 N 个这样的散射中心, 每个散射中心所处的位置为 z_j , 忽略偏振态的影响, 那么背向散射回来的总电场可以表示为

$$E_r = \sum_{j=1}^N E_{in} A_j \exp(-j\varphi_j), \quad (1)$$

其中,

$$\varphi_j = \frac{4\pi f n_{eff} z_j}{c} \quad (0 \leq z_j \leq L), \quad (2)$$

E_{in} 为入射光的电场, f 为入射光频率, A_j 为反射光的幅度, n_{eff} 为有效折射率, c 为真空中光速. 从(1)和(2)式可以看出, 每个散射中心对应两个随机量: 随机幅度 A_j 和随机相位 φ_j . 当背向散射光的相位

与其在反馈光纤外的相位相互匹配时, 将会在频率 f 处形成相干加强.

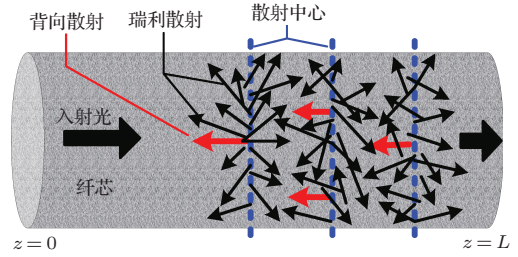


图3 (网刊彩色) SMF 中随机散射示意图
Fig. 3. (color online) Schematic diagram of random scattering in SMF.

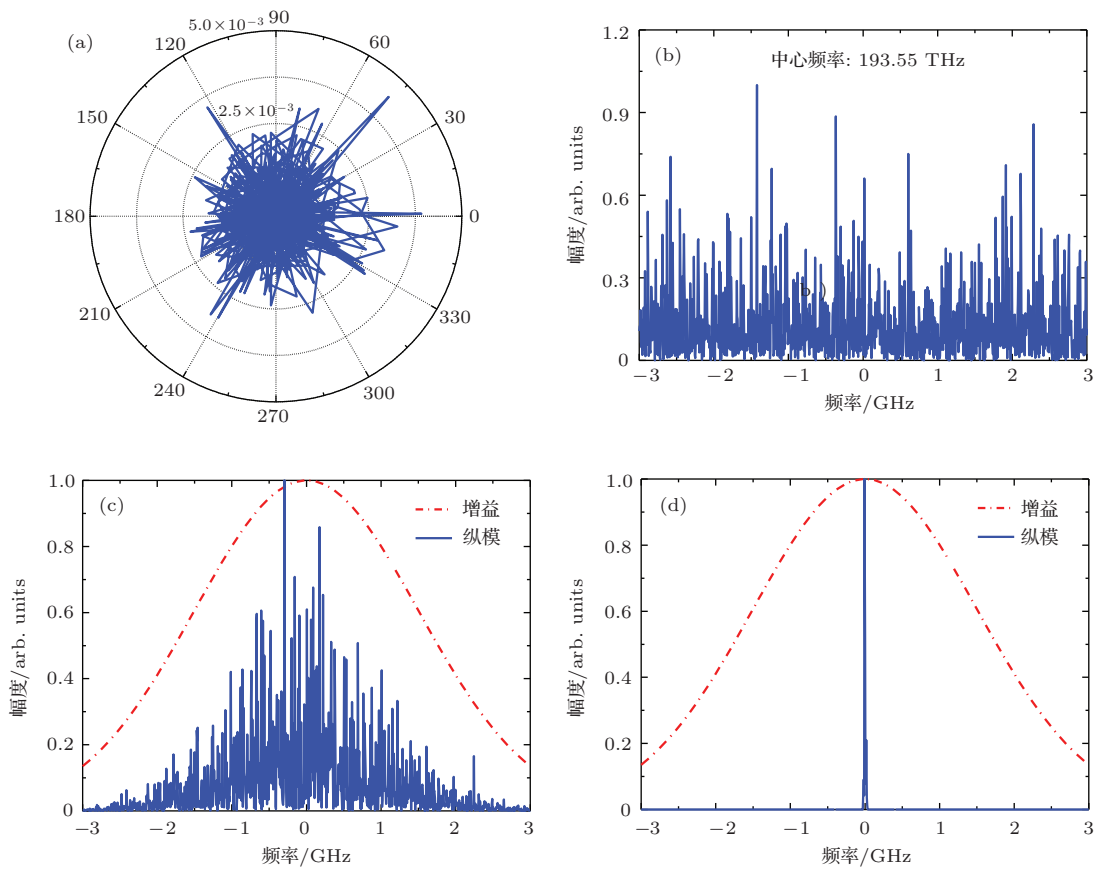


图4 (网刊彩色) 基于RBS的随机激光器仿真结果 (a) 1000个随机幅度和相位电场分量; (b) 增益平坦情况下纵模; (c) 不平坦增益单次放大后的纵模; (d) 放大大多次后的纵模
Fig. 4. (color online) Simulation results of the random laser based on RBS. (a) 1000 electrical field components with random amplitude and phase; (b) longitudinal modes under flat gain; (c) longitudinal modes after single amplification; (d) longitudinal mode after multiple amplification.

图4给出了基于RBS的随机激光器的仿真结果. 仿真中我们假设在1 km的散射光纤中存在1000个有效的散射中心, 每个散射中心反射回来的电场的幅度和相位均是随机的. 反射电场幅度的大小与散射光纤的RBS系数和长度有关. 图4(a)给

出了在极坐标系下这1000个随机电场分量的分布图. 在没有增益的情况下, 激光器的纵模结构由这些散射中心决定. 由于这些散射中心反射回来的电场的幅度和相位均是随机的, 并且 A_j 间的差别不大, 因此大量的纵模彼此叠加在一起, 形成一个

不同于传统固定腔激光器中等间距纵模的连续纵模结构,如图4(b)所示.在考虑不平坦增益的情况下,由于众多的纵模之间幅度相差很小,因此,纵模结构将会随增益的变化而整体变化,如图4(c)所示.这里应当注意的是,最终激光器的输出模式是由增益和损耗共同决定的.并且,当有足够的增益使得纵模被多次放大后,只有在增益最大点处附近的纵模会克服腔内损耗成为输出模式.仿真中,我们将图4(c)的放大过程重复多次并且考虑了损耗,最终得到了如图4(d)所示的单模输出.正如我们预期的那样,只有在增益最大值附近的纵模能够克服损耗成为激光器的输出模式.

3 实验

基于增强RS光纤的随机激光器的实验结构如图5所示.激光器增益部分是由980 nm抽运源、980/1550波分复用器(wavelength division multiplexer, WDM)和7 m EDF组成;反馈部分是由500 m 散射光纤提供,在反馈光纤的末端连接一个光隔离器确保反馈仅由散射光纤的RBS提供;激光器的输出波长由反射率为99%的光纤光栅(fiber

Bragg grating, FBG) 决定.

图6(a)给出了激光器的单模演进特性.该激光器的阈值电流约为360 mA,当抽运电流大于阈值电流时,激光器的输出对比度逐渐增加;当抽运电流达到最大值460 mA时,激光器的输出对比度达到最高值,约为50 dB;另一方面,10 MHz的频谱范围内仅存在一个输出模式.图6(b)为采用同样长度的SMF-28作为反馈光纤时的输出特性,可以看出,散射光纤方案的阈值电流与普通SMF方案相比降低了80 mA,而输出对比度提高了近22 dB.图6(c)给出了频率范围为200 kHz时的拍频信号,拟合后得到其20 dB宽度为70.4 kHz,对应于3 dB洛仑兹线宽为3.5 kHz.从图2可以看出,散射光纤的RBS光谱在通信波段可以近似认为是平坦的,

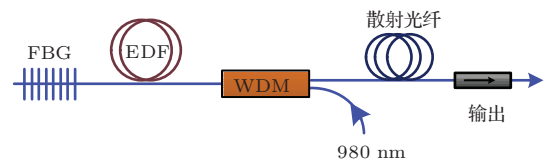


图5 (网刊彩色) 基于散射光纤的随机激光器结构图
Fig. 5. (color online) Random fiber laser setup based on scattering fiber.

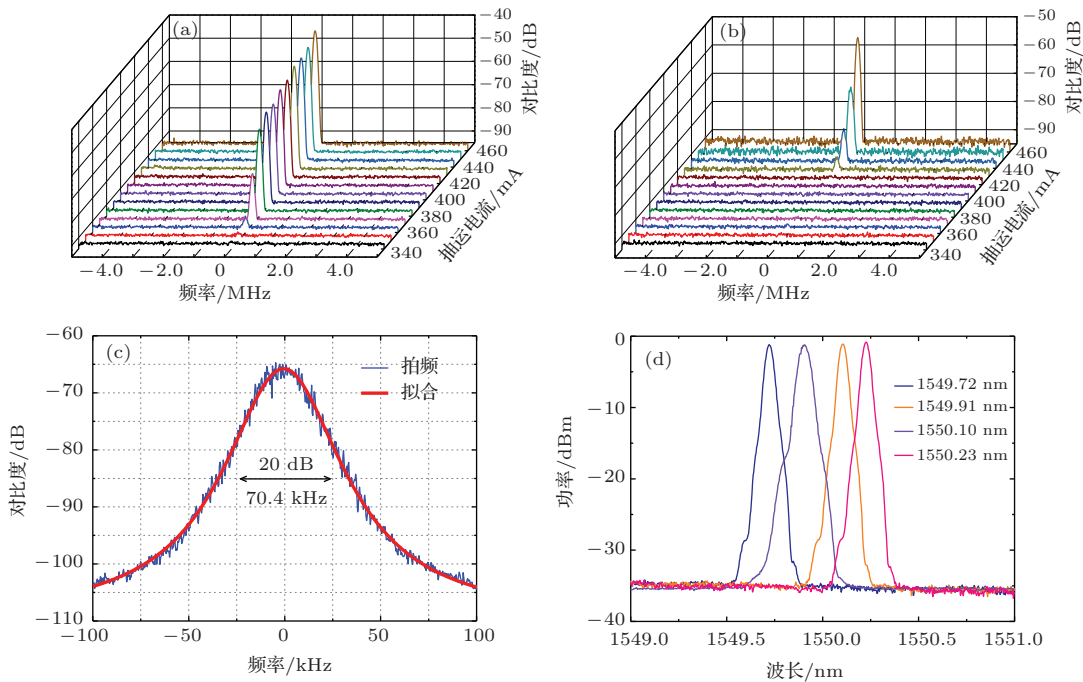


图6 (网刊彩色) 激光器输出特性 (a) 500 m 散射光纤作为反馈时单模演进; (b) 500 m SMF-28 作为反馈时的单模演进; (c) 延迟自外差方法测量得到的激光器线宽; (d) 激光器的调谐特性

Fig. 6. (color online) Output characteristic. (a) Single-mode evolution with 500 m scattering fiber as the random feedback; (b) single-mode evolution with 500 m SMF-28 as the random feedback; (c) linewidth based on the delayed self-heterodyne method; (d) tunability of the proposed laser.

因此, 该激光器的输出波长仅由FBG决定. 利用光谱分析仪测量激光器的输出如图6(d)所示. 实验中采用了4个中心波长不同的FBG作为激光器的波长选择器件, 其输出中心波长分别为1549.72, 1549.91, 1550.10和1550.23 nm. 不同输出波长下, 激光器的纵模特性和线宽相比于图6(a)和图6(c)仅存在微小差异. 因此, 该激光器具有非常大的潜在调谐范围.

4 结 论

光纤中的RS主要是由光纤材料的微观密度不均匀性引起. 通过在光纤预制棒制作及光纤拉丝过程中引入随机性, 制作得到了前向损耗为0.54 dB/km的散射光纤, 长度为5 km的该光纤的RBS强度比相同长度的普通SMF高近5 dB. 在光纤中的RBS可以等效为一系列散射中心, 反馈回来的总电场可以表示为相应散射中具有随机幅度和相位的电场分量的和. 当增益大于相应的损耗时, 增益最大点附近的模式最先克服损耗成为输出模式. 实验中利用制作的散射光纤作为随机反馈介质, 得到了阈值电流为360 mA、最大对比度约为50 dB的单模激光输出. 利用延时自外差法测得该激光器的3 dB 洛仑兹线宽为3.5 kHz. 同时该激光器的波长调谐特性主要由FBG决定. 相比基于普通SMF的随机激光器, 反馈光纤的长度可以大幅降低, 激光器的性能得到明显提升.

参考文献

- [1] Wang K J, Liu J S, Lü J T 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3906 (in Chinese) [王可嘉, 刘劲松, 吕健滔 2006 物理学报 **55** 3906]
- [2] 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]
- [3] Christiano J S M, Leonardo S M, Antônio M B, Martinez M A G, Anderson S L G, Cid B A 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 153903
- [4] Wang H Q, Gong Q H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 214202 (in Chinese) [王慧琴, 龚旗煌 2013 物理学报 **62** 214202]
- [5] Hu Z J, Miao B, Wang T X, Fu Q, Zhang D G, Ming H, Zhang Q J 2013 *Opt. Lett.* **38** 4644
- [6] Hu Z J, Zhang Q, Miao B, Fu Q, Zou G, Chen Y, Luo Y, Zhang D G, Wang P, Ming H, Zhang Q J 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 253901
- [7] Turitsyn S K, Babin S A, El-Taher A E, Harper P, Churkin D V, Kavlukov S I, Ania-Castañón J D, Karalekas V, Podivilov E V 2010 *Nat. Photon.* **4** 231
- [8] Fotiadi A A 2010 *Nat. Photon.* **4** 204
- [9] Churkin D V, El-Taher A E, Vatnik I D, Ania-Castañón J D, Harper P, Podivilov E V, Babin S A, Turitsyn S K 2012 *Opt. Express* **20** 11178
- [10] Smirnov S V, Churkin D V 2013 *Opt. Express* **21** 21236
- [11] Zhang W L, Rao Y J, Zhu J M, Yang Z X, Wang Z N, Jia H X 2012 *Opt. Express* **20** 14400
- [12] Yin G L, Saxena B, Bao X Y 2011 *Opt. Express* **19** 25981
- [13] Zhu T, Bao X Y, Chen L 2011 *J. Lightwave Technol.* **29** 1802
- [14] Saxena B, Bao X Y, Chen L 2014 *Opt. Lett.* **39** 1038
- [15] Pang M, Bao X Y, Chen L, Qin Z G, Lu Y, Lu P 2013 *Opt. Express* **21** 27155
- [16] Pang M, Bao X Y, Chen L 2013 *Opt. Lett.* **38** 1866
- [17] Pang M, Xie S R, Bao X Y, Zhou D P, Lu Y G, Chen L 2012 *Opt. Lett.* **37** 3129
- [18] Puente N P, Chaikina E I, Herath S, Yamilov A 2011 *Appl. Opt.* **50** 802
- [19] Gagné M, Kashyap R 2009 *Opt. Express* **17** 19067
- [20] Lizárraga N, Puente N P, Chaikina E I, Leskova T A, Méndez E R 2009 *Opt. Express* **17** 395
- [21] Gagné M, Kashyap R 2014 *Opt. Lett.* **39** 2755
- [22] Zhu T, Chen F Y, Huang S H, Bao X Y 2013 *Laser Phys. Lett.* **10** 055110
- [23] Li Y, Lu P, Bao X Y, Ou Z H 2014 *Opt. Lett.* **39** 2294

Single-mode narrow linewidth random fiber laser with enhanced feedback from Rayleigh scattering*

Li Yang[†] Liu Yan Liu Zhi-Bo Jian Shui-Sheng

(Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

(Received 21 September 2014; revised manuscript received 20 October 2014)

Abstract

The origin of Rayleigh scattering in fiber waveguides is numerically demonstrated, which indicates that the inhomogeneous doping and diameter variations during drawing are the two dominant reasons. And the scattering fiber with a loss as high as 0.54 dB/km is successfully fabricated based on such principles. The overall Rayleigh backscattering intensity of 5 km scattering fiber is 5 dB higher than that of SMF-28 with the same length in telecommunication window. The principle of single-mode random fiber laser is also studied. The emission spectrum is the superposition of a large number of random modes with arbitrary amplitudes and phases, among which only the highest gain modes can lasing through gain competition. In experiment, a single-mode erbium-doped fiber linear laser with a narrow linewidth of 3.5 kHz and a high contrast of 50 dB is achieved by combining with 500 m scattering fiber as the random feedback. The threshold pump current is reduced by 80 mA and the max output power is increased by 3 dBm for the proposed laser compared with those of the laser with 500 m SMF-28 as the feedback. The tunability of the proposed laser is determined mainly by the fiber Bragg grating.

Keywords: random laser, scattering fiber, single-mode narrow linewidth

PACS: 42.55.Zz, 42.55.Wd, 42.81.Wg

DOI: [10.7498/aps.64.084206](https://doi.org/10.7498/aps.64.084206)

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2010CB328206), the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60837002), the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (Grant No. 2013JBM005), and the Beijing Higher Education Young Elite Teacher Project, China (Grant No. YETP0530).

[†] Corresponding author. E-mail: 11111025@bjtu.edu.cn