



·新型激光技术专题·综述·

随机分布反馈光纤激光器时-频-空域特性研究进展

范孟秋^{1,4}, 林圣淘², 吴 函³, 郑万国¹, 王子南²

(1. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900; 2. 电子科技大学 光纤传感与通信教育部重点实验室, 成都 611731; 3. 四川大学 电子信息工程学院, 成都 610064; 4. 中国工程物理研究院 研究生院, 北京 100088)

摘 要: 较为系统地回顾了近年来学术界在随机分布反馈光纤激光器时-频-空域特性方面的研究进展, 分析总结了随机分布反馈光纤激光器的时-频-空域动态特性影响因素, 展望了随机分布反馈光纤激光器应用于高功率激光驱动装置的前景, 并对未来潜在的研究方向进行了探讨。

关键词: 光纤随机激光器; 时域; 频域; 空域; 低相干性; 高功率激光装置

中图分类号: TN24 **文献标志码:** A **doi:** 10.11884/HPLPB202133.210306

Research progress of random fiber lasers' characteristics in time-frequency-spatial domain

Fan Mengqiu^{1,4}, Lin Shengtao², Wu han³, Zheng Wanguo¹, Wang Zinan²

(1. Laser Fusion Research Center, CAEP, P. O. Box 919-988, Mianyang 621900, China;

2. Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications of Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

3. College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China;

4. Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China)

Abstract: The recent research progress of random distributed feedback fiber lasers in the time-frequency-spatial domain is systemically reviewed in this paper. The factors influencing the time-frequency-spatial dynamic characteristics of random distributed feedback fiber lasers are analyzed and summarized. Finally, the prospects of random distributed feedback fiber lasers used in high-power laser driving facility are put forward, and the potential research area in future is discussed.

Key words: random fiber laser; time domain; frequency domain; spatial domain; low coherent; high power laser facility

随机分布反馈光纤激光器(简称光纤随机激光器)具有结构简单、鲁棒性好、设计灵活等优点^[1],自2010年首次提出以来,光纤随机激光器已在光纤通信、传感、成像以及高功率光纤激光器方向取得系列研究成果^[2-4]。其基于随机瑞利散射分布反馈,没有界限明确的谐振腔,具有无固定纵模间隔输出的特性。此外,光纤随机激光器在一维光纤波导中激射产生,具有良好的光束质量、激光方向性以及较高的功率密度。光纤随机激光器这些优异特性为非线性光纤光学、随机比特生成、副本对称性破缺等前沿问题探索提供了理想的研究平台^[5-8]。近年来,关于光纤随机激光器的研究开始向深层次的物理现象及机制拓展,研究人员通过研究光纤随机激光器的时域、频域、空域特性,进一步揭示光纤随机激光器多域物理特性,取得了丰富的理论和实验研究成果,极大促进了光纤随机激光器的基础研究。在此主要介绍近几年随机分布反馈光纤激光器在时-频-空域动态特性及调控方向的最新研究进展,并对其在高功率激光驱动装置中的应用前景和难点进行了展望。

* 收稿日期:2021-07-23; 修订日期:2021-11-03

基金项目:中国工程物理研究院激光聚变研究中心青年人才基金项目(RCFCZ3-2019-7);国家自然科学基金项目(61205048, 61290312, 61635005);国家万人计划青年拔尖人才项目(W030211001001);四川省杰出青年科技人才项目(2020JDJQ0024)

联系方式:范孟秋, fanmengqiu@163.com。

通信作者:王子南, znwang@uestc.edu.cn;

郑万国, wgzhen_gaep@sina.com。

1 理论模型

光纤随机激光器继承于随机激光器,是一种新型的无单一谐振腔的光纤激光器,其反馈来源于光纤中随机分布的后向瑞利散射。光纤随机激光器的增益可以是光纤中的受激拉曼散射,也可以是受激布里渊散射,目前已发展出基于稀土掺杂的有源增益,最终可实现稳定的激光输出。光纤随机激光器激光原理如图1所示。因为光纤中折射率分布的不均匀性,光纤中传输的光子会发生瑞利散射。绝大多数散射光子从光纤芯层逸出,只有大约 10^{-3} 比例的后向散射光子仍被束缚在光纤波导中;受激拉曼散射增益被用来放大瑞利散射光子并促成随机激光在光纤两个端面的激光输出。

随着对光纤随机激光器的深入研究,其常见结构总结为

3种,即全开腔、前向泵浦和后向泵浦^[5],如图2所示。图2(a)为前向泵浦的结构图,泵浦和点式反射镜位于光纤同侧,光纤另一端为激光器输出端,中间泵浦的全开腔结构可与前向泵浦等价;图2(b)为后向泵浦的结构图,泵浦和点式反射镜分别位于光纤的两侧,泵浦端亦为激光器输出端,双端泵浦的全开腔结构与后向泵浦等价;图2(c)为单端泵浦的全开腔结构,该结构下无点式反射镜,完全靠光纤的瑞利散射提供反馈。

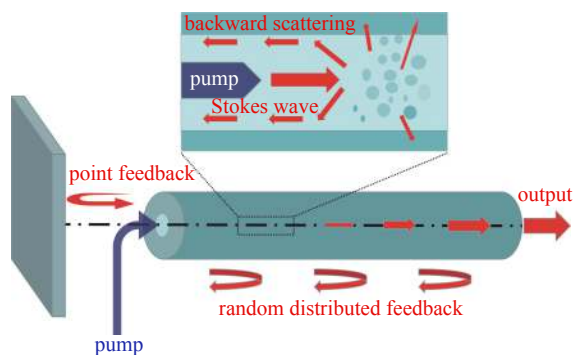


Fig. 1 A concept of the random distributed feedback fiber laser^[5]

图1 光纤随机激光概念示意图^[5]

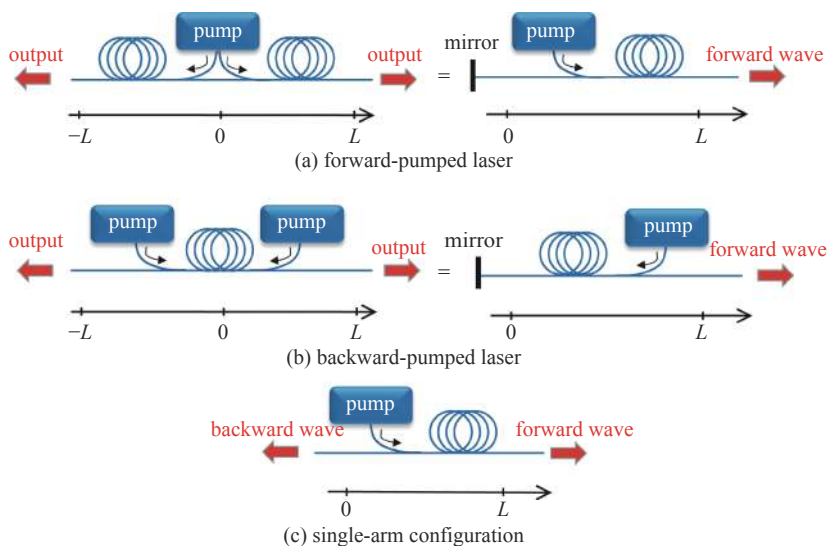


Fig. 2 Randomly distributed feedback fiber laser configurations^[5]

图2 光纤随机激光器不同结构^[5]

目前对光纤随机激光器的研究除了针对以上3种常见结构之外,其他类型的结构基本上由以上3种演变而来。对于光纤随机激光器的理论模型的建立和分析经过多年的发展已经较为完备。已有的理论模型主要可以分为两种,其中一种称为功率平衡模型,此模型基于耦合方程建立,主要描述光纤随机激光器的输出功率特性^[9-10],在研究激光器功率分布、输出效率、阈值等方面具有计算速度快的优势,广泛应用于光纤随机激光器的结构设计与功率特性优化。但是功率平衡模型并未考虑非线性克尔效应、光纤色散等作用,因此对光谱演化过程不能准确仿真计算。为此,研究人员利用非线性光纤光学中常用的非线性薛定谔方程(NLSE)来描述光纤随机激光的光谱演化过程^[11],并考虑可积分的非线性薛定谔方程,发展了光纤随机激光动力学模型^[12-13]。事实上,基于NLSE的动力学模型不仅可以描述光纤随机激光的输出功率和光谱特性,也可以模拟仿真激光器时序和统计特性。

1.1 功率平衡模型

在光纤随机激光研究早期,多以受激拉曼散射作为增益手段,因此关于光纤随机激光的功率平衡模型早期也是基于受激拉曼散射发展起来的。为简化起见,以最简单的一阶拉曼散射光纤随机激光器特性为例介绍基于稳态方程的功率平衡模型,其他情况包括高阶斯托克斯光的光纤随机激光器和偏振泵浦的随机激光器等模型可以进行适当修正。在功率平衡模型中,泵浦和斯托克斯光的耦合作用是主要出发点,同时光纤中对功率影响的关键因素

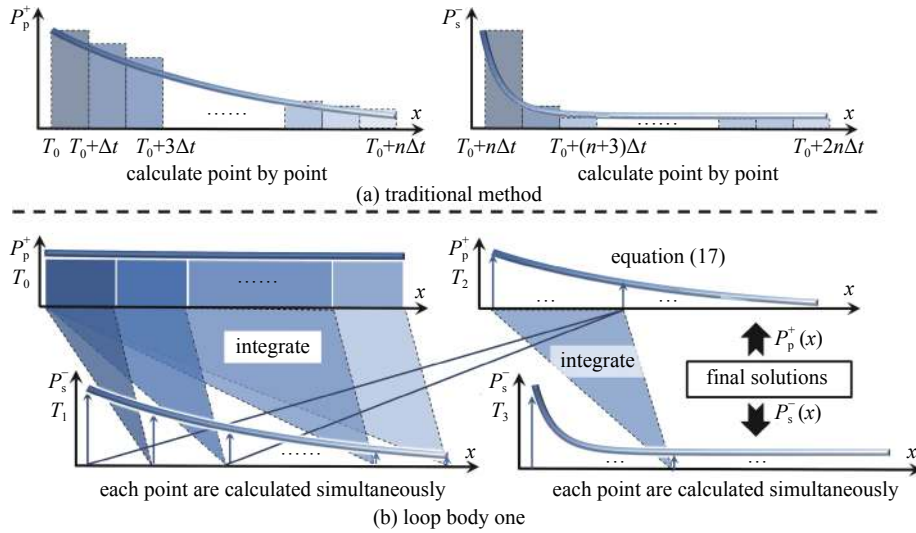
包括光纤损耗、瑞利散射、拉曼增益等作用也考虑在内，耦合方程为^[9-10]

$$\frac{dP_p^\pm}{dz} = \mp \alpha_p P_p^\pm \mp g \frac{f_p}{f_l} P_p^\pm \left[P_1^+ + P_1^- + 4hf_l \Delta f \left(1 + \frac{1}{e^{h(f_p - f_l)/K_B T} - 1} \right) \right] \pm \varepsilon_p P_p^\pm \quad (1)$$

$$\frac{dP_l^\pm}{dz} = \mp \alpha_l P_l^\pm \pm g \left[P_1^+ + 2hf_l \Delta f \left(1 + \frac{1}{e^{h(f_p - f_l)/K_B T} - 1} \right) \right] (P_p^+ + P_p^-) \pm \varepsilon_l P_l^\pm \quad (2)$$

式中：下标“p”和“l”分别为泵浦光和激光光； α 为光纤损耗项； g 为拉曼增益项； ε 为瑞利散射； f 为光波频率； Δf 为激光光的线宽； K_B 和 h 分别为波耳兹曼常数和普朗克常数； T 为光纤的绝对温度。上述方程的实质是一组微分方程，数值求解过程可以考虑利用弛豫法，边界条件由具体的泵浦结构和反馈结构决定。

但是上述基于功率平衡模型的仿真平台仍存在物理过程复杂、仿真速度慢等问题，探究光纤随机激光器的理论基础可以发现，主要问题在于稳态模型没有解析解。为此，电子科技大学的研究团队将随机激光理论模型与生物学中经典猎物-捕食者模型相结合，实现了半开腔随机激光稳态模型解的准解析化，从理论上解释了短腔随机激光高光-光转化效率的原因，凸显了随机激光内在的物理本质；同时，在仿真速度上，与传统功率平衡模型相比（见图3），基于准解析化表达式的仿真平台能够实现并行化运算，运算速度可以实现数量级的提升^[14]。



(a) traditional Euler method, (b) the method for solving UCM (ultrafast convergent power-balance model) used in “loop body one”

Fig. 3 Methods for solving the systems of differential equations of the Raman random fiber laser^[14]

图3 拉曼光纤随机激光器微分方程模型不同求解方法^[14]

随着对光纤随机激光器的深入研究，为了进一步提高随机激光器输出功率、降低阈值，研究人员引入特种光纤来提供有源增益，典型的包括掺铒光纤和掺镱光纤。由于稀土离子掺杂光纤对泵浦吸收系数较大，激光器设计时使用的稀土离子光纤长度均有限，在提供足够增益的情况下瑞利散射有限。因此，目前稀土离子掺杂的光纤随机激光器多采用增益光纤与无源光纤结合的方式，其中掺杂光纤提供增益，无源光纤提供分布式瑞利反馈^[15-19]。以掺镱光纤随机激光器为例，掺镱双包层光纤的长度一般为米级，而无源单模光纤长度一般为数千米，以提供足够的瑞利散射反馈。由于采用的光纤长度相比于无源光纤短很多，因此不考虑掺镱光纤中的瑞利散射对随机激光的影响，而在无源单模光纤段，仅考虑光在单模光纤中的损耗及瑞利散射。基于上述简化，稀土掺杂离子增益的光纤随机激光器功率平衡模型可以在式(1)、式(2)基础上进行修正，增益光纤段基于能级理论仅考虑增益和损耗，无源光纤段仅考虑散射和损耗即可。

1.2 动力学模型

除了上述功率模型之外，基于NLSE方程的动力学模型也是描述光纤随机激光器特性的一种有效手段，特别是光纤随机激光器的光谱、时域和统计特性。其方程为^[11]

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_p^\pm}{\partial z} - \frac{1}{v_{gs}} \frac{\partial A_p^\pm}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2p} \frac{\partial^2 A_p^\pm}{\partial t^2} + \frac{\alpha_p}{2} A_p^\pm &= i\gamma_p |A_p^\pm|^2 A_p^\pm - \frac{g_p(\omega)}{2} (\langle |A_s^\pm|^2 \rangle + \langle |A_p^\mp|^2 \rangle) A_p^\pm \\ \frac{\partial A_s^\pm}{\partial z} + \frac{i}{2} \beta_{2s} \frac{\partial^2 A_s^\pm}{\partial t^2} + \frac{\alpha_s}{2} A_s^\pm - \frac{\varepsilon(\omega)}{2} A_s^\pm &= i\gamma_s |A_s^\pm|^2 A_s^\pm + \frac{g_s(\omega)}{2} (\langle |A_p^\pm|^2 \rangle + \langle |A_p^\mp|^2 \rangle) A_s^\pm \end{aligned} \quad (3)$$

式中: z 和 t 分别为空间和时间量, A 为光场幅度包络, v_{gs} 为泵浦和激光光群速度差, ω 为光频率, g 和 ϵ 与频率相关, “+”为光沿 z 轴正向, “-”为光沿 z 轴负向, “s”和“p”分别代表随机激光和泵浦光。式中不仅考虑了光场幅度, 光纤中的色散、损耗、Kerr 效应、拉曼散射和瑞利散射效应均被考虑其中, 参量 β_2 , α , γ , g 和 ϵ 分别对应前述各个光纤中的效应。自发拉曼散射通常用高斯白噪声来模拟。

基于 NLSE 的动力学模型不仅可以描述前述的光纤随机激光器的各种功率特性, 也可以研究光纤中的色散以及其他非线性效应对光纤随机激光器激光特性的影响^[11]。利用分布傅里叶算法可以对 NLSE 方程进行很好的数值求解^[20]。图 4 为利用上述模型仿真得到的随机激光的激光特性。图中灰色曲线代表光纤中拉曼增益谱, 黑色和红色曲线分别表示 0.85 W 和 3 W 泵浦功率情况下激光的正向随机激光输出功率谱密度 ($\Delta\lambda = \lambda - 1550$ nm)。由图 4 可以看到, 随着泵浦光功率的增加, 激光光谱越来越宽, 这与实验结果一致。

2 时域动态特性

关于光纤随机激光器的时域特性研究主要集中在 2 个方面: 一方面是对随机激光的时序进行调控, 即产生脉冲随机激光。由于光纤随机激光无固定纵模间隔, 因此较难实现锁模超短脉冲输出。为了实现光纤随机激光器的脉冲输出, 目前主要采用主动调制和被动调制两种方案。主动调制手段一般通过主动调制器件实现光纤随机激光脉冲输出^[21-24], 可以是腔内调制, 也可以是腔外调制; 被动调制方式^[25-29]主要包括 SBS 引入被动调 Q 、被动增益时空调制、可饱和吸收体等手段。这一部分工作在已有的综述文章和学位论文中有较为详细的总结^[4,30-31], 在此不再过多介绍。另一方面是时域动态特性, 包括短时间尺度下的时域动态起伏及其时域强度统计分布特性, 以及较长时间尺度下的低相对强度噪声 (RIN) 光纤随机激光器实现。本节重点针对时域动态特性进行介绍。

一般认为, 连续输出的带宽较大的激光器, 其输出强度在时域存在快速波动的动力学过程, 且不同频率成分间的非线性效应及模式竞争等相互作用, 会显著影响时域强度的统计特性^[32-34]。光纤随机激光器虽然在泵浦功率远超阈值时表现出输出功率较为稳定的特性, 但由于其没有固定的谐振腔模式, 其输出光谱也可以看作是连续光谱, 那么其时域强度也应表现出一定的起伏。为了进一步研究光纤随机激光器的时域输出强度起伏特性, 新西伯利亚大学的研究团队借鉴传统激光器时域动态特性研究的方法, 通过修正 NLSE 方程, 建立了 1.2 节介绍的随机激光动力学模型^[11]。图 5 展示了基于 NLSE 模型的光纤随机激光器输出时域和统计特性, 图 5(a) 展示了典型的激光输出

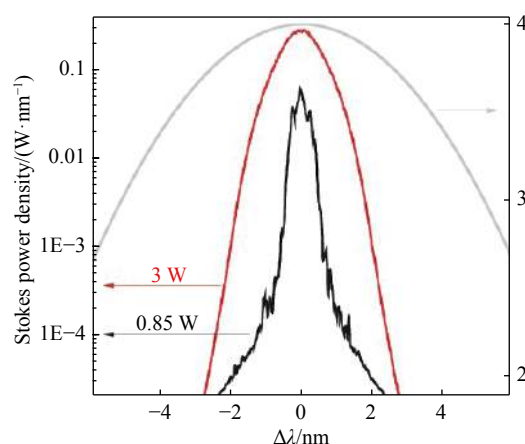


Fig. 4 Lasing spectral characteristics of randomly distributed feedback fiber laser based on NLSE^[11]

图 4 基于 NLSE 模型的光纤随机激光器激光光谱特性^[11]

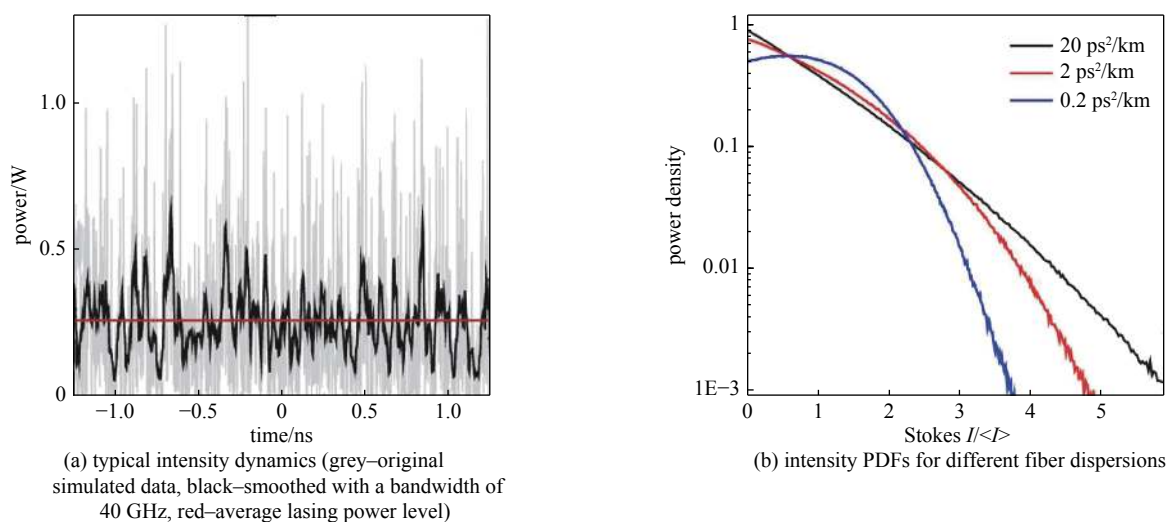


Fig. 5 Temporal and statistical characteristics of randomly distributed feedback fiber laser based on NLSE^[11]

图 5 基于 NLSE 模型的光纤随机激光器输出时域和统计特性^[11]

强度动态特性(灰色曲线表示原始仿真结果,黑色曲线表示 40 GHz 带宽平滑后的结果,红色表示平均激励功率)。时域计算结果表明,随机激光存在 ps 量级功率波动,但实验中由于受到示波器和探测器带宽的限制,实际观测到的随机激光功率输出波动不及仿真中那么剧烈。最后,关于随机激光的统计特性仿真结果表明,其统计分布和标准高斯型存在一定偏差,表明光纤随机激光器输出光谱内各频率分量间存在一定的关联性,并且受光纤色散效果的影响明显,光纤色散系数越小,偏离越大,如图 5(b)所示。该仿真结果表明,通过对光纤参数(如光纤色散及非线性系数)的管理,可以增强或减弱光纤随机激光器各频率分量间通过四波混频等非线性效应引入的关联性,从而实现对光纤随机激光器时域强度动态特性的调控。

2015 年, Gorbunov 等人报道了光纤随机激光器的动态特性实验研究结果^[35],采用 33 GHz 的实时示波器和一个 50 GHz 带宽的探测器来获取激光器的强度动态信息,试验验证了光纤随机激光器输出的准连续光存在 ps 量级的强度起伏,如图 6(a)所示,虽然随机激光稳定后其光谱展宽导致激光谱宽超过了示波器的带宽,但通过测试不同电设备测试带宽下的激光输出强度概率密度函数,图 6(b)所示,仍可以得出激光场分布偏离高斯型的结论,验证了之前的理论仿真结果。

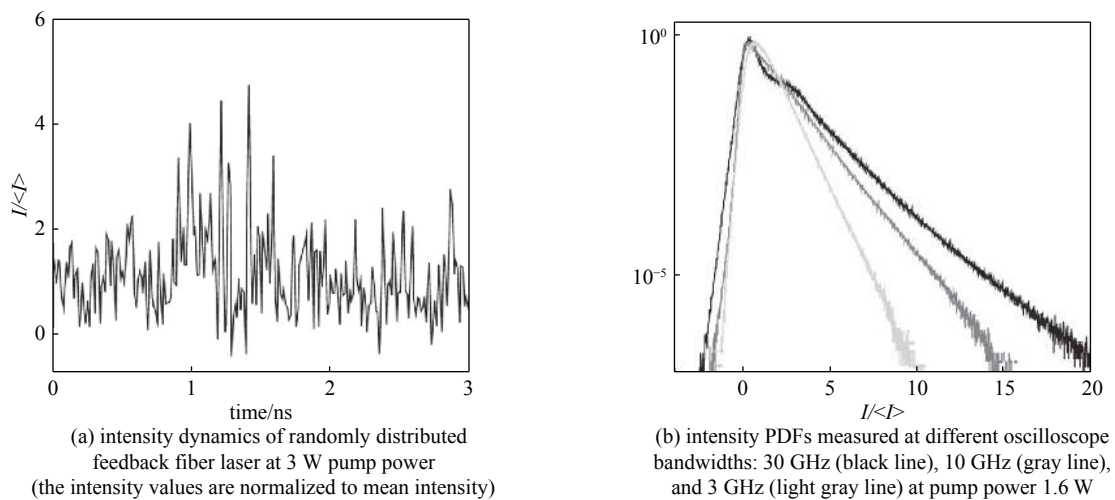
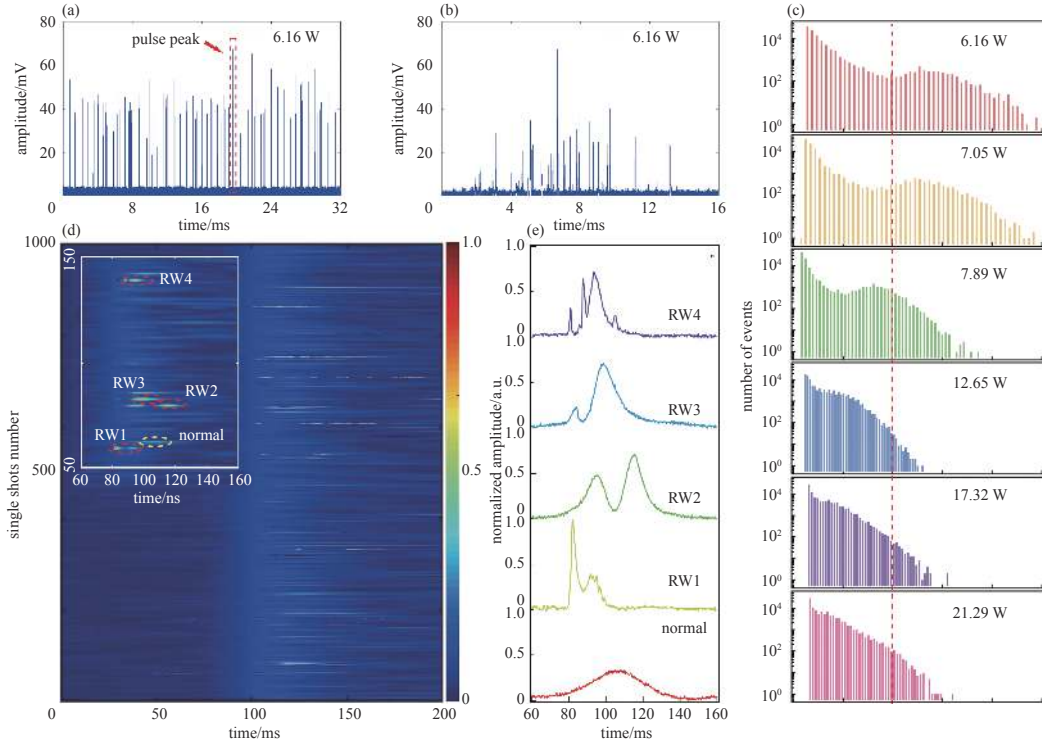


Fig. 6 Output intensity characteristics of randomly distributed feedback fiber laser^[35]

图 6 光纤随机激光器强度输出特性^[35]

来自国防科技大学、新西伯利亚大学、四川大学的研究团队先后通过实验观察到了光纤随机激光器中时域强度的强起伏甚至怪波(Rogue Wave)现象^[36-38]。研究人员利用放大自发辐射(ASE)泵浦一段单模光纤,形成光纤随机激光器,然后使用 45 GHz 带宽的探测器、16 GHz 示波器采样随机激光时域输出,得到如图 7 所示时域强度和统计特性图^[36]。可以看到,由于光纤腔体中 SBS 效应的随机特性,输出随机激光的脉冲间隔、脉冲宽度和幅度等特性均随机变化。但是,由于使用了高稳定的 ASE 泵浦,光纤随机激光器腔内的 SBS 效应能从激光阈值一直保持到泵浦达到最大输出功率水平,而没有因为泵浦功率的起伏导致光谱展宽而对怪波产生进行抑制。来自新西伯利亚大学的研究人员进一步研究了光纤随机激光器中怪波的统计分布特性,并通过典型辐射时间(characteristic radiation time)这一特征值将怪波发生数量进行联系,揭示了怪波产生服从 Poisson 分布的特性^[37]。来自四川大学的研究人员通过对铟镱共掺的光纤随机激光器(EYRFL)进行时域强度分析,首次揭示了双包层泵浦光纤随机激光器的时域快速动态响应特性^[38]。研究人员对产生的随机激光光谱进行光谱滤波,分别测试了中心波长、偏离中心波长 0.4 nm 和 0.8 nm 的时域动态特性,均观察到了比较明显的怪波产生,如图 8 所示。通过时域强度统计特性分析也发现,随机激光的强度起伏与滤波波长强相关,而在远离中心波长的边带部分,强度概率密度函数具有长拖尾现象。同时,研究人员也发现,中心波长附近的概率密度函数偏离指数分布,而与激光器工作体制相关,也进一步揭示了随机激光不同光谱成分间相互作用对激光光谱稳定性的影响。

光纤随机激光的时域动态特性是在纳秒甚至皮秒尺度上对其输出强度进行分析,除此以外,研究人员在更长的时间尺度上对随机激光低 RIN 噪声、高输出稳定性方面也做了诸多研究,以期实现随机激光更好的应用。前者主要研究的是短时间尺度上的瞬态特性,后者主要是长时间尺度上的积分特性,即使会频繁产生怪波,光纤随机激光的输出功率稳定性依然可以做到标准差 0.5% 以下,峰-峰值 1.21%^[36]。国防科技大学 Jiangming Xu 和中国科学院



(a) and (b) typical temporal trace of the output random laser around threshold. (c) histograms (log scale) showing the distribution of optical intensity maxima for 10^5 trace events. The peak intensities are normalized by the corresponding SWH (defined as the mean height of the highest third of events) values. The vertical dashed lines indicate $2 \times$ SWH and thus mark the limit for a pulse to be considered as an optical RW (Rogue Wave). (d) evolution of consecutive traces around optical RW events at threshold. (e) pulse shapes of typical normal and optical RW events.

Fig. 7 Output temporal characteristics and statistical features of random fiber laser^[36]

图 7 光纤随机激光器时域和统计输出特性^[36]

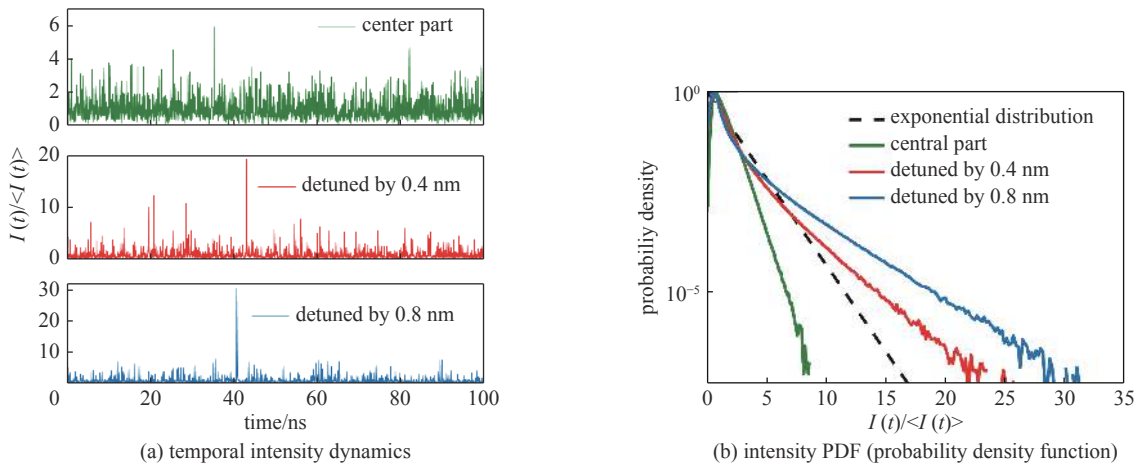


Fig. 8 Temporal intensity dynamics and PDF of filtered random lasing radiations at different spectral locations^[38]

图 8 不同波长滤波后光纤随机激光器的时域动态特性及概率密度分布^[38]

上海光学精密机械研究所 Yan Feng 研究小组近年来致力于非相干泵浦情况下光纤随机激光器的高稳定输出特性研究^[36, 39-42]。2017 年, Jiangming Xu 等人首次实现了基于 ASE 泵浦的百瓦级线偏振二阶光纤随机激光, 通过缩短无源光纤长度, 二阶随机激光泵浦量子效率达到 86.43%, 是当时报道的转化效率最高的高阶拉曼随机激光器^[39]。同时, 由于采用高稳定的线偏振全光纤 ASE 光源, 随机激光输出功率稳定性标准差达到 1% 以下, 峰-峰值 2.92%, 如图 9 所示。2018 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所 Yan Feng 等人利用 ASE 泵浦实现了高阶 (>3) 的拉曼光纤随机激光器^[40]。在该工作中, ASE 种子光经过主振荡功率放大器 (MOPA) 放大后带宽仅为 0.9 nm, 通过 1 GHz 带宽示波器测得其时域强度起伏约 9% (峰-峰值), 相比而言, 0.7 nm 的掺镱光纤振荡器时域强度起伏达到 119%。利用此 ASE 泵浦, 最终得到了 8 阶、光谱纯度超过 90%、最大功率 6.9 W 的拉曼光纤随机激光输出。更重要的是, 利

用 ASE 泵浦的高阶光纤随机激光时域输出仅存在较小的波动,最大强度起伏约为 9%,而利用传统光纤振荡器泵浦的高阶光纤随机激光器强度起伏达到了 113%,如图 10 所示。该工作表明泵浦激光的时域特性在级联光纤随机激光器输出特性中起到重要作用。2019 年, Jiangming Xu 研究小组在进一步分析了 ASE 泵浦的线宽和输出功率稳定性的关系后,认为适当增加 ASE 泵浦的带宽可以进一步提升泵浦功率稳定性,抑制随机激光光谱展宽,并提升随机光输出功率。最终他们利用 10 nm 带宽的 ASE 泵浦,实现了百瓦量级光纤随机激光输出^[41]。通过优化 ASE 泵浦线宽和泵浦功率(见图 11),实现了高光谱纯净度的 8 阶拉曼随机激光输出,光谱纯净度最高超过 98%,为减小随机激光光谱相互作用,实现高稳定输出随机激光提供了可能^[42]。

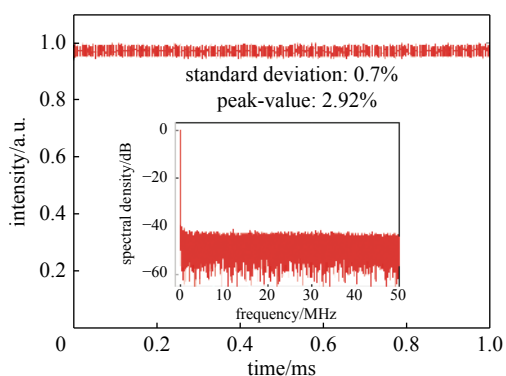


Fig. 9 Temporal signals and corresponding spectral densities of the RFL at maximal pump power^[39]

图 9 最大泵浦功率时输出随机激光的时域信号和相应的频谱密度^[39]

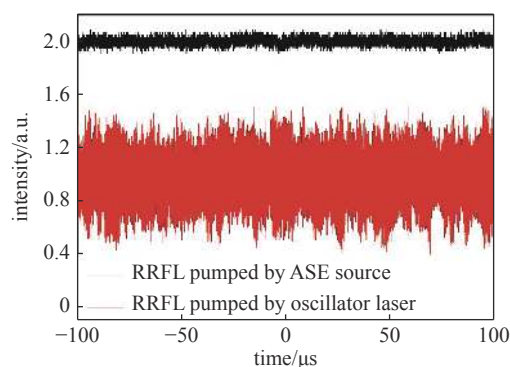
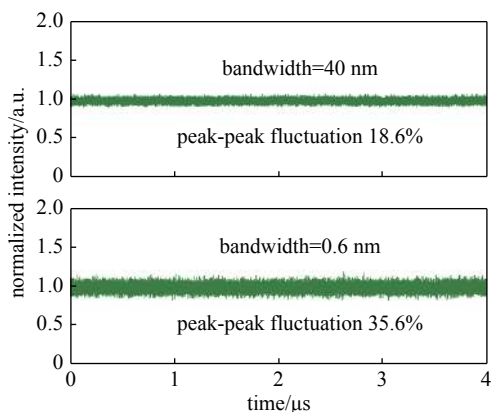
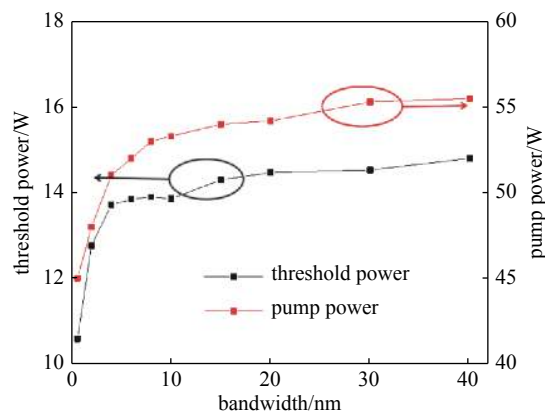


Fig. 10 Normalized oscilloscope traces of the RRFL output by different pump^[40]

图 10 不同泵浦源情况下光纤随机激光器归一化时域曲线^[40]



(a) temporal behavior of the ASE source at a bandwidth of 40 nm and 0.6 nm

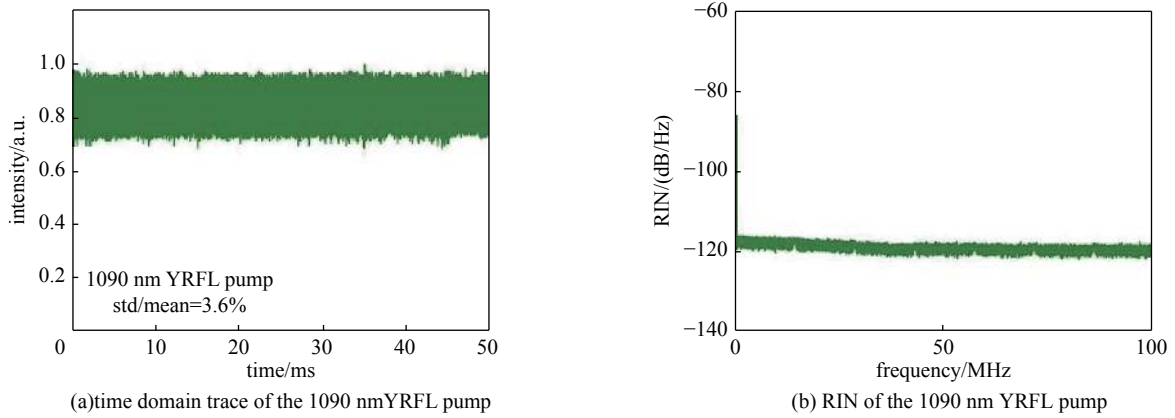
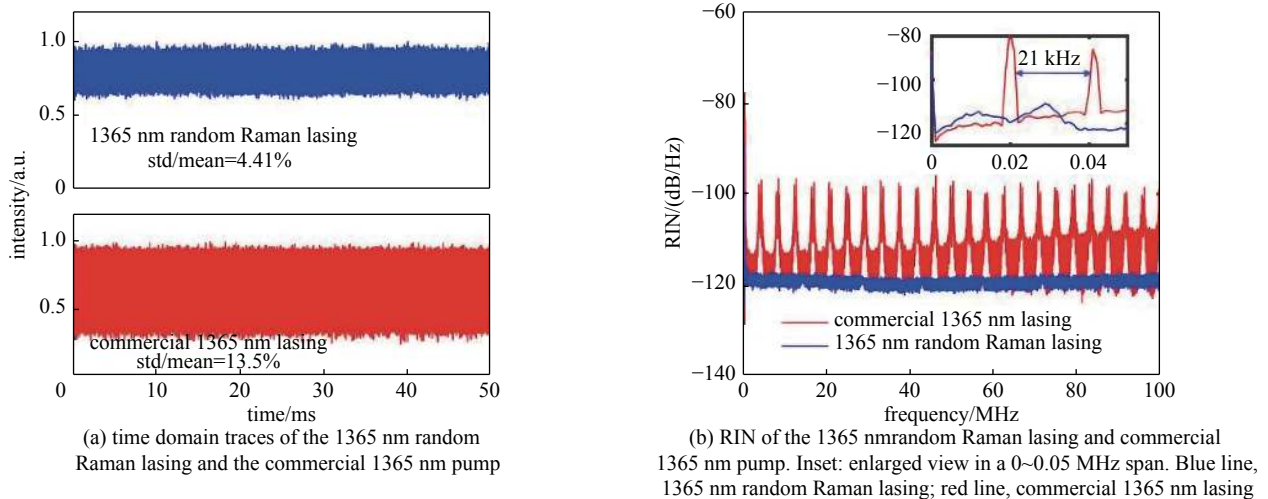


(b) threshold power of the 9th order Stokes (output power of the 8th order Stokes when the signal to noise ratio of the 9th order Stokes is 10 dB) and the corresponding pump power under different bandwidths

Fig. 11 Effect of bandwidth of ASE pump on random fiber laser^[42]

图 11 ASE 泵浦线宽对光纤随机激光器的影响^[42]

沿着上述思路,来自电子科技大学的研究团队提出了另一种实现低相对强度噪声(RIN)、时域输出稳定的光纤随机激光器方案。不同于前述工作中利用 ASE 光源作为光纤随机激光的泵浦, Bing Han 等人提出了基于掺镱光纤随机激光器(YRFL)泵浦的高阶拉曼光纤随机激光器^[43]。该工作中,拉曼光纤随机激光由一个 1090 nm 的 YRFL 泵浦,且拉曼随机激光与 YRFL 共腔,能最大限度地利用 YRFL 泵浦且激光器腔体结构紧凑简单。研究人员首先测试了 1090 nm YRFL 的时域强度特性和相对强度噪声,如图 12 所示。可以看到,相比传统基于固定谐振腔的掺镱光纤激光器,YRFL 展示出无固定纵模间隔的特性,且由于没有谐振腔纵模间稳定拍频导致的周期性脉冲,YRFL 时域强度更体现出随机起伏的特征,也使得该 YRFL 具有更低的 RIN(0~100 MHz,约-120 dB/Hz),为实现时域高稳定输出拉曼随机激光奠定了基础。作为对比, Bing Han 等人测试了 YRFL 泵浦的四阶 1365 nm 光纤随机激光和商用 1365 nm 光纤激光器的时域稳定性,如图 13 所示。YRFL 在时域强度稳定性和 RIN 转移上,均显著优于商用 1365 nm 光纤激光器。

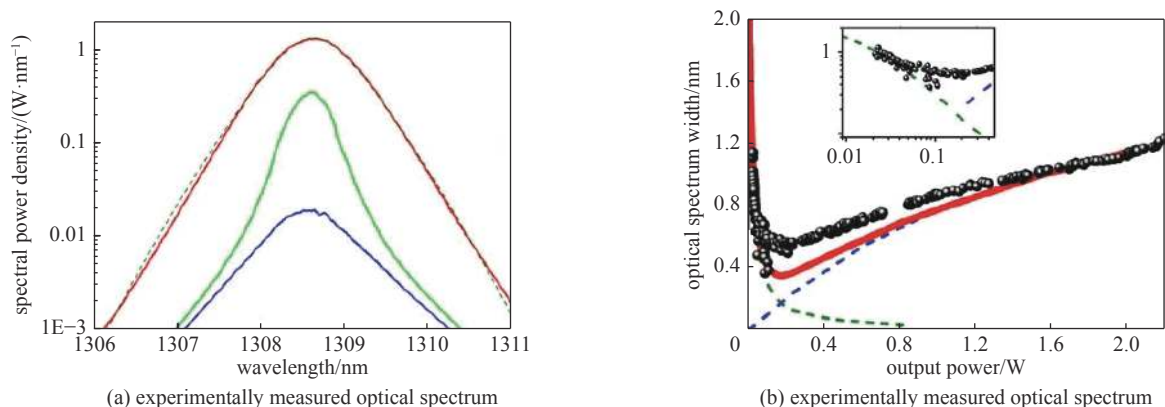
Fig. 12 Characteristics of 1090 nm YRFL pump^[43]图 12 1090 nm YRFL 泵浦特性^[43]Fig. 13 Comparison between 1365 nm RFL pumped by 1090 YRFL and commercial 1365 nm fiber laser^[43]图 13 1090 nm 泵浦的四阶 1365 nm 光纤随机激光与 1365 nm 商用掺镱光纤激光器对比^[43]

3 光谱动态及统计特性

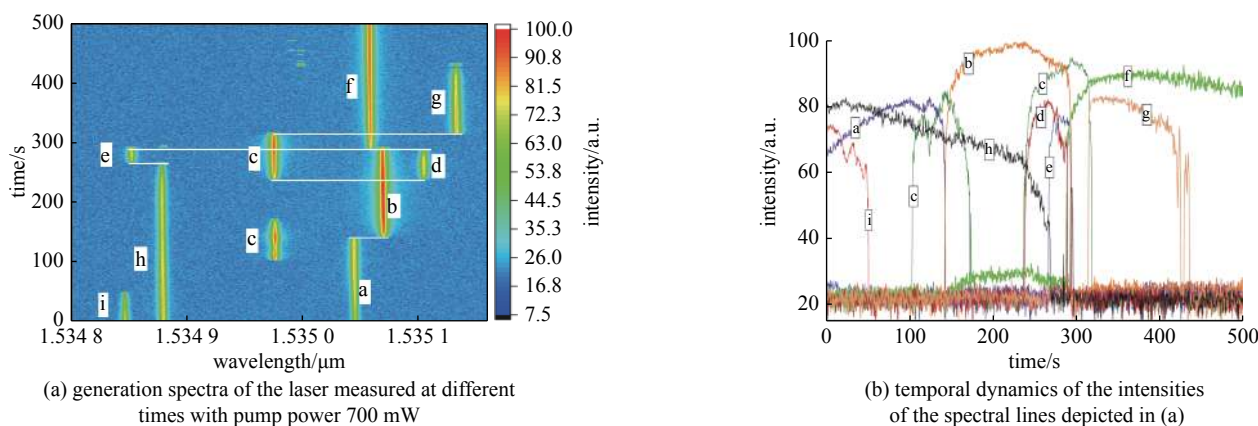
光谱是光纤随机激光器的一个重要输出表征结果,其输出光谱特性蕴含着丰富的物理内涵。研究人员从研究光纤随机激光器开始就一直关注其输出光谱特性,在多波长输出、可调谐波长输出以及窄线宽输出方面做了大量研究工作,取得了丰富的理论和实验结果。关于此方面的研究进展在之前的一些文献中已经进行了相关的总结^[4],在此不再讨论。下面针对光纤随机激光器的输出光谱动态及统计特性这一更深层次的基础物理问题研究进展进行介绍。

首先,在光纤随机激光器的光谱演变规律研究方面,Churkin 等人系统地从理论和实验两方面分析了基于瑞利反馈的光纤随机激光器光谱演变过程,如图 14 所示。图 14(a)中蓝色、绿色、红色曲线分别表示激光功率为 0.025 W (阈值附近)、0.2 W (稍微超过阈值)和 1.5 W (超过阈值)时激光输出光谱。实验测得的光纤随机激光光谱谱宽在达到阈值后迅速窄化,而随着输出激光功率的提升,随机激光谱宽在达到最小值后会随着功率的增加而逐渐变宽。通过建立适用于光纤随机激光器的动力学模型,对光纤随机激光器光谱演化过程可以进行理论分析,如图 14(b)所示。其中黑色圆点表示实验测得的激光光谱宽度演化数据,蓝色点线表示利用基于局域波动方程建立的非线性波动理论预测光谱展宽过程,绿色点线表示基于修正的线性肖洛-汤斯理论预测得到的光谱窄化过程,红色曲线表示非线性和线性两种因素叠加得到的光谱演化理论分析结果。可以看到理论得到的光纤随机激光器光谱和谱宽随输出功率的变化曲线与实验测试的结果高度吻合^[13]。

在光纤随机激光器光谱动态特性方面,传统观点认为,基于强散射系统的传统三维随机激光器由于可以形成闭环的相干反馈,其激光光谱存在明确的尖峰成分,并遵循肖洛-汤斯线宽关系^[44]。另一方面,在无法形成闭环谐

Fig. 14 Spectrum evolution of random fiber laser based on Rayleigh scattering^[13]图 14 基于瑞利反馈的光纤随机激光器光谱演变过程^[13]

振的非相干反馈随机激光系统中, 激光光谱将变得平滑而没有窄带尖峰成分^[45]。光纤随机激光器由于在一维方向上靠瑞利散射提供反馈, 且瑞利散射极其微弱, 因而一直被认为是一种非相干反馈机制, 其激光光谱平滑且没有尖峰。前述的基于光纤随机激光动力学模型仿真得到的分析结果和实验结果也印证了上述观点^[11]。来自以色列、墨西哥和俄罗斯的联合团队针对基于随机分布光纤布拉格光栅 (FBG) 的掺铒光纤随机激光器光谱时域动态特性开展了实现和基于现象学模型的理论研究^[46]。他们利用 10 Hz 采样频率、1.2 pm 分辨率的光谱仪测试了数百秒的随机激光光谱, 发现随机激光特定激光波长的持续时间持续数秒到数百秒, 所有激光波长的激光和消失相互之间也存在极大的相关性, 一个波长的出现总是伴随着另一个波长的消失, 一个波长消失后也可能再次出现, 而且一个激光波长的建立时间远小于其持续时间, 如图 15 所示。值得指出的是, 图 15 中虽然展示了 9 种激光模式, 但是同一时间段内通常只有 2~4 个 (大概率是 3 个) 激光模式存在。基于以上实验现象, 研究人员还修正了包含翻转粒子数密度和模式不稳定性的速率方程, 用来匹配观察到的随机激光光谱时域演化, 并且指出在模型中考虑了饱和和吸收效应后将降低激光模式的 Q 值, 从而改变振荡器激光的模式。

Fig. 15 Temporal dynamics of the generation spectra of the measured random fiber laser (the letters in (a) and (b) mark the same spectral lines)^[46]图 15 光纤随机激光器不同激光波长成分的时域动态特性 ((a), (b) 中相同字母表示相同的激光谱线)^[46]

来自俄罗斯的研究团队对光纤随机激光光谱出现窄带尖峰成分原因也持类似观点。他们认为基于光纤瑞利散射的随机激光器也可能形成相干反馈, 并导致光纤随机激光器的激光光谱存在窄带尖峰, 并将原因归结于弱散射系统中的激光模式之间的相互作用^[33] 和低 Q 谐振系数^[47]。2016 年, Gorbunov 等人对多波长光纤随机激光器以及其中独立波长的时域统计特性进行了分析^[33]。研究人员利用一个 Lyot 滤波器得到了谱宽超过 13 nm 的多波长随机激光输出, 其中每个分立的激光谱线幅值相差不超过 6 dB, 这使得研究人员可以通过滤波手段对激光光谱中的每个独立谱线的时域动态特性进行研究。结果表明, 组成光纤随机激光光谱的单个分立谱成分强度统计特性近高斯分布, 表现出较强随机特性, 但整个激光光谱的强度统计特性却并不完全随机。分析认为各分立谱之间存在一定的相互关系, 并通过现象学联系修正了随机多波长光纤随机激光模型, 表明各分立谱间的非线性相互作用是影响光谱动态特性的重要因素。来自同一个课题组的研究人员利用扫描法布里-珀罗 (F-P) 干涉仪实现了光纤随

机激光器快速光谱测量, 光谱采样率可达 180 Hz, 最后对采集到的大量光谱做统计分析。图 16 展示了光纤随机激光器频域-时域动态演化特性, 在激射光谱中存在众多峰值功率与波长均不同的窄带成分, 从实验揭示了光纤随机激光器光谱在阈值附近存在窄峰特征及其动态特性^[47]。进一步地, 通过采集大量光谱数据, 计算所得的各个波长强度间的相关性 (Pearson 相关系数), 研究人员发现, 阈值附近光纤随机激光光谱存在受激布里渊散射效应, 且波长间隔 0.02 nm 的点之间存在较强负相关系数, 与拉曼增益振动模式间的竞争有关, 表明此时光纤随机激光光谱多个频率分量之间存在强度相关性, 如图 17 所示。

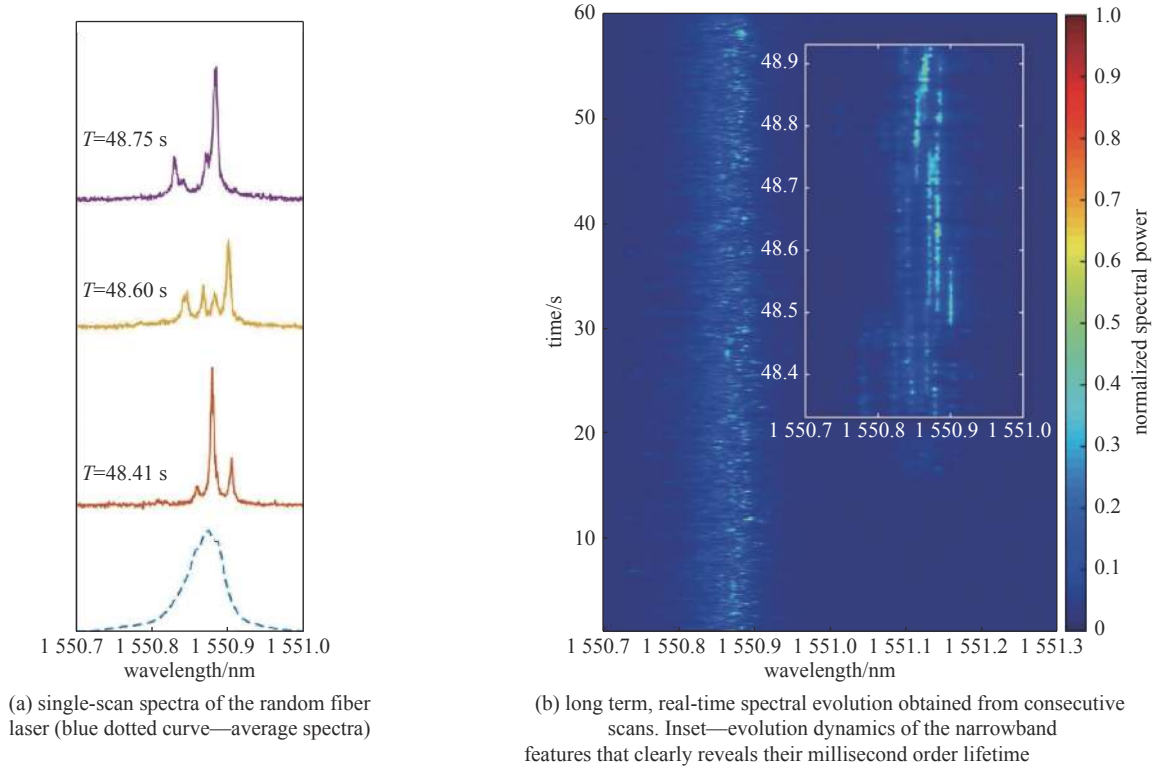


Fig. 16 Real-time spectro-temporal evolution in the random fiber laser^[47]

图 16 光纤随机激光实时频域-时域动态演化^[47]

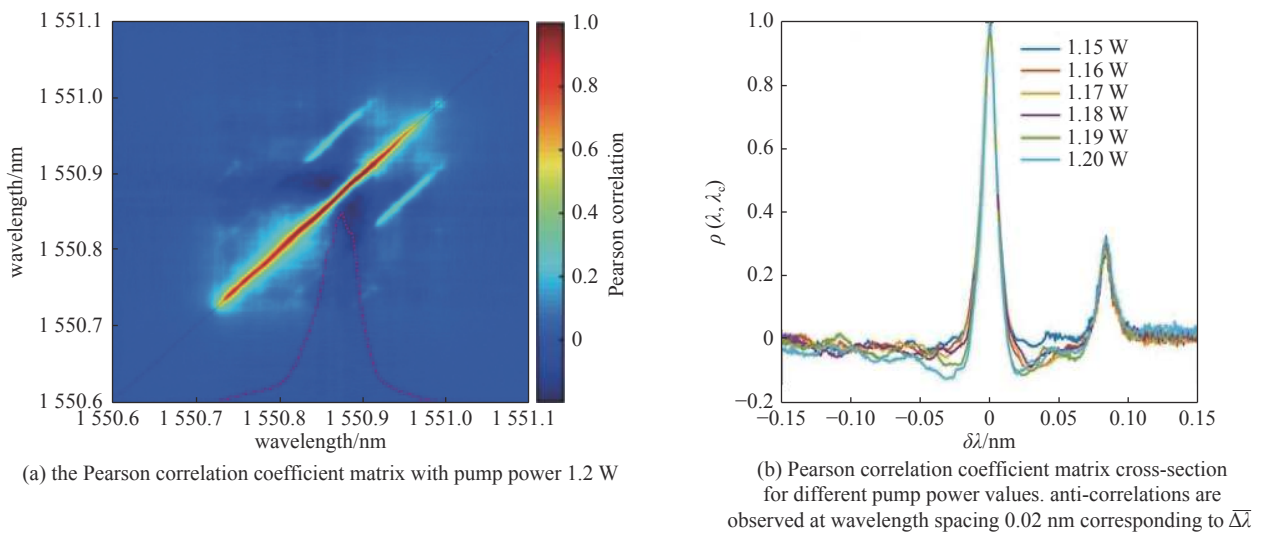


Fig. 17 Spectral correlations in the random fiber laser^[47]

图 17 光谱相关性结果^[47]

除了前述光谱演变规律、光谱动态特性之外, 光谱强度统计特性也是随机激光光谱特性的重要方面之一。在早期的二维及三维随机激光的光谱强度统计特性研究方面, 研究人员已经得出了一些基本规律: 在激射阈值以下时, 随机激光的光谱强度统计分布遵循高斯分布, 阈值附近时将突变为莱维分布, 当泵浦功率远超阈值后, 又重新

回归于高斯分布^[31]。莱维分布可以由莱维 α 稳态分布表达式进行描述, 其中, 莱维因子 $\alpha \in (0, 2]$ 是最重要的参数, 其代表了随机量的波动强度, 当 $0 < \alpha < 2$ 时, 表明统计分布是莱维分布, 随机变量的强度波动较大; 当 $\alpha = 2$ 时, 统计分布为高斯分布, 随机变量的强度波动较小^[48]。在一维光纤随机激光器中, 研究人员首先针对基于随机光纤光栅的稀土掺杂增益光纤激光器光谱强度统计特性进行了研究分析^[49-51]。通过光谱仪采集上万组光谱数据进行的统计分析表明, 此类激光器的光谱强度统计特性也体现出从阈值前的高斯分布到阈值附近的莱维分布再到阈值后的高斯分布的转变, 如图 18 所示。

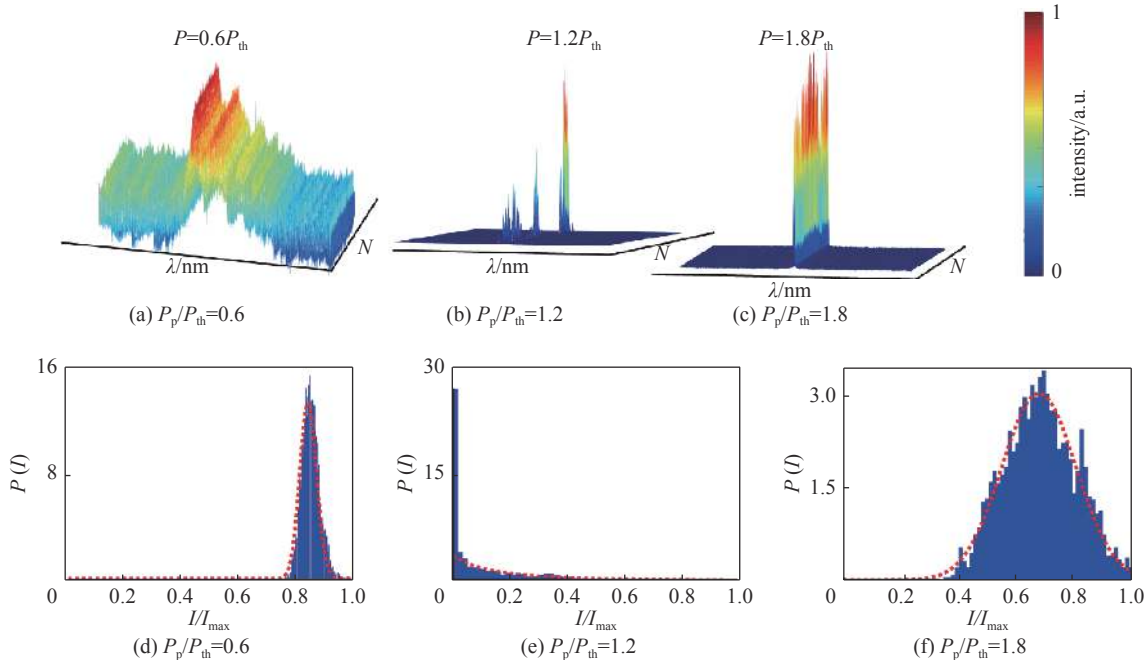


Fig. 18 Statistical analysis of the intensity spectra and PDF $P(I)$ of maximum intensities I with different pump power (erbium-doped RFL)^[49]

图 18 不同泵浦功率情况下随机激光输出强度谱和强度统计特性分析(掺铒光纤随机激光器)^[49]

来自电子科技大学的研究团队则对基于拉曼增益的弱散射光纤随机激光器光谱强度特性开展了详细研究, 发现了与传统随机激光器光谱强度特性的一致性, 从而进一步加深了对光纤随机激光器激射物理本质的理解^[52]。本研究采用类似文献^[47]报道的光谱强度数据实时采集方案, 利用示波器将经过 F-P 滤波器滤波后的特定波长强度信息进行实时采集, 然后做统计数据分析, 并得出结论: 使用莱维 α 稳态分布可以很好地描述拉曼光纤随机激光器光谱输出强度不同激射状态下的概率统计分布情况。当拉曼光纤随机激光未激射及光谱稳定后, $\alpha=2$, 表明这两种激射状态下, 拉曼光纤随机激光光谱强度统计分布为高斯分布。而当拉曼光纤随机激光在激射阈值附近时, $\alpha=1.2$, 此时的随机激光光谱强度统计分布为莱维分布, 光谱强度的概率密度函数曲线表现为长拖尾特征, 如图 19 所示。

4 空域特性

空域特性主要体现激光光束质量, 包括激光光束直径、发散角、横模模式、近场及远场分布等参数, 主要是通过测量激光功率或能量在空间上的相对分布得到。由于光纤随机激光器的波导结构将激光限制在一维方向上, 它天然地继承了光纤激光器高光束质量(光斑小、发散角小、可以基横模输出等)的特性, 因此针对光纤随机激光器的空域特性研究主要集中在横模模式控制以及无散斑成像应用方面。

首先, 抑制散斑形成的经典方法包括利用移动的散射体进行时间平均, 增加偏振态、波长和照射角度的多样性, 降低激光时间和空间相干性^[53-54]。在用于激光惯性约束聚变(ICF)的高功率固体激光驱动装置中, 也采用类似的光谱色散平滑(SSD)、连续相位板(CPP)、偏振和带宽控制等手段进行激光焦斑空间整形和匀滑, 实现光束聚焦的去相干^[55]。而随机激光器得益于其激射过程中的随机散射反馈, 在保持较高光谱密度的同时也具有较低的空间相干性, 在不需要额外控制手段的情况下, 即可以达到抑制散斑, 匀滑焦斑空间分布的目的, 并且在多种类型的随机激光器中得到充分的证明^[56]。

2018 年来自中国香港的研究人员演示了一种利用聚合物光纤随机激光器(POFRL)的无散斑成像应用^[57]。在该工作中, 研究人员通过在聚合物光纤中掺杂 TiO_2 纳米颗粒和 Rh640 染料, 形成一维随机激光多模激射输出, 并

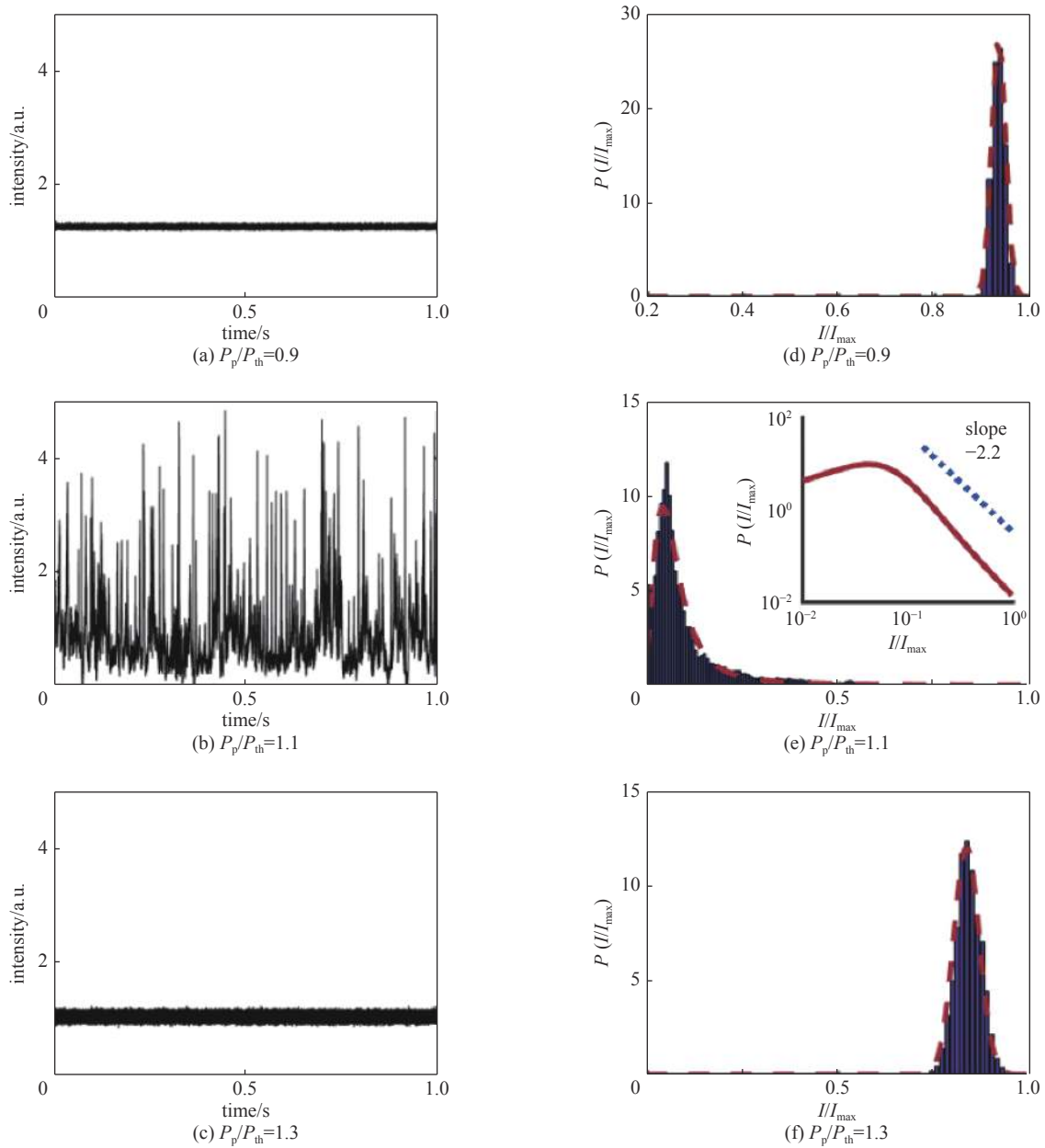


Fig. 19 Statistical analysis of the temporal intensity and PDF $P(I)$ of maximum intensities I with different pump power (Raman RFL)^[52]

图 19 不同泵浦功率下的随机激光输出时域强度曲线及其相应的概率密度函数^[52]

利用其进行无散斑成像,实验结果如图 20 所示,随机激光的无散斑成像效果明显好于普通商用激光器。利用散斑对比度(C)可以表示激光的空间相干性,并反映激光横向模式数量,其定义如式(4)所示^[58],其中, δ 和 $\langle I \rangle$ 分别表示散斑强度的标准差和平均值, m 表示横向模式数量。 C 值越小表示光斑强度均匀性越好,空间相干性越低,当 $C=0$ 时,说明没有散斑结构。而实际上 $C<0.04$ 时,人眼已经不能分辨成像散斑。从图 20 可以看到,POFRL 的 C 仅为 0.07,说明 POFRL 的空间相干性很低。

$$C = \frac{\delta}{\langle I \rangle} \propto \frac{1}{\sqrt{m}} \quad (4)$$

电子科技大学 Rui Ma 等人系统研究了光纤随机激光器以及与大模场面积阶跃折射率多模光纤结合的多横模光纤随机激光,利用其宽带低空间相干特性在无散斑成像方面得到应用^[59-61]。首先,研究人员分别比较了光纤随机激光(RFL)、ASE 光源、窄线宽光源(NLL)3 种光源的单模输出散斑特性,然后通过一段多模光纤,激发出多横模后再次比较多模散斑特性^[59],结果如图 21 所示。3 种光源的光谱宽度分别为 1, 7 和 0.01 nm。采用散斑对比度 C 对 3 种光源散斑特性进行比较,在单模情况下,RFL, ASE 和 NLL 三种光源 C 值分别为 0.69, 0.55 和 0.75,说明较宽的光谱和较低的时间相干性导致较低的散斑对比度,并对应较低的空间相干性。在多模情况下,RFL, ASE 和

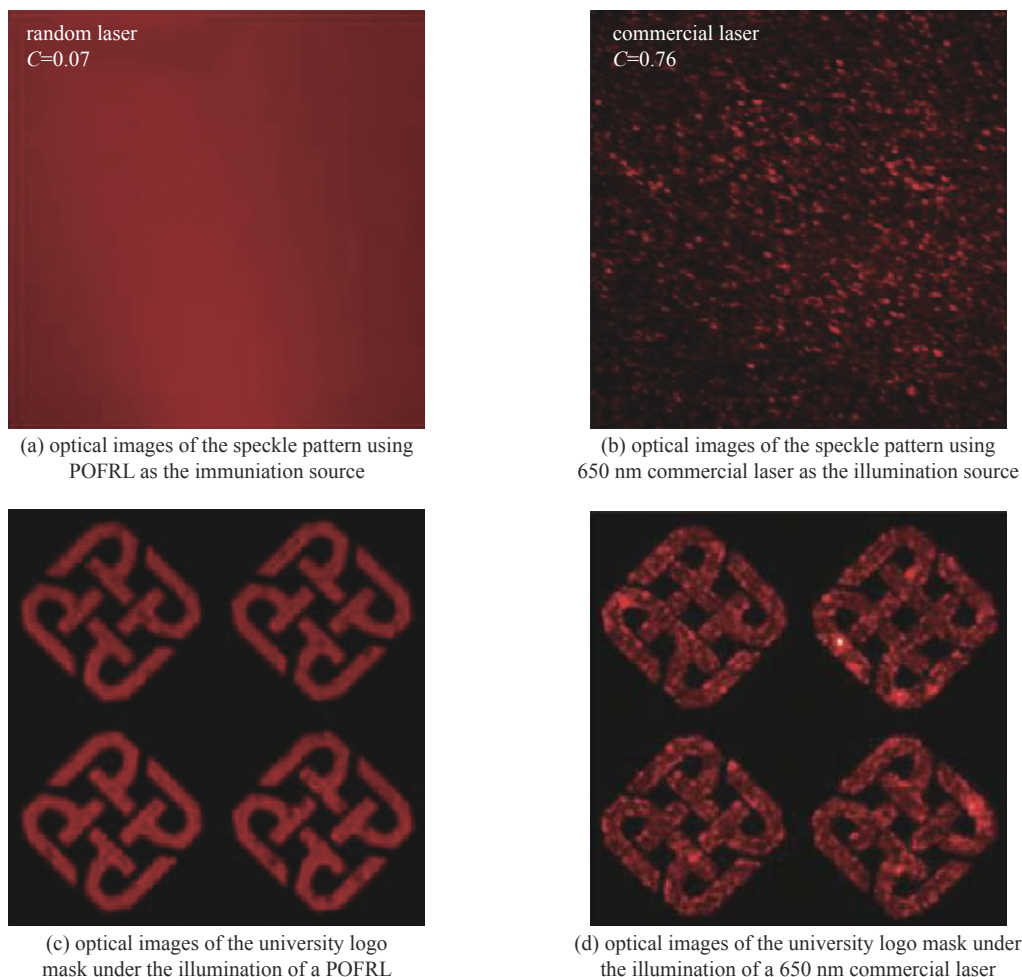
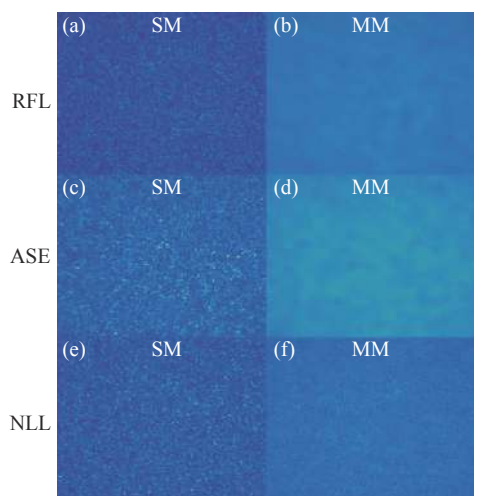


Fig. 20 Optical images of the speckle pattern and the logo mask with different illumination sources^[57]

图 20 不同照明光源的成像应用效果^[57]

NLL 的散斑对比度分别为 0.049, 0.039 和 0.31。虽然 RFL 的带宽仅为 ASE 光源带宽的 1/7, 但在 RFL 具有更高光谱密度的同时, 仍然可以获得在人眼散斑感知阈值(0.04)附近的散斑对比度。

Rui Ma 等人还研究了一种基于主振荡功率放大器(MOPA)结合超大模场面积阶跃多模(MMF)光纤的高功率低空间相干性光纤随机激光^[60]。实验结构如图 22 所示, 首先利用一段掺镱光纤结合无源光纤, 实现一个基于有源增益的 1064 nm 单模光纤随机激光, 然后通过一级 MOPA 放大器到 56.2 W, 最后注入到一段 MMF 中, 输出功率 55.8 W。借助高输出功率的优势, 在 MMF 中可以激发出更多有效的横向模式, 以进一步降低空间相干性。实际上, 当输出功率达到最大时, 测得的散斑对比度约为 0.01, 较前述工作^[59]散斑对比度进一步降低, 说明大功率激光在多模光纤中传输时可以激发比低功率情况下更多的有效空间模式, 有效降低空间相干性。



(a) single mode RFL, (b) multimode RFL, (c) single mode ASE, (d) multimode ASE, (e) single mode NLL, (f) multimode NLL

Fig. 21 Speckle formed after passing through a ground glass diffuser^[59]

图 21 不同光源透过毛玻璃后散斑图^[59]

5 总结与展望

详细介绍了光纤随机激光的理论模型和近年来其时-频-空域动态特性研究进展。由于其独特的激光反馈机

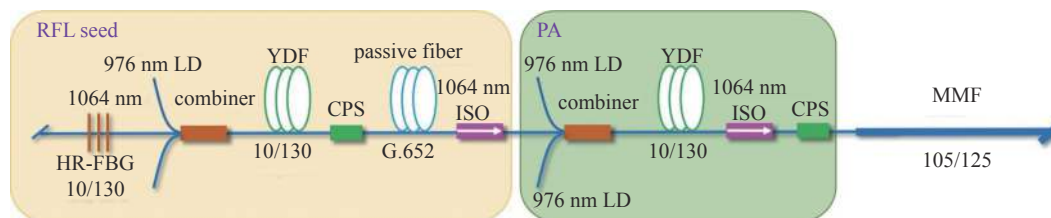


Fig. 22 Schematic diagram of high power low spatial coherence random fiber laser based on MOPA configuration^[60]

图 22 基于 MOPA 的高功率低空间相干性光纤随机激光器实验装置示意图^[60]

制, 光纤随机激光器可实现低时间相干性和低空间相干性特征, 具体而言: 其不同光谱成分间具有不同的时域动态分布特性, 相互之间具有微弱的相位关系, 多模光纤随机激光器具有低空间相干性, 激光散斑均匀度好。光纤随机激光如果作为高功率激光驱动装置前端光源, 将有利于提升装置束靶耦合效率和靶面光场辐照均匀性。但也应该看到, 光纤随机激光器时域动态特性明显, 具有较大起伏, 不利于高功率激光驱动装置脉冲波形精密控制。通过优化光纤随机激光的泵浦特性, 采取诸如 ASE 泵浦或者随机激光泵浦的方式, 虽然可以提升激射光纤随机激光的时域稳定性, 但距离高功率激光驱动装置要求的高精度脉冲精密整形要求仍有较大差距。未来, 通过研究光纤随机激光器的色散、非线性和光谱带宽控制, 将有助于减弱光纤随机激光各光谱成分间相互作用, 同时调控方式和采用饱和放大等方式, 将可能进一步提升光纤随机激光时域稳定性, 从而促成光纤随机激光器在高功率激光驱动装置上的应用。

致 谢 感谢电子科技大学光纤传感与通信教育部重点实验室齐逸飞同学在图片编辑中的贡献。

参考文献:

- [1] Turitsyn S K, Babin S A, El-Taher A E, et al. Random distributed feedback fibre laser[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(4): 231-235.
- [2] Churkin D V, Sugavanam S, Vatik I D, et al. Recent advances in fundamentals and applications of random fiber lasers[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(3): 516-569.
- [3] 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: 110606. (Hu Pengbing, Dong Xinyong. Research progress in random distributed feedback fiber lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48: 110606)
- [4] 曹健华, 林圣涛, 王子南等. 超长距离光纤随机激光多点传感系统的设计与实现[J]. *光学学报*, 2021, 41: 1306006. (Jianhua Cao, Shengtao Lin, Zinan Wang, et al. Design and implementation for ultra-Long-distance multi-point sensing system based on random fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41: 1306006)
- [5] Turitsyn S K, Babin S A, Churkin D V, et al. Random distributed feedback fibre lasers[J]. *Physics Reports*, 2014, 542(2): 133-193.
- [6] Wu Han, Xiong Ji, Han Bing, et al. Ultra-high speed random bit generation based on Rayleigh feedback assisted ytterbium-doped random fiber laser[J]. *Science China Technological Sciences*, 2021, 64(6): 1295-1301.
- [7] Lin Shengtao, Wang Zinan, Li Jiaqi, et al. Nonlinear dynamics of four-wave mixing, cascaded stimulated Raman scattering and self Q-switching in a common-cavity ytterbium/Raman random fiber laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 134: 106613.
- [8] González I R R, Raposo E P, Macêdo A M. Coexistence of turbulence-like and glassy behaviours in a photonic system[J]. *Scientific Report*, 2018, 8: 17046.
- [9] Wang Zinan, Wu Han, Fan Mengqiu, et al. High power random fiber laser with short cavity length: theoretical and experimental investigations[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, 21: 0900506.
- [10] Churkin D V, Babin S A, El-Taher A E, et al. Raman fiber lasers with a random distributed feedback based on Rayleigh scattering[J]. *Physical Review A*, 2010, 82: 033828.
- [11] Smirnov S V, Churkin D V. Modeling of spectral and statistical properties of a random distributed feedback fiber laser[J]. *Optics Express*, 2013, 21(18): 21236-21241.
- [12] Kolokolov I V, Lebedev V V, Podivilov E V, et al. Theory of a random fiber laser[J]. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2014, 119(6): 1134-1139.
- [13] Churkin D V, Kolokolov I V, Podivilov E V, et al. Wave kinetics of random fibre lasers[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6214.
- [14] Lin Shengtao, Wang Zinan, Araújo H A, et al. Ultrafast convergent power-balance model for Raman random fiber laser with half-open cavity[J]. *Optics Express*, 2020, 28(15): 22500-22510.
- [15] Du Xueyuan, Zhang Hanwei, Wang Xiaolin, et al. Tunable random distributed feedback fiber laser operating at 1 μ m[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(4): 908-911.
- [16] Fan Mengqiu, Zong Zhaoyu, Tian Xiaocheng, et al. Comprehensive investigations on 1053 nm random distributed feedback fiber laser[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9: 1501109.
- [17] Wu Han, Wang Zinan, Sun Wei, et al. 1.5 μ m low threshold, high efficiency random fiber laser with hybrid erbium-Raman gain[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(4): 844-849.
- [18] Wu Han, Wang Zinan, Fan Mengqiu, et al. Multiwavelength ytterbium-Brillouin random Rayleigh feedback fiber laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15:

035105.

- [19] Wu Han, Wang Zinan, He Qiheng, et al. Common-cavity ytterbium/Raman random distributed feedback fiber laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2017, 14: 065101.
- [20] Agrawal G P. 非线性光纤光学[M]. 5版. 贾东方, 葛春风, 王肇颖, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2014 (. (Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics*[M]. Jia Dongfang, Ge Chunfeng, Wang Zhaoying, et al, trans. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014)
- [21] Kuznetsov A G, Podivilov E V, Babin S A. Actively Q-switched Raman fiber laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2015, 12: 035102.
- [22] Bravo M, Fernandez-Vallejo M, Lopez-Amo M. Internal modulation of a random fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(9): 1542-1544.
- [23] Xu Jiangming, Ye Jun, Xiao Hu, et al. Narrow-linewidth Q-switched random distributed feedback fiber laser[J]. *Optics Express*, 2016, 24(17): 19203-19210.
- [24] Wu Han, Wang Zinan, He Qiheng, et al. Polarization-modulated random fiber laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2016, 13: 055101.
- [25] Wang Simin, Lin Wei, Chen Weicheng, et al. Low-threshold and multi-wavelength Q-switched random erbium-doped fiber laser[J]. *Applied Physics Express*, 2016, 9: 032701.
- [26] Tang Yulong, Xu Jianqiu. A random Q-switched fiber laser[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 9338.
- [27] Zeng Xiaopei, Zhang Weili, Ma Rui, et al. Regulation of a pulsed random fiber laser in the Q-switched regime[J]. *Laser Physics Letters*, 2016, 13: 115105.
- [28] Xu Jiangming, Ye Jun, Liu Wei, et al. Passively spatiotemporal gain-modulation-induced stable pulsing operation of a random fiber laser[J]. *Photonics Research*, 2017, 5(6): 598-603.
- [29] Yao Baicheng, Rao Yunjiang Wang Zinan, et al. Graphene based widely-tunable and singly-polarized pulse generation with random fiber lasers[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 18526.
- [30] 叶俊. 高功率随机光纤激光及其光谱调控[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2018 (Ye Jun. High power random fiber laser and its spectral manipulation property[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018)
- [31] 吴函. 新型随机光纤激光器的实现及应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2019 (Wu Han. Research on the realization of novel random fiber laser and its applications[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019)
- [32] Churkin D V, Smirnov S V, Podivilov E V. Statistical properties of partially coherent cw fiber lasers[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(19): 3288-3290.
- [33] Gorbunov O A, Sugavanam S, Vatik I D, et al. Statistical properties of radiation of multiwavelength random DFB fiber laser[J]. *Optics Express*, 2016, 24(17): 19417-19423.
- [34] Hammani K, Finot C, Dudley J M, et al. Optical rogue-wave-like extreme value fluctuations in fiber Raman amplifiers[J]. *Optics Express*, 2008, 16(21): 16467-16474.
- [35] Gorbunov O A, Sugavanam S, Churkin D V. Intensity dynamics and statistical properties of random distributed feedback fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(8): 1783-1786.
- [36] Xu Jiangming, Wu Jian, Ye Jun, et al. Optical rogue wave in random fiber laser[J]. *Photonics Research*, 2020, 8: 01000001.
- [37] Gorbunov O A, Sugavanam S, Vatik I D, et al. Poisson distribution of extreme events in radiation of random distributed feedback fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(8): 2375-2378.
- [38] Wu Han, Han Bing, Wang Zinan, et al. Statistical properties of Er/Yb co-doped random Rayleigh feedback fiber laser[J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 19: 021402.
- [39] Xu Jiangming, Lou Zhaokai, Ye Jun, et al. Incoherently pumped high-power linearly-polarized single-mode random fiber laser: experimental investigations and theoretical prospects[J]. *Optics Express*, 2017, 25(5): 5609-5617.
- [40] Dong Jinyan, Zhang Lei, Jiang Huawei, et al. High order cascaded Raman random fiber laser with high spectral purity[J]. *Optics Express*, 2018, 26(5): 5275-5280.
- [41] Ye Jun, Xu Jiangming, Song Jiabin, et al. Pump scheme optimization of an incoherently pumped high-power random fiber laser[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(9): 977-983.
- [42] Zhang Yang, Song Jiabin, Ye Jun, et al. Tunable random Raman fiber laser at 1.7 μm region with high spectral purity[J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 28800-28807.
- [43] Han Bing, Rao Yunjiang, Wu Han, et al. Low-noise high-order Raman fiber laser pumped by random lasing[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(20): 5804-5807.
- [44] Andreassen J, Cao Hui. Numerical study of amplified spontaneous emission and lasing in random media[J]. *Physical Review A*, 2010, 82: 063835.
- [45] Cao Hui. Lasing in random media[J]. *Waves in Random Media*, 2003, 13(3): R1-R39.
- [46] Bliokh Y, Chaikina E I, Vatik I D, et al. Temporal variation of the spectrum of a continuously pumped random fiber laser: phenomenological model[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2019, 36(2): 408-414.
- [47] Sugavanam S, Sorokina M, Churkin D V. Spectral correlations in a random distributed feedback fibre laser[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 15514.
- [48] Samorodnitsky G, Taqqu M S. Stable non-Gaussian random processes[M]. New York: Chapman and Hall, 1994.
- [49] Lima B C, Gomes A S L, Pincheira P I R, et al. Observation of Lévy statistics in one-dimensional erbium-based random fiber laser[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(2): 293-299.
- [50] Roa Gonzalez I R, Lima B C, Pincheira P I R, et al. Turbulence hierarchy in a random fibre laser[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 15731.
- [51] Lima B C, Pincheira P I R, Raposo E P, et al. Extreme-value statistics of intensities in a cw-pumped random fiber laser[J]. *Physical Review A*, 2017, 96: 013834.
- [52] Li Jiaqi, Wu Han, Wang Zinan, et al. Lévy spectral intensity statistics in a Raman random fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(11): 2799-2802.

- [53] Mehta D S, Naik D N, Singh R K, et al. Laser speckle reduction by multimode optical fiber bundle with combined temporal, spatial, and angular diversity[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(12): 1894-1904.
- [54] Wang Fei, Liu Xianlong, Yuan Yangsheng, et al. Experimental generation of partially coherent beams with different complex degrees of coherence[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(11): 1814-1816.
- [55] 郑万国, 李平, 张锐, 等. 高功率激光装置光束精密调控性能研究进展[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 011003. (Zheng Wanguo, Li Ping, Zhang Rui, et al. Progress on laser precise control for high power laser facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 011003)
- [56] 马瑞. 光纤随机激光模式调控与应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019 (Ma Rui. Research on mode modulation of random fiber laser and its applications[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019)
- [57] He Jijun, Chan W K E, Cheng Xin, et al. Experimental and theoretical investigation of the polymer optical fiber random laser with resonant feedback[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6: 1701187.
- [58] Redding B, Choma M A, Cao Hui. Speckle-free laser imaging using random laser illumination[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(6): 355-359.
- [59] Ma Rui, Rao Yunjiang, Zhang Weili, et al. Multimode random fiber laser for speckle-free imaging[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25: 0900106.
- [60] Ma Rui, Li Jiaqi, Guo Jiayu, et al. High-power low spatial coherence random fiber laser[J]. *Optics Express*, 2019, 27(6): 8738-8744.
- [61] Ma Rui, Zhang Weili, Guo Jiayu, et al. Decoherence of fiber supercontinuum light source for speckle-free imaging[J]. *Optics Express*, 2018, 26(20): 26758-26765.