
光纤随机激光 原理及应用

饶云江 王子嘉 张伟利 著



科学出版社

光纤随机激光原理及应用

饶云江 王子南 张伟利 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

光纤随机激光器是新概念光纤激光器,也是随机激光器研究领域的重要分支,它没有传统光纤激光器中边界明确的光学谐振腔(无纵模),因此其工作机制具有新颖而丰富的物理内涵。并且其在光通信、光传感、光成像、国防、工业制造等领域有着巨大的应用前景,近年来已经成为国际光学界的研究热点之一。本书较为系统的阐述了光纤随机激光器的基本工作原理、已揭示的重要光学特性、若干新颖的光纤随机激光器结构,并用较大篇幅介绍了其作为新颖光源、光放大器的典型应用。本书内容中包含了作者大量的原创性成果,相关研究成果入选美国光学学会年度重要进展,并且得到了国家自然科学基金重大/重点项目、教育部创新团队及学科创新引智基地等项目的大力支持。本书可供从事激光、光纤光学及相关技术领域的科研工作者参考,也可作为相关方向师生的教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

光纤随机激光原理及应用 / 饶云江, 王子南, 张伟利著. — 北京: 科学出版社, 2018.6

ISBN 978-7-03-057527-2

I. ①光… II. ①饶… ②王… ③张… III. ①光纤-激光器-研究
IV. ①TN248

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 110354 号

责任编辑: 张 展 黄明冀 / 责任校对: 杨悦蕾

责任印制: 罗 科 / 封面设计: 墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年6月第一版 开本: B5 (720×1000)

2018年6月第一次印刷 印张: 15 1/4

字数: 305千字

定价: 126.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

近年来, 光纤随机激光器(random fiber laser, RFL)引起了学术界的广泛关注。光纤随机激光器中光纤本身同时提供了增益介质、反馈机制和光场束缚三个重要功能, 是随机激光概念上的一大突破。与其他随机介质相比, 光纤波导结构可实现高效定向随机激光输出, 而且激光与光纤波导微结构及非线性相互作用更明显。此外, 不同的光纤波导可提供丰富的放大(如拉曼增益、掺杂稀土离子增益)和反馈机制(如瑞利散射和光栅反射), 也为随机激光的优化和调控提供了灵活手段。这种无谐振腔的光纤随机激光器具有结构更加简单、转换效率更高、噪声更低、稳定性更好、可靠性更高、寿命更长、维护更简单等突出优点, 可望形成新一代的光纤激光器, 具有广阔的应用前景, 因此, 开展光纤随机激光技术的研究具有重要的科学意义与应用价值。

本书将系统地介绍光纤随机激光的原理与技术。第 1 章主要回顾光纤随机激光器的发展历程和代表性技术, 揭示光纤随机激光的科学价值和应用前景, 第 2 章介绍光纤随机激光器的工作原理与理论基础, 第 3 章介绍光纤随机激光器的结构与输出特性, 第 4 章是高效率、高功率光纤随机激光器的实现及应用, 第 5 章介绍基于特种光纤的随机激光器, 第 6 章是光纤微结构对于随机激光的调控, 第 7 章是光纤随机激光器在分布式光放大中的应用。本书的内容包含了国内外同行特别是著者团队自 2011 年以来在该方向上的科研成果, 相关研究成果入选美国光学学会年度重要进展, 相关研究工作得到了国家自然科学基金重大/重点项目、教育部创新团队及学科创新引智基地等项目的大力支持。

在此也要特别感谢在本书成稿过程中作出贡献的吴函、马瑞、贾新鸿、傅芸、韩冰等同学们!

由于作者水平有限, 本书不足之处在所难免, 望广大读者批评指正。

饶云江 王子南 张伟利
2018 年 6 月于成都

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 光纤随机激光器的发展历程	1
1.2 高效率和高功率光纤随机激光器	5
1.3 基于光纤随机激光的分布式拉曼放大技术	8
参考文献	11
第 2 章 光纤随机激光器的原理	15
2.1 光纤随机激光器的分类及工作原理	15
2.1.1 激光的基本原理	15
2.1.2 随机激光理论基础	19
2.2 光纤随机激光器的分类及工作原理	22
2.2.1 光纤中的散射	23
2.2.2 结合随机瑞利散射的光纤激光器	28
2.2.3 填充型光纤随机激光器	30
2.2.4 基于弱反 FBG 串的相干反馈光纤随机激光器	31
2.2.5 分布反馈式光纤随机激光器	32
2.3 随机激光器的理论模型	39
2.3.1 平均功率平衡模型	39
2.3.2 激光阈值	40
2.3.3 输出功率和频率	42
2.3.4 随机 DFB 光纤激光器中的纵向功率分布	45
2.4 掺铒光纤放大模型及应用	48
2.4.1 掺铒光纤放大理论	48
2.4.2 掺铒光纤光放大模型数值求解	50

2.4.3	掺铒光纤光放大模型边界条件	51
2.4.4	拉曼放大模型	52
2.4.5	掺铒光纤及拉曼混合增益 RFL 仿真	54
	参考文献	57
第 3 章	光纤随机激光器的结构及输出特性	59
3.1	全开腔光纤随机激光器	61
3.1.1	全开放腔 RFL 功率分布及阈值特性	62
3.1.2	全开放腔 RFL 光谱特性	63
3.1.3	全开放腔 RFL 输出相干特性	65
3.2	半开腔随机分布反馈光纤激光器	66
3.2.1	半开放腔 RFL 理论模型	67
3.2.2	半开放腔 RFL 输出特性	68
3.2.3	基于光纤环镜的半开腔 RFL	73
3.3	环形腔 RFL	78
3.3.1	环形腔 RFL 实验原理	79
3.3.2	环形腔 RFL 输出特性	79
3.3.3	环形腔 RFL 与线形腔 RFL 特性比较	84
3.4	混合腔 RFL	87
3.5	RFL 的输出稳定性	89
3.6	RFL 的光谱线宽特性	90
3.7	RFL 的时域动态特性	91
3.8	RFL 的偏振特性	97
3.8.1	实验装置	98
3.8.2	实验结果	99
3.8.3	理论分析及仿真	103
	参考文献	105
第 4 章	高效率大功率光纤随机激光器的实现及应用	108
4.1	基于短腔的高效率光纤随机激光器	108

4.1.1	光纤长度的影响	110
4.1.2	泵浦端反射镜反射率的影响	113
4.1.3	实验结果	115
4.2	高效率线性偏振光纤随机激光器	125
4.3	高效率大功率光纤随机激光器的应用	129
4.3.1	放大器种子源	129
4.3.2	装置原理及分析	130
4.3.3	掺钛光纤激光泵浦源	132
4.3.4	掺铈光纤激光器泵浦源	133
	参考文献	137
第 5 章	特种光纤随机激光器	138
5.1	基于 DCF 的特种光纤随机激光器	138
5.1.1	DCF 中随机激光器的产生及特性	138
5.1.2	DCF 与 SMF 混合型随机激光器	141
5.2	基于 EDF 的光纤随机激光器	145
5.2.1	混合布里渊-掺铒光纤增益的光纤随机激光器	145
5.2.2	混合拉曼-掺铒光纤增益的随机光纤激光器	148
5.2.3	融入 EDF 的超长拉曼光纤激光器	158
5.3	填充型光纤随机激光器	161
5.3.1	增益填充型光子晶体光纤的发光特性	161
5.3.2	引入随机增益介质的光子晶体光纤随机激光器	165
5.3.3	新固化材料随机光纤激光器	170
5.3.4	光纤型随机包层随机激光器	171
	参考文献	180
第 6 章	光纤随机激光器的调控	182
6.1	融入 FBG 的光纤随机激光器新特性	182
6.1.1	低阈值半开腔高阶随机光纤激光器	182
6.1.2	部分可调双波长随机光纤激光器	185

6.1.3	拉曼泵浦多波长光纤随机激光器	189
6.1.4	拉曼泵浦超长 FBG 光纤随机激光器	192
6.2	波长可调谐光纤随机激光器	194
6.2.1	融入光子晶体光纤环镜的多波长光纤随机激光器	194
6.2.2	宽带多波长光纤随机激光器	198
6.2.3	多波长可调谐光纤随机激光器	200
6.3	窄线宽光纤随机激光器	202
6.3.1	基于可变的纤芯的分布反馈窄线宽光纤激光器	202
6.3.2	结合 F-P 腔滤波的窄线宽光纤随机激光器	207
6.4	融入随机分布 FBG 阵列的光纤随机激光器及其调控	209
6.4.1	基于随机分布 FBG 阵列的相干反馈随机激光器	209
6.4.2	随机分布 FBG 阵列随机激光器的调控	213
	参考文献	219
第 7 章	光纤随机激光器在光纤传感中的应用	221
7.1	光纤随机激光器在点式光纤传感器中的应用	221
7.2	光纤随机激光器在分布式传感中的应用	226
	参考文献	232
	索引	235

第1章 绪 论

自 1960 年梅曼制成第一台红宝石激光器以来, 激光(light amplification by stimulated emission of radiation, LASER)便以其极好的相干性、高亮度、方向性等优点, 在各个领域对科技的进步产生了巨大的影响, 极大地推动了非线性光学、激光光谱学、光通信、激光医学等领域的发展。同时, 随着特种光纤以及光无源器件的发展, 具有结构紧凑、高转换效率、理想光束质量以及高稳定性的光纤激光器对传统激光领域已经形成了很大的冲击并正产生着深远的影响, 光纤激光器在体积、维护、成本、寿命等方面具有明显优势。光纤激光器已经成为光纤技术领域的主流发展方向, 在超快光子学、非线性光学、光通信与传感等领域的应用研究日益受到重视, 其中, 高功率光纤激光器更是独树一帜, 在激光加工、激光手术、激光武器等方面发展迅猛, 需求巨大。

近年来, 一种新型的有异于常规光纤激光器的光纤随机激光器引起了学术界的广泛关注, 这种无谐振腔(无模式)的光纤随机激光器具有结构更加简单、转换效率更高、相位噪声更低、稳定性更好、可靠性更高、寿命更长、维护更简单等突出优点, 可望形成新一代的光纤激光器。因此, 开展光纤随机激光技术的研究具有重要的科学意义与应用价值。

本书将系统地介绍光纤随机激光的原理与技术。第 1 章主要回顾光纤随机激光器的发展历程和代表性技术, 揭示光纤随机激光的科学价值和应用前景, 第 2 章介绍光纤随机激光器的工作原理与理论基础, 第 3 章是光纤随机激光器的结构与输出特性, 第 4 章是高效率高功率光纤随机激光器的实现及应用, 第 5 章是基于特种光纤的随机激光器, 第 6 章是光纤微结构对于随机激光的调控, 第 7 章是光纤随机激光器在光纤传感中的应用。

1.1 光纤随机激光器的发展历程

众所周知, 在传统的激光器中, 光学谐振腔限制了光子的活动并由此决定了激光模式特性, 如波长、模式、方向性和偏振性等。然而在随机激光器中, 由于不存在反射镜, 所以激光的产生不依赖于谐振腔, 而是依靠光在无序增益介质中的多重散射, 即光子通过被限制在增益介质中的多重散射形成随机反馈回路, 当多重散射经历的增益大于损耗时, 就会出现激光现象, 如果形成的反馈是非相干

的, 则输出无模式, 反之, 相干反馈就对应应有模式的输出^[1-3]。图 1-1 为传统激光器与随机激光器的结构示意图, 可以看出二者的形成机理明显不同。

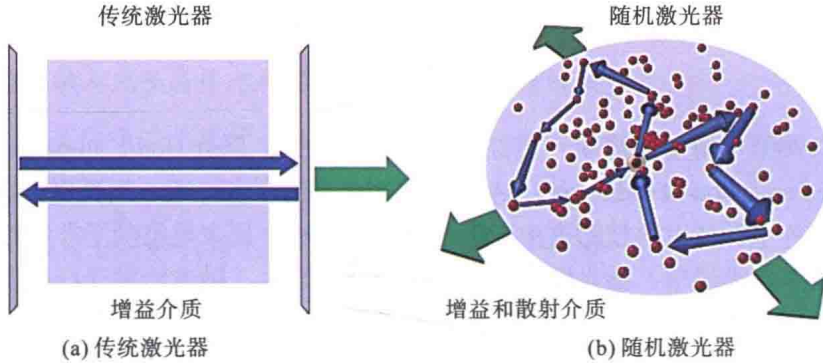
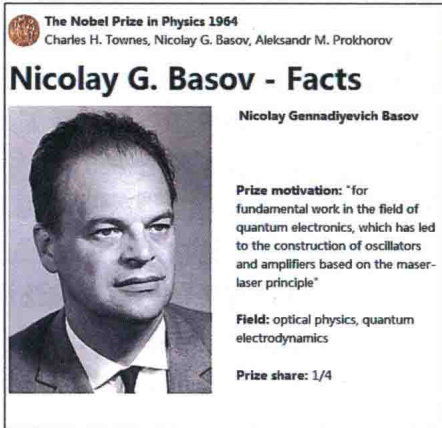
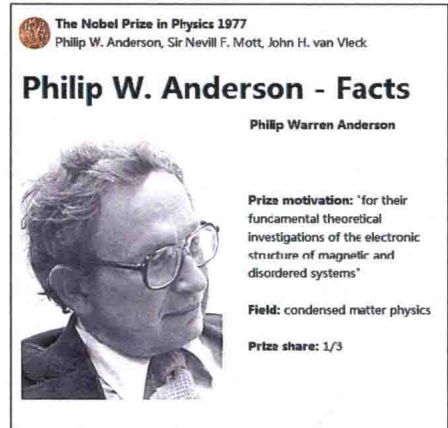


图 1-1 传统激光器与随机激光器结构示意图

随机激光现象涉及光与物质相互作用、光子散射、光干涉和非线性光学等诸多领域的科学问题, 具有重要的基础研究意义。随机激光概念最早出现在 20 世纪 60 年代, 由 Basov 及其合作者提出^[4]。随机激光器一直是学术界关注的热点之一, 参与相关问题研究的已有两届诺贝尔奖得主, 不少新发现在 *Nature*、*Science* 等权威期刊也屡有报道。Basov 由于在量子电子学领域的杰出基础研究工作(包括提出了随机激光的概念)而被授予 1964 年度诺贝尔物理学奖(图 1-2(a)); Anderson 由于对光电子无序介质中安德森局域化现象的杰出基础理论研究而被授予 1977 年度诺贝尔物理学奖(图 1-2(b))。之后, 1994 年 N. M. Lawandy 等在 *Nature* 上报道了第一个基于粉末强散射的随机激光器^[5], 通过脉冲泵浦在 TiO_2 微粒和罗丹明的胶体溶液中观测到了激光辐射现象, 这一发现激发了人们对随机激光器的探索热情, 极大地推动了随机激光的研究, 多种形式的随机激光器被相继发现, 如 π -共轭聚合物、悬浮染料、随机微腔结构、掺杂染料向列液晶、生物组织等^[6-10]。此外, 美国耶鲁大学的 H. Cao 等基于环形腔理论很好地解释了随机激光的产生^[11], 在此基础上, 研究人员又提出了准态模型等理论, 对随机激光的产生机理、工作特性、模式特性等进行了深入的研究^[12-14]。2012 年, H. Cao 等论证了基于粉末的随机激光具有较低的空间相干性和时间相干性, 是进行光学相干层析成像(OCT)、数字激光投影仪等全场成像系统的最理想的光源^[15]。尽管随机激光器具有许多有趣的特性, 它们中大部分缺少激光的基本特征, 如方向性和高功率, 这是因为基于粉末强散射等形成的随机激光具有较高的阈值, 通常需要高能量脉冲泵浦激发, 而随机激光发光的随机结构在微米乃至纳米量级产生的随机激光能量极低, 且由于发散问题不具备方向性, 所以这些特性严重影响了随机激光的应用和发展。



(a) 巴索夫



(b) 安德森

图 1-2 随机激光相关领域诺贝尔物理学奖获得者

https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1964/basov-facts.html

https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1977/anderson-facts.html

2010 年, 英国学者 Turitsyn 等在 *Nature Photonics* 上报道了一种全新的基于标准单模光纤的新型随机激光器^[16], 光纤纤芯材料的不均匀性会导致其轴向折射率的随机分布, 进而产生瑞利散射并为随机激光的产生提供光学反馈, 同时, 硅基光纤也可作为增益介质, 通过受激拉曼散射 (stimulated Raman Scattering, SRS) 放大提供足够增益, 其工作原理如图 1-3 所示。与传统随机激光介质相比, 单模光纤波导结构可很好地限制光的径向散射, 并严格控制输出光在光纤轴向上, 所以这样的光纤随机激光器能实现很好的方向性和很高的输出功率, 从根本上克服传统随机激光器的缺陷。分布反馈式光纤随机激光极为独特的光学属性为激光物理、非线性光学研究提供了新的平台, 并为其在光纤通信、光纤传感等领域的应用开辟了新的道路^[17]。

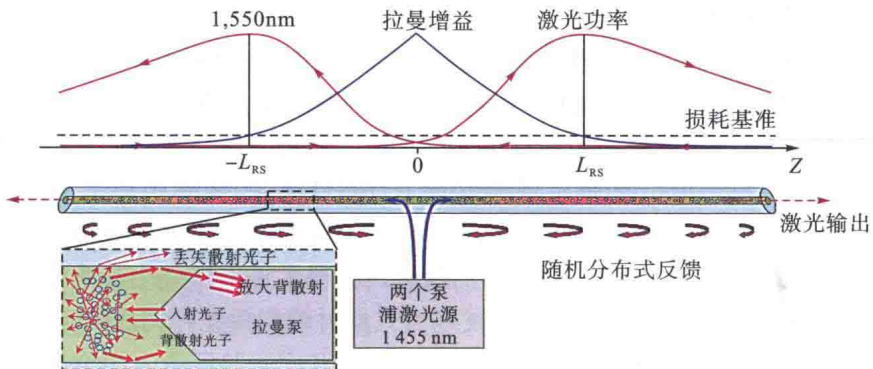


图 1-3 分布反馈式光纤随机激光器原理图^[16]

自从 RFL 概念被提出以来,研究人员在其实现方式、多波长、可调谐、多阶激光产生以及混合增益机制下的随机激光产生等方面做了进一步的探索,并取得了很好的研究进展。国际上,英国 Aston 大学和俄罗斯 Novosibirsk 州立大学在光纤随机激光的理论建模、特性分析、新的调谐和调制方式研究等方面开展了深入广泛的工作^[18-21]。2010 年,该研究组报道了双波长的随机激光输出;2011 年报道了 22 个波长的随机激光输出^[22]和 1535~1570 nm 的可调谐输出^[20]以及 1175 nm 和 1242 nm 的一、二阶随机激光输出^[23];2013 年,利用光纤布拉格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 实现了一种窄带光纤随机激光的输出,并对光纤随机激光的统计特性进行了理论研究^[24]。西班牙和葡萄牙的学者在光纤随机激光器多波长输出、相对强度噪声转移以及噪声特性分析等方面开展了系列研究,并探索了其在光信息领域的应用^[25-27]。其中, M. Bravo 等实现了光纤随机激光器的内部调制,与传统内部调制的光纤激光器不同,在这种内调制的光纤随机激光器中没有观测到调制频率的变形以及自锁模效应^[21]。加拿大 Ottawa 大学利用受激布里渊散射和放大的光纤随机瑞利散射实现了 kHz 量级的窄线宽随机激光输出^[28, 29]。国内各高校团队也开展了光纤随机激光器的基础研究。中国科学技术大学利用特殊溶液在空心光纤中实现了一种弱反馈机制下的相干光纤随机激光器^[30];北京化工大学实现了一种波长在 1115 nm 的光纤随机激光器^[31];深圳大学利用 20 W 掺 Yb 光纤激光器实现了一种四级级联的拉曼光纤激光器^[32];中国计量大学在掺饵光纤随机激光方向实现了很低阈值的激射^[33, 34];国防科技大学在高功率光纤随机激光器方面取得突破性进展,将单纤随机激光器的输出功率在两年之内从数瓦迅速提升到了近 200 W^[35-37]。

本书作者所在的电子科技大学光纤传感与激光团队为国内最早开展 RFL 研究的团队。2012 年,团队报道了基于 FBG 的半开放腔结构的二阶光纤随机激光器,显著降低了激光泵浦阈值,实现了稳定连续的随机激光输出^[38];报道了基于超长光纤环形腔结构的光纤随机激光器,并对其激光特性进行了系统分析^[39];首次发现了光纤随机激光的温度不敏感特性,并将其应用于点式光纤传感中,实现了高信噪比的长距离 FBG 传感^[40]。2013 年,团队首次提出基于光纤随机激光的拉曼光放大概念^[41],并将其应用于基于布里渊光时域分析仪 (Brillouin optical time-domain analysis, BOTDA) 的光纤分布式应变/温度传感系统中,利用 RFL 的全分布式放大、低相位噪声和高稳定性等优点,使传感信号功率在长距离光纤上的分布更加均匀平坦,从而显著地延长了 BOTDA 的传感距离,创造了新的 BOTDA 无中继传感距离世界纪录(实验室)^[42];提出了基于单模光纤混合其他特种光纤以调控光纤随机激光增益分布的概念,获得了进一步优化或特定波长的光纤随机激光输出^[43]。2014 年,团队发现点式反射镜和短光纤构成的半开腔 RFL 结构是实现大功率输出的有效途径,从理论仿真和实验验证两方面论证了该结构实现高功率随机激光输出的可行性,为大功率 RFL 的设计提供了理论指导^[44];首

次将基于光纤随机激光的光放大技术与布里渊和拉曼光放大技术相结合，并应用于分布式光纤传感系统中，使得相位敏感型光时域反射仪 (phase-sensitive optical time-domain reflectometer, Φ -OTDR) 和布里渊光时域分析仪的无中继传感距离均达到了 175km。这是目前国际上报道的最长的无中继光纤分布式传感系统(实验室)^[45, 46]。2015 年，团队提出了基于无源光纤与有源光纤相组合的随机激光增益分布调控方法，实现了由单模光纤与掺铒光纤组成的混合型 RFL，极大地降低了随机激射的阈值^[46]；提出了基于掺杂石墨烯偏振饱和吸收特性的强度调制器思路，实现了 RFL 的单偏振脉冲产生，调制的光脉冲宽度达到亚 ns 量级，调制频率可达到 MHz 量级，产生的偏振调制光信号消光比大于 40 dB^[47]。

表 1-1 RFL 的主要研究重点及团队

主要研究重点	主要研究团队
RFL 理论与机理	英国 Aston 大学、俄罗斯科学院和新西伯利亚国立大学
多波长、可调谐、高阶、调 Q、脉冲 RFL	英国 Aston 大学、西班牙纳瓦拉公立大学、葡萄牙波尔图大学、电子科技大学、上海交通大学
窄线宽 RFL	加拿大渥太华大学、重庆大学、马来西亚大学
有源光纤 RFL	美国纽约城市大学、中国计量大学、电子科技大学
纤芯填充式 RFL	中国科学技术大学、合肥工业大学、北京工业大学
基于 RFL 的分布式光放大技术	电子科技大学、英国 Aston 大学、西班牙国立光学研究所
RFL 在传感、通信和成像中的应用	电子科技大学、英国 Aston 大学、西班牙国立光学研究所、美国耶鲁大学、美国德州农工大学
高效率、大功率 RFL	国防科技大学、电子科技大学、俄罗斯科学院

1.2 高效率和高功率光纤随机激光器

相比于稀土掺杂光纤激光器，拉曼光纤激光器的激射波长由泵浦波长和光纤的拉曼频移决定，可实现任意波长的激光输出，是获得特殊波长激光的最重要手段。此外，拉曼光纤激光器具有量子亏损小、自发背景噪声低、无光子暗化等优点，是实现高功率、高亮度激光的重要途径之一。传统的拉曼光纤激光器为了得到高功率的输出，需要仔细优化激光器腔体长度以及光纤两端反射镜的反射率和反射带宽。RFL 由于不含有传统光纤激光器的点式反馈器件(如光纤光栅)，所以结构非常简单，性能稳定，具有十分重要的潜在应用价值。

通常，由于单模光纤后向瑞利散射系数相对较低，所以由较长单模光纤 (>40 km) 构成的 RFL 的激射效率明显低于传统的拉曼光纤激光器。因此，RFL 的一个重要研究方向就是提高其激射效率。2014 年，研究人员在基于短腔高功率、高效率光纤随机激光器的研究上取得重要突破^[44]，研究表明，通过采用由一段较短单模光纤和靠近泵浦输入端的点式反射镜构成的半开腔结构，在泵浦端点式反馈镜和短

光纤中的随机分布瑞利散射的共同作用下,可以产生高效率、高功率的一阶随机激光,如图 1-4(a)所示。通过数值仿真对所提出的短腔结构进行腔长优化,可以指导高功率 RFL 的设计。作为实验验证,图 1-4(b)中采用 10 W 的 1090 nm 泵浦和 1 km 标准单模光纤获得了较高输出功率(7W)和较高光转换效率(70%)的随机激光。另外,由于该结构仅由一段较短单模光纤和光纤环反射镜组成,对环境变化不敏感,具有非常好的稳定性。进一步,采用更短的单模光纤(300 m)可以实现更高的光转换效率(74.7%)和输出功率(73.7 W)^[35]。

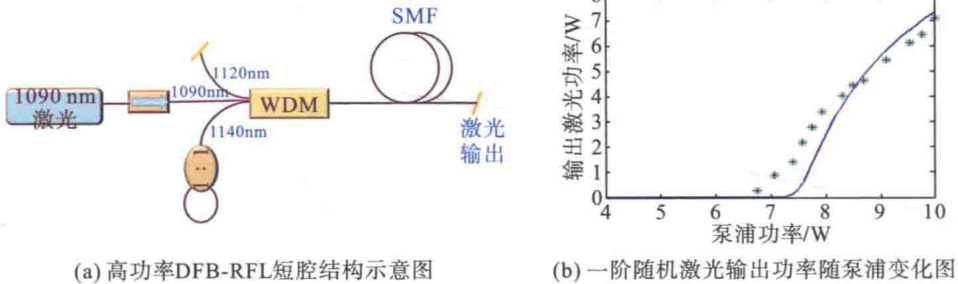


图 1-4 高功率 RFL 短腔结构示意图和一阶随机激光输出功率随泵浦变化图^[44]

WDM: 波分复用; SMF: 单模光纤

进一步理论计算表明,采用更短的光纤时,最大的光光转化效率会更高,二阶随机激光的阈值也会更高(图 1-5),获得的一阶随机激光的最大输出功率会随光纤长度的降低而迅速增大,如采用 100 m 光纤时,在 240 W 泵浦作用下,可望能得到 226 W 的一阶随机激光输出,光光转化效率为 94%,逼近量子极限 95%。2015 年,国防科技大学利用强泵浦,用掺镱光纤激光器泵浦 120m 长无源光纤和 FBG 构成的半开腔 RFL,将光纤随机激光功率输出记录提高到了 193.5W(泵浦功率 221.4W)^[37],光光转化效率为 87.4%,这一实验结果与 2014 年电子科技大学的理论预测吻合得很好^[44]。高功率 RFL 的研究进展见表 1-2。

表 1-2 高功率 RFL 研究进展

年份	光纤类型及长度	泵浦源	最大输出功率	主要研究单位
2011	10.7km TrueWave 光纤	7.5W YDFL	3.8W	俄罗斯科学院
2013	4.5km GRIN 光纤	45.7W 多模 LD	0.5W	俄罗斯科学院
2014	1.65km 掺磷光纤	11.1W YDFL	5.2W(二阶)	俄罗斯科学院
2014	5km SMF	10W YDFL 240W(理论)	7W(实验) 226W(理论)	电子科技大学
2014	300m SMF	98.6W YDFL	73.7W	国防科技大学
2015	320m SMF	132W YDFL	112W	国防科技大学
2015	120m SMF	221.4W YDFL	193.5W	国防科技大学
2016	500m HI1060SMF+MOPA 二级放大	10W RFL +1381.4W LD	1030W	国防科技大学

续表

年份	光纤类型及长度	泵浦源	最大输出功率	主要研究单位
2017	130m□ 20/130μm 双层光纤	600W□ YDFL	418W	国防科技大学

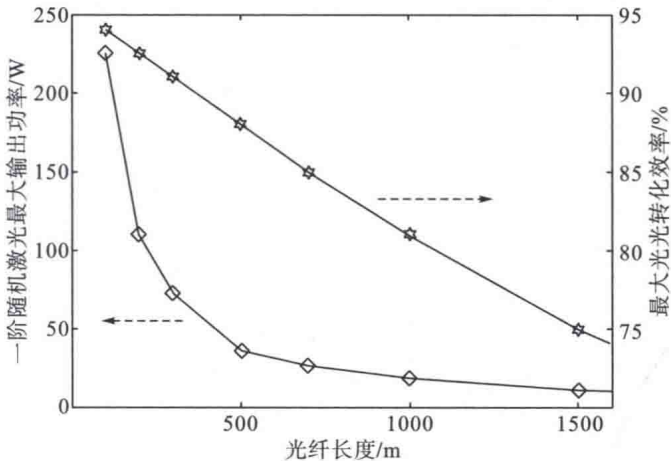


图 1-5 不同长度光纤能获得的一阶随机激光最大输出功率和对应的最大光光转化效率^[44]

上述研究成果表明：短腔 RFL 具有结构简单、性能稳定、可靠性高、寿命长等显著优点，可望实现比传统拉曼光纤激光器更高的输出效率和功率，从而为高功率光纤激光器的发展提供了新的发展思路，被美国光学学会 (Optical Society of America, OSA) 会刊 *Optics & Photonics News* 评为 2014 年度全球 30 项重要光学进展之一：“Random Fiber Laser: Simpler and Brighter” (图 1-6)^[48]。可以期待，高功率光纤随机激光器有望在激光加工、激光武器、光学成像、光学测量等领域获得重要应用。

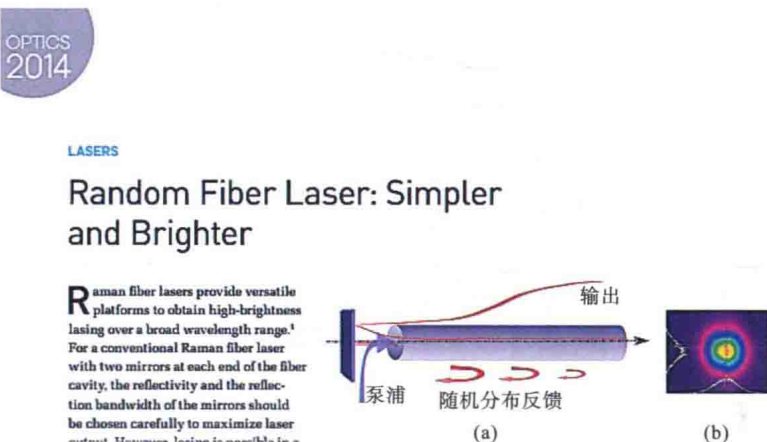
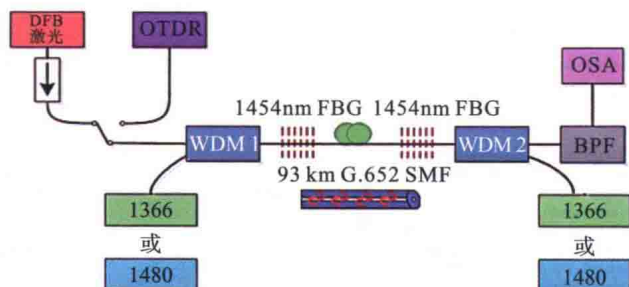


图 1-6 高效率、高功率光纤随机激光研究成果入选 OSA 全球年度重要光学进展

1.3 基于光纤随机激光的分布式拉曼放大技术

相对于分立式的光纤放大技术，分布式拉曼放大 (distributed Raman amplification, DRA) 技术在噪声指数、非线性损伤、增益带宽等诸多方面展现出明显优势，在光纤通信与传感领域得到了广泛应用。高阶 DRA 可使增益深入链路内部以实现准无损光传输 (即光信噪比与非线性损伤的最佳平衡)，显著改善光纤传输/传感全程均衡性。与常规高阶 DRA 相比，基于超长光纤激光器的 DRA 简化了系统结构，且具有增益钳制作用，展示出很强的应用潜力。但是，该放大方法尚面临泵浦—探测相对强度噪声 (RIN) 转移、光信噪比有待提升等制约其应用于长距离光纤传输/传感的瓶颈问题。

2013 年，基于高阶 RFL 泵浦的 DRA 新概念被提出并进行实验验证^[41]。由于 RFL 独有的半开放腔结构，其反馈机制仅仅依赖于光纤中随机分布的 Rayleigh 散射，产生的高阶随机激光的光谱结构、输出功率均展现出优异的温度不敏感特性，所以高阶 RFL 能形成一个非常稳定的低噪声全分布式泵浦源。图 1-7(a) 所示实验验证了基于高阶 RFL 的分布式拉曼放大概念，图 1-7(b) 所示为不同泵浦功率下，透明传输状态下的增益分布情况。比较可知，双向二阶泵浦最佳，其增益平坦度为 2.5 dB，后向二阶随机激光泵浦次之 (3.8 dB)，而前向随机激光泵浦与一阶双向泵浦接近，分别为 5.5 dB 及 4.9 dB，后向 RFL 泵浦的表现较为低的平均增益和增益波动。同时，该实验中前向 RFL 泵浦在透明传输窗口内的有效噪声系数比双向一阶泵浦的要低 2.3 dB，比双向二阶泵浦低 1.3 dB。该方案相比于常规 DRA 在抑制相对强度噪声转移、实现全程均衡传输/传感等方面综合优势明显，且随机激光对温度不敏感，稳定性好，因此，基于高阶 RFL 的 DRA 可为长距离光纤传输/传感提供低噪声、稳定的分布式均衡放大，具有实现超长距离无中继传输与传感的潜力。



(a) 基于光纤随机激光的分布式拉曼放大实验装置图

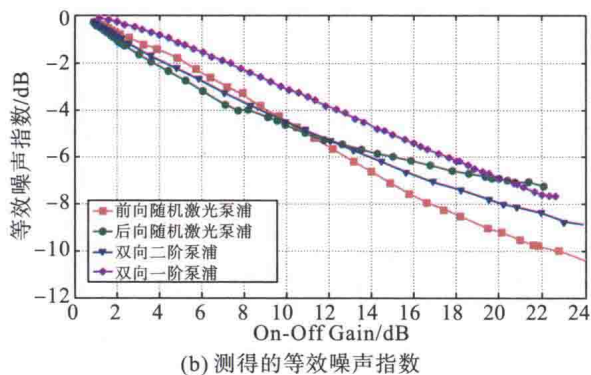


图 1-7 基于光纤随机激光的分布式拉曼放大实验装置图和测得的等效噪声指数

分布式光纤传感 (distributed fiber-optic sensing, DFS) 作为光纤传感技术领域的重要分支, 具有以下突出优势: 光纤本身就是传感器, 集传感与传输于一体; 可连续感知光纤路径上各点的温度、应变等物理参量的空间分布和变化信息; 一根光纤能获得多达数十万点的传感信息, 可构成目前距离最长、容量最大的传感网络。DFS 技术在输电电缆、油气管道、高速铁路、桥梁隧道等关系国计民生的重大设施安全监测领域具有广阔的应用前景。但是要实现长距离、高空间分辨率与测量精度的 DFS, 尚面临光纤损耗所致的大范围低精度区域、非线性所致的谱展宽、非局域化所致的系统误差等挑战。

由于基于高阶 RFL 的 DRA 技术具有增益平坦、噪声较低、稳定性好等独特性质, 所以可在 DFS 应用中扮演重要的角色。首先, 其被应用于 BOTDA, 用于测量施加在光纤上的温度或应变。采用二阶 RFL 与一阶低噪声 LD 的混合泵浦方式可以使得 BOTDA 的传感距离延伸至 154.4km, 其实验装置如图 1-8 所示。该系统具有 5m 的空间分辨率和 $\pm 1.4^{\circ}\text{C}$ 的温度精度, 如图 1-8 (a), 1-8 (b) 所示^[42]。而采用二阶和三阶 RFL 混合放大的方式可以使得 BOTDA 的传感距离延伸至 175km, 并同时达到 8m 的空间分辨率和 $\pm 2.06^{\circ}\text{C}$ 的温度精度。这是目前报道的最长的无中继 BOTDA 系统[46]。

超长距离无中继光传输一直是光纤通信领域的研究热点, 新型光放大技术的探索是进一步延伸无中继光传输距离的关键科学问题。基于 RFL 的 DRA 技术为长距离无中继光传输提供了一种新的光放大方法。

2015 年, Paweł Rosa 等研究了基于 RFL 的 DRA 应用于波分复用 (wavelength division multiplexing, WDM) 传输系统中的特性^[49]。图 1-9 为该放大方案的结构示意图, 采用 1365 nm 双端泵浦结构, 仅在信号接收端加一个 1455 nm 的 FBG, 从而使得激射的 1455 nm 随机激光主要能量分布方向和信号光传输方向相反, 这样可有效减小随机激光拉曼泵浦光转移到信号光的相对强度噪声。另一方面, 采用双端泵浦结构, 使得信号光沿光纤的功率分布相对平坦很多 (图 1-10), 从而提高