



拉曼光纤激光：50年的历程、现状与趋势（特邀）

周朴 姚天甫 范晨晨 李阳 郝修路 陈慧竹 马小雅 许将明 肖虎 冷进勇 刘伟

50th anniversary of Raman fiber laser: History, progress and prospect (*Invited*)

Zhou Pu, Yao Tianfu, Fan Chenchen, Li Yang, Hao Xiulu, Chen Yizhu, Ma Xiaoya, Xu Jiangming, Xiao Hu, Leng Jinyong, Liu Wei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20220015>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于金刚石拉曼转换的光束亮度增强研究进展

Development of beam brightness enhancement based on diamond Raman conversion

红外与激光工程. 2021, 50(1): 20200098-1-20200098-11 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200098>

皮秒多脉冲泵浦KGW红外多波长拉曼激光器

Picosecond multi-pulse burst pump KGW infrared multi-wavelength Raman laser

红外与激光工程. 2020, 49(11): 20200044-1-20200044-11 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200044>

声光调Q腔式Nd:YAG/RTP级联拉曼激光特性

Acousto-optic Q-switched intracavity Nd:YAG/RTP cascaded Raman laser characteristics

红外与激光工程. 2019, 48(6): 606006-0606006(5) <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0606006>

CCD的非线性响应特性对光束质量测量的影响及修正

Impact and correction of CCD nonlinear response on measurement of the laser beam quality

红外与激光工程. 2017, 46(8): 817004-0817004(8) <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0817004>

光谱合成激光阵列指向偏差的光束特性分析

Analysis of beam characteristic in spectral beam combining of laser array with pointing deviation

红外与激光工程. 2018, 47(1): 103010-0103010(6) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0103010>

小型化高光束质量MgO:PPLN中红外光参量振荡器

Miniaturized mid-infrared MgO:PPLN optical parametric oscillator with high beam quality

红外与激光工程. 2020, 49(7): 20190512-1-20190512-6 <https://doi.org/10.3788/IRLA20190512>

拉曼光纤激光: 50 年的历程、现状与趋势 (特邀)

周 朴, 姚天甫, 范晨晨, 李 阳, 郝修路, 陈慧竹, 马小雅, 许将明, 肖 虎, 冷进勇, 刘 伟

(国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 自 1972 年 Roger H. Stolen 等人首次基于受激拉曼散射效应在玻璃光纤中实现激光输出以来, 拉曼光纤激光技术已经走过了 50 年的发展历程。文中首先分阶段呈现拉曼光纤激光的发展历程, 介绍具有里程碑意义的经典文献和重要技术突破, 勾勒出拉曼光纤激光发展的概貌。其次根据拉曼光纤激光的研究现状, 整理具有代表性的最新成果; 介绍随机分布式反馈拉曼光纤激光、中红外拉曼光纤激光和超快激光等最新研究热点。最后梳理拉曼激光合束、半导体激光直接泵浦和非线性效应耦合新机制等方面的发展趋势。

关键词: 受激拉曼散射; 拉曼光纤激光; 非线性效应; 功率定标放大; 光束质量
中图分类号: O437.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220015

50th anniversary of Raman fiber laser: History, progress and prospect (*Invited*)

Zhou Pu, Yao Tianfu, Fan Chenchen, Li Yang, Hao Xiulu, Chen Yizhu,
Ma Xiaoya, Xu Jiangming, Xiao Hu, Leng Jinyong, Liu Wei

(College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The Raman fiber laser (RFL) has been developed for 50 years since the first laser generation in fiber based on stimulated Raman scattering in 1972 by Roger H. Stolen. Firstly, the development history of RFL was presented in stages. Through the introduction on classic milestone literatures standing for the significant technological breakthroughs, the general picture of the development of Raman fiber laser technology could be formed. Secondly, based on the recent status of RFL, the representative advanced achievements were selected, together with the novel research hotspots on the random distributed feedback Raman fiber lasers, middle-infrared Raman fiber lasers and ultra-fast fiber lasers. Finally, the future prospects of RFL were discussed, including the laser beam combination, laser diode directly pumped RFL and new mechanism on interactions among fiber nonlinear optics.

Key words: stimulated Raman scattering; Raman fiber laser; nonlinear effects; power scaling; beam quality

收稿日期: 2022-01-04; 修订日期: 2022-01-18

基金项目: 国家自然科学基金 (62061136013, 11704409, 12174445); 湖南省自然科学基金创新群体项目 (2019 JJ1005)

作者简介: 周朴, 男, 研究员, 博士, 主要从事高功率激光技术方面的研究。

姚天甫, 女, 副研究员, 博士, 主要从事拉曼光纤激光技术方面的研究。

0 引言

1960 年,首台激光器研制成功之后,长期受限于入射光强度的非线性光学研究迎了来曙光^[1]。1962 年, E. J. Woodbury 等首次发现受激拉曼散射 (Stimulated Raman Scattering, SRS)^[2-3]。作为一种非线性光学效应, SRS 效应源自光场诱导介质分子 (可以是气体、液体和固体) 振动产生的主动跃迁过程, 是一种具有受激辐射性质的非弹性散射。虽然 SRS 和自发拉曼散射^[4] 在本质上相关, 但是两者涉及的分子振动状态存在重要区别: SRS 一般在高强度激光入射情况下产生, 介质分子的振动特性是相干的, 由此产生的拉曼斯托克斯光同样是相干的, 且与介质分子的振动、入射激光的偏振、频谱等特性密切相关。然而, 产生 SRS 效应的阈值通常比较高, 相关研究在数年间进展缓慢。

1970 年, 贝尔实验室的 E. P. Ippen 利用准连续激光泵浦在纤芯为液体的光波导中首次实现了拉曼激光输出^[5]; 1972 年, 贝尔实验室的 R. H. Stolen 等成功研制基于全固态玻璃光纤的拉曼光纤激光器 (Raman fiber lasers, RFLs), 自此开启了基于 SRS 效应拉曼光纤激光 (包括光纤激光的产生、放大) 等技术研究的序幕^[6]。至今, 拉曼光纤激光技术已经走过了 50 年的发展历程, 在光纤通信、光纤传感等领域得到了广泛应用。

拉曼光纤激光技术的理论模型^[7-14]、激光介质材料^[15-18] 以及激光系统^[19-26] 等方面已有很多经典的文献, 文中重点介绍拉曼光纤激光技术 50 年发展史上的重要里程碑和代表性成果, 旨在呈现拉曼光纤激光发展的全貌。

1 1972 年: 拉曼光纤激光问世

1972 年 1 月 15 日, 贝尔实验室的 R. H. Stolen 等

在 Applied Physics Letters 上发表题为“玻璃光波导中的拉曼振荡 (Raman Oscillation in Glass Optical Waveguide)”一文^[6], 首次报道了利用光纤中 SRS 效应实现激光输出。实验系统示意图如图 1 所示, 图中的光纤是康宁公司生产的单模全固态光纤, 纤芯直径为 4 μm, 泵浦源是波长为 532 nm 的脉冲激光, 对应的一阶 Stokes 光波长为 545 nm。相比于液体和晶体, 玻璃的拉曼增益要低约 2 个数量级, 但得益于光纤中的功率密度高、作用距离长等特点, 低损耗光纤的拉曼效应产生阈值同样可能比较低。实验中, 分别在单程传输和谐振腔中实现了拉曼信号光输出。

同年 11 月, 贝尔实验室的 R. G. Smith 在 Applied Optics 上发表与 RFLs 相关的理论文章^[27]。文章通过一系列简化和近似, 从功率偏微分方程分别推导出稳态或连续单频泵浦光经光纤单程传输后产生前向 SRS、后向 SRS 和受激布里渊散射 (Stimulated Brillouin Scattering, SBS) 效应的阈值近似公式, 分别为:

$$P_{SRS}^{forward} = 16(A\alpha_p/\gamma_0) \quad (1)$$

$$P_{SRS}^{backward} = 20(A\alpha_p/\gamma_0) \quad (2)$$

$$P_{SBS} = 21(A\alpha_p/\gamma_0) \quad (3)$$

上述三个公式形式相同。A 为纤芯面积, α_p 为泵浦光纤损耗, γ_0 为增益常数。对于纤芯面积为 10^{-7} cm^2 、光纤损耗为 20 dB/km 的光纤, 估算的前向 SRS 阈值和后向 SBS 阈值分别为 1 W 和 35 mW。文章讨论了限制单频泵浦光纤激光功率的主要因素 (SBS); 对于宽带泵浦 (纵模较多, 线宽较宽), SBS 的增益系数下降, 此时 SRS 将成为限制功率的主要因素。

1972 年发表的两篇文章分别奠定了拉曼光纤激光技术的实验与理论基础, 揭示了 SRS 效应既能成为激光产生与放大的新途径, 也会成为光纤激光功率的限制因素。在 Web of Science 数据库中检索, 迄今为

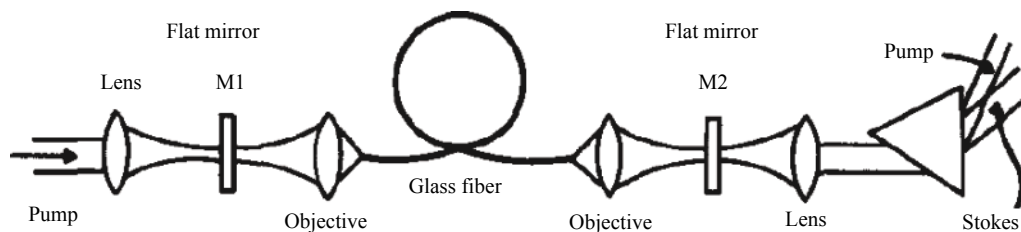


图 1 首个光纤拉曼激光实验结构示意图^[6]

Fig.1 Setup of the first fiber Raman laser^[6]

止,上述两篇论文的引用次数分别超过 600 次和 800 次,已经成为光纤激光甚至是整个激光技术领域的代表性经典文献。

2 发展历程概述

2.1 20 世纪 70 年代:起步阶段

在 20 世纪 70 年代,人们在研究光纤中的 SRS 效应研究的同时,还研究了其他类型的光纤非线性效应,如 SBS 效应^[6]、四波混频^[28]、自相位调制^[29]、光孤子^[30]以及克尔效应^[31]等。由于研究条件的限制,当时仅有少数机构开展了光纤非线性效应的研究。其中,起始阶段的研究集中在贝尔实验室,主要由 Roger H. Stolen 等负责。在 1972 年首个 RFLs 公开报道之后,贝尔实验室的研究人员基于康宁公司研制的单模光纤首次定量分析了光纤中的拉曼增益^[32]。此后,光纤技术本身得到了有力发展,如 Murray-Hill 实验室开始拉制硅基光纤、渐变折射率(graded index, GRIN)多模光纤等。基于上述光纤,研究人员将研究内容扩展至光纤中的拉曼增益谱测量^[33]、反向 SRS 脉冲的脉冲整形^[34]等。1976 年初,加拿大通信研究中心报道了首台连续波运行的 RFL,进一步提高了研究人员的兴趣^[35];同年年底,贝尔实验室和加拿大通信研究中心通过在激光腔中插入棱镜,成功研制连续波可调谐 RFLs^[36-37]。随后,研究人员又相继报道了基于级联泵浦结构的 RFLs^[38]、复杂谐振腔结构 RFLs^[39-40]以及近红外波段(1 μm)的 RFLs^[41-42]。图 2 给出了早期级联

RFLs 结构以及典型多阶拉曼输出光谱。

2.2 20 世纪 80 年代:光通信发展带来机遇

尽管在早期的研究中,人们已经关注到 SRS 效应在光通信领域的应用潜力,直到 1983 年相关研究才逐渐开展^[43-46]。相比于掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA),基于 SRS 效应的拉曼光纤放大器(Raman fiber amplifier, RFA)具有以下几个方面的优势^[47]:

(1) 不依赖稀土元素掺杂,普通的无源光纤即可用于产生增益。这使得 RFA 与大多数通信系统兼容,通信传输光纤可以复用,既可以用作传输介质,也可以用作增益介质。

(2) 波长灵活性。原则上可以在光纤低损耗传输谱(范围约为 0.3~2 μm)中的任意波长产生拉曼增益。

(3) 拉曼增益谱宽,可以同时放大波分复用系统中的多个信道。

(4) 拉曼增益响应快速,在高比特率系统中,可以放大整个比特流而不产生任何失真。

(5) 利用反向泵浦有利于降低噪声系数。

尽管如此,在当时,RFA 的发展还是遇到了挑战:缺乏高功率、高效率光纤耦合输出的泵浦激光器。研究表明,RFA 所需泵浦功率约为 EDFA 泵浦功率的 5 倍^[19]。正因如此,1988 年之后,光纤通信的研究集中到 EDFA 方向,RFA 的研究较少得到关注。不过,RFLs 和 RFA 研究还是取得了许多重要进展,包括:1988 年,研究人员报道了首个基于光纤布拉格光栅的 RFLs^[48];同年,面向光通信系统实际应用,研究人员开始关注分布式 RFA 的性能优化问题^[47]。值得关注的是,同样是 1988 年,双包层光纤问世,巧妙地解决了泵浦光功率受限于光纤纤芯耦合效率这一难点问题^[49];一年之后,J. Kafka 首次提出了激光二极管(laser diodes, LD)包层泵浦的光纤激光器^[50]。

与常规 RFA 的研究较少得到关注形成对比的是,自 1983 年首次实验观测到拉曼孤子^[51]后,80 年代后期,拉曼孤子激光器相关理论与实验成为当时的研究热点。1986 年,汉诺威大学量子光学研究所 F. M. Mitschke 等首次在实验中观察到可用于产生拉曼孤子的拉曼诱导频移^[52];1987 年,贝尔实验室 M. N. Islam 等报道了首个单级、级联拉曼孤子光纤激光器^[53-54],并在 1.4 μm 附近产生 100 fs 的拉曼脉冲^[55]。

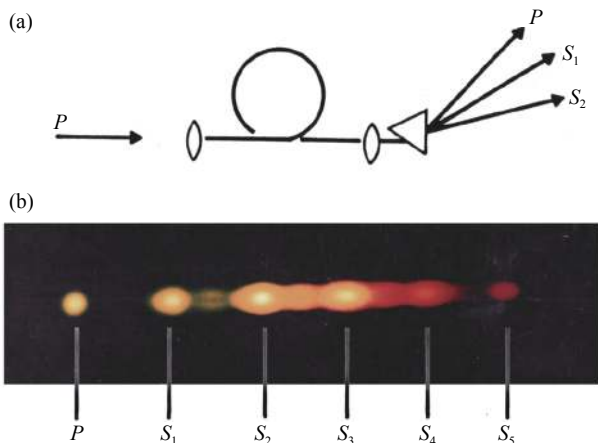


图 2 早期级联 RFLs 结构 (a) 以及典型多阶拉曼输出光谱 (b)^[19]
 Fig.2 Structure of cascaded RFLs(a) and typical multi-order Raman output spectra(b) in early years^[19]

2.3 20 世纪 90 年代: 双包层光纤激光带来的研究高峰

光纤和半导体技术是光纤激光技术发展的重要基础。20 世纪 90 年代, 研究人员报道使用高功率 LD 包层泵浦双包层光纤, 实现光纤激光器约 35 W 的功率输出^[56-57], 为拉曼光纤激光技术研究所需的高亮度泵浦源提供了解决方案。随后, 基于不同光纤的单级以及级联 RFLs 相继问世, RFL 的发展迎来新的转机。

20 世纪 90 年代, 由于泵浦 EDFA 等领域的应用需求, 基于锗硅酸盐和磷硅酸盐光纤的级联 RFLs 得到了迅速发展^[58-60]。2000 年发表的一篇综述论文^[61]对此前 RFLs 相关领域研究进行了总结, 主要成果包括: 光谱波段在 1.1~1.6 μm 、单模输出功率 1~10 W、激光光谱带宽~1 nm、产生效率接近 50% 等。此外, 由于泵浦能力的迅速提升, RFA 在光通信领域的应用优势与潜力再次得到研究人员的关注, 发表了大量的研究论文; 2003 年, 密歇根大学课题组的 Mohammed Islam 将相关研究汇总成了两卷^[62]。根据不同的应用需求, RFA 逐渐发展为分布式放大器和离散式放大器两类。其中, 分布式 RFA 的主要特点是将传输光纤直接作为放大器增益光纤, 信号增益产生于整个传输过程 (数 10 km), 因此输入信号功率较低, 有利于减少非线性效应影响, 并可以容忍较高的损耗。为进一步

避免泵浦光和信号光之间的不必要的串扰, 反向分布式 RFA 逐渐成为主流^[63-64]。

离散式 RFA 与分布式 RFA 不同, 它是独立于传输光纤的光放大装置 (同 EDFA 类似), 传输光纤中没有泵浦光, 仅使用在信号传输之前或之后用来补偿传输损耗。相比于 EDFA, 离散式 RFA 能够获得超宽带宽增益, 增加光纤网络的容量, 拓展放大波长范围, 在放大密集波分复用 (Wavelength division multiplexing, WDM) 系统中的应用潜力巨大。1999 年, 美国新泽西州伊顿镇泰科潜艇有限公司实验室 H. Kidorf 等将多波长和宽带泵浦方式应用于离散 RFA, 实现了覆盖近 100 nm 信号波段的平坦化拉曼增益^[65-66]。同期, 日本 Fitel 光电实验室 Y. Emori 等还提出了色散补偿 RFA 概念, 通过直接在色散补偿光纤中产生拉曼增益, 能够同时实现色散补偿和拉曼放大, 为降低色散补偿光纤模块的插入损耗提供了解决途径^[67-68]。图 3 分别给出了 1980~2000 年 OSA 和 IEEE 发表 EDFA 以及 RFA 相关的论文以及申请专利数量统计以及 1994~2003 年 OFC 会议传输实验的容量-距离乘积 (单位: $\text{Tb}\cdot\text{km}/\text{s}$)。可以看出, 拉曼光纤放大器的性能在 90 年代得到了全面的提升, 将其应用于光纤通信逐渐成为可能。

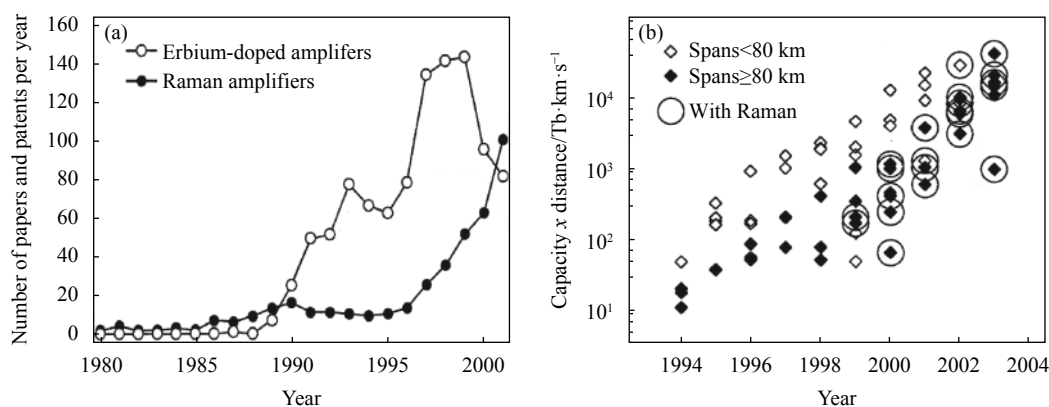


图 3 (a) 1980~2000 年 OSA 和 IEEE 发表 EDFA 以及 RFA 相关的论文以及申请专利数量统计^[69]; (b) 1994~2003 年 OFC 会议的传输实验的容量-距离乘积^[69]

Fig.3 (a) Statistics of papers and patent applications related to EDFA and RFA published by OSA and IEEE from 1980 to 2000^[69]; (b) Capacity distance product of transmission experiment of OFC Conference from 1994 to 2003^[69]

2.4 21 世纪前 10 年: 全面发展

进入 21 世纪, 光纤通信技术突飞猛进, RFA 在光纤通信领域得到了广泛应用, 逐渐发展为常规商用化

器件, 几乎每一个长距离 (一般定义 300~800 km) 或超长距离 (一般定义在 800 km 以上) 的光纤传输系统都使用 RFA。2008 年, 研究人员通过在 C+L 波段采

用 160 个 WDM 信道 (信道间距为 50 GHz), 在 240 km 的传输距离上演示了 25.6 Tb/s 的通信传输实验^[70]。同一时期, 作为实现窄线宽激光的重要技术手段之一, 分布反馈 (Distributed Feedback, DFB) 光纤激光器取得重要进展, 它的基本原理是利用 SRS 提供增益、利用 π -相移光纤布拉格光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 提供分布反馈。2001 年, 密歇根大学课题组的 Perlin 和 Winful 首次提出在 DFB 光纤激光器中使用拉曼增益, 取代稀土离子增益, 成功将 π -相移 FBG 刻写在无源光纤中, 实现窄线宽拉曼激光输出^[71]。2009 年, 南安普顿大学课题组的 Hu 等将拉曼 DFB 光纤激光器中的 π -相移 FBG 长度缩短至 20 cm 以内, 通过优化相移宽度和位置, 激光器的阈值可以低于 1 W, 斜率效率大于 80%^[72]。

与此同时, RFLs 在光谱拓展以及功率提升方面也得到了飞速发展。在光谱拓展方面, 研究人员实现了在不同波段的超宽调谐范围的 RFLs。其中, 俄罗斯科学院的 Babin 等报道了基于磷酸盐光纤的全光纤可调谐 RFLs, 调谐范围超过 50 nm, 输出功率达到 3.2 W, 在 1258~1303 nm 范围内, 输出功率几乎恒定^[73]。拉瓦尔大学 E. Bélanger 等实现了连续调谐超过 60 nm (1075~1135 nm) 的宽带可调谐全光纤 RFLs, 输出功

率高达 5 W^[74]。此外, 在大于 1.5 μm 的光谱波段, 以硫系玻璃为代表的软玻璃材料光纤逐渐在产生拉曼激光方面得到应用。2003 年, SFA 公司 P. A. Thielen 等基于硫系玻璃首次实现 1.8 μm 波段的拉曼激光输出^[75]; 2006 年, 悉尼大学光纤技术中心 S. D. Jackson 等首次基于该类型光纤实现 2 μm 以上波段的一阶和二阶拉曼激光输出^[76]。在功率提升方面, 早期研究为了提高纤芯中的功率密度, 充分激发 SRS 增益, 一般采用纤芯泵浦单模光纤方式, 输出功率通常为数十瓦量级, 主要面向通信、传感等方面的应用。2009 年, 欧洲南方天文台的 Yan Feng 等采用振荡器结构 (实验结构如图 4 所示), 将纤芯泵浦 RFLs 输出功率提升至 153 W, 转换效率高达 85%。该结果标志着 RFLs 迈入了百瓦量级时代^[77]。然而, 纤芯泵浦 RFLs 的功率提升受限于泵浦能力、高阶拉曼光的产生、光谱展宽 (回光增强) 等因素的影响。因此, 研究人员相继提出了包层泵浦双包层光纤以及纤芯泵浦 GRIN 光纤等增强拉曼激光亮度的方式。得益于有效的亮度增强 (Brightness Enhancement, BE) 技术, RFLs 在低亮度泵浦下仍然能够保持输出拉曼激光光束质量, 在获得高功率近衍射极限激光方面具有较大的发展潜力。

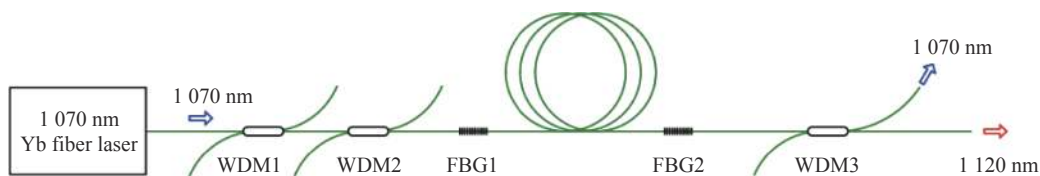


图 4 2009 年 153 W RFL 示意图, WDM: 波分复用器; FBG: 光纤布拉格光栅^[77]

Fig.4 Experiment setup of the 153 W RFL reported in 2009. WDM: wavelength division multiplexing, FBG: fiber Bragg grating^[77]

2002 年, 英国南安普顿大学的 J. Nilsson 等率先提出了双包层拉曼光纤的理念, 在内包层中传输的低亮度泵浦光可以通过纤芯中的 SRS 逐渐被转换为高亮度的纤芯光, 最终实现亮度增强^[78-79]。2006 年, 该课题组利用包层泵浦方式获得了 10 W 的拉曼激光输出, 光束质量 M^2 因子由 4.8 (泵浦光) 提升至 1.2 (信号光), 亮度增强了 9.6 倍^[79]。2004 年, 美国莱特帕特森空军基地的 Baek 等人报道了首台基于 GRIN 光纤的 RFLs, 光束质量 M^2 因子为 1.66, 最高输出功率为 800 mW^[80]。2007 年, 美国空军研究实验室的 N. B.

Terry 等通过理论计算指出基于 GRIN 光纤的 RFLs 中存在的光束净化效应, 相比高阶拉曼光而言, 基模拉曼光与泵浦光之间的重叠因子更高, 因此, 基模拉曼光具有更高的拉曼增益、更容易被激发^[81]。

2.5 2010 年以来: 功率迅速提升、面临新的挑战

自 2010 年起, 得益于快速发展的掺镱光纤激光 (Yb-doped Fiber Lasers, YDFLs) 技术和相关亮度增强技术, 高功率 RFLs 的研究取得了一系列重要进展。输出功率从数十瓦提升至数千瓦量级, 并实现了常规宽带和窄线宽激光、近红外和中红外、相干和部分相

干激光等不同类型的激光输出。2017 年的两篇代表性综述文章^[21-22]对在此之前的研究成果进行了详细的汇总介绍; 2019 年的综述文章^[23]详细介绍了 RFLs 中亮度增强技术的相关研究, 并指出 RFLs 在输出高功率、近衍射极限激光方面具有巨大潜力。截至 2021 年, 基于纯无源光纤的 RFLs 已经实现 3 kW 级功率输出^[82], 基于掺镱-拉曼混合增益的拉曼激光已经实现了 4 kW 级功率输出^[83]。值得注意的是, 高功率 RFLs 的光束质量通常相对较差 (M^2 为 2 以上), 如何通过优化结构参数实现高光束质量输出仍是未来发展亟需解决的关键问题。此外, 在光纤通信领域, 基于分布式级联 RFA 已经实现了两个模式信号的同步放大^[84]。在上海交通大学 J. Li 等报道的实验中, 1360 nm 和 1455 nm 的泵浦光都以 LP₁₁ 模注入少模光纤, 在 1542~1558 nm 的信号频段内, LP₀₁ 和 LP₁₁ 模式均实现了 4 dB 的最大开关增益, 并且差模增益小于 0.4 dB。由此可见, RFA 在未来大容量模分复用光通信系统中也具有较大应用潜力^[84]。

3 拉曼光纤激光的发展现状

3.1 高功率拉曼光纤激光

3.1.1 高功率拉曼光纤振荡器

由泵浦光纤激光器、高反射率 FBG、拉曼增益光纤和输出耦合 FBG 组成的振荡器结构是 RFL 最为经典的结构。表 1 和图 5 分别展示了近年来高亮度激光输出的拉曼振荡器的功率发展趋势。目前, 基于振荡器结构输出的 RFLs 最高功率是以色列索克雷核研究所的 Glick 等于 2018 年报道的 1.2 kW 级 RFLs, 所用拉曼光纤为特殊设计的三包层光纤 (纤芯、内包层、外包层直径分别为 25 μm 、45 μm 与 250 μm)^[85], 1 kW 输出功率下光束质量 M^2 因子为 2.75, 亮度提升倍数约为 7。2017 年, 俄罗斯科学院 Babin 等通过在纤芯为 62.5 μm 的多模 GRIN 光纤中刻写光栅, 将 GRIN 光纤光束净化效果与光栅选模特性相结合, 报道了首个基于 GRIN 光纤的全光纤化 RFLs, 实现了 50 W 的拉曼激光输出, 光束质量 M^2 因子由泵浦光的

表 1 近年来拉曼光纤振荡器的研究进展

Tab.1 Research progress of Raman fiber oscillator in recent years

Years	Research institute	Power/W	M^2 in/out	Efficiency	BE	Wavelength/nm	References
2004	Wright Patterson Air Force Base	0.8	7/1.6	6%	1	1 116	[80]
2006	University of Southampton	10.2	4.8/1.2	48%	9.6	1 660	[79]
2009	European Southern Observatory	153	—	85%	—	1 120	[77]
2010	OFS Laboratory	81	—	32%	—	1 480	[86]
2010	European Southern Observatory	100	2/>1.6	62.5%	0.9	1 120	[87]
2013	Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences	3	—	35%	—	980	[88]
2013	National University of Defense Technology	119	—	82%	—	1 173	[89]
2014	Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS	12.3	3.2/1.46	82.7%	2.2	1 658	[90]
2015	University of Southampton	6	22/1.9	9%	9.6	1 120	[91]
2015	University of Southampton	19	22.2/5	48%	5.3	1 019	[91]
2016	Soreq Nuclear Research Center	80	14/5.6	53%	3.5	1 020	[92]
2017	Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences	10	20/1.2	15.4%	40	954	[93]
2017	Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences	17	—	19%	—	954	[94]
2017	Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences	50	26/2.6	27%	25	954	[94]
2017	Soreq Nuclear Research Center	154	19.0/8	65%	3	1 020	[95]
2018	Soreq Nuclear Research Center	135	7.6/2.5	68%	5.6	1 081	[96]
2018	Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences	62	30.0/3	30%	25	954	[97]
2018	Soreq Nuclear Research Center	250	8.4/3.3	60%	3.6	1 080	[98]
2018	Soreq Nuclear Research Center	1 200	8/2.75	85%	7	1 120	[85]

说明: 表中“—”表示该文献中未提供该项数据

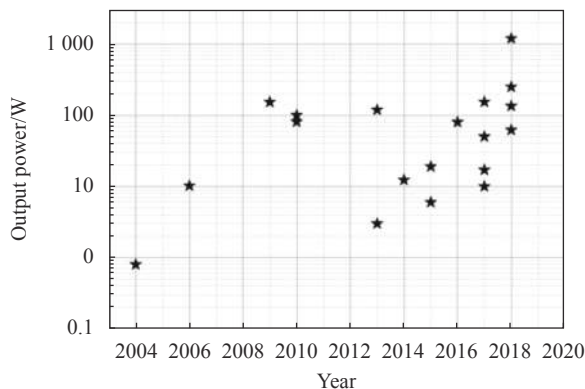


图 5 近年来拉曼振荡器的输出功率增长趋势

Fig.5 Output power development of Raman fiber oscillator in recent years

26 提升至信号光的 2.6, 对应的激光亮度提升了 25 倍^[94]; 次年, 该课题组将 GRIN 光纤纤芯增加至 100 μm , 从而进一步提高注入泵浦功率, 实现了 62 W 拉曼激光输出, 光束质量 M^2 因子由泵浦光的 30 提升至信号光的 3, 亮度提升了 30 倍^[97]。2021 年, 该课题组通过优化实验结构进一步提升了激光器输出光束质量, 最高输出功率为 52 W 时, 光束质量 M^2 因子由泵浦光的 34 提升至信号光的 2, 对应的亮度增强因子为 73, 为目前公开报

道的 GRIN 光纤激光器中的最高亮度增强因子^[99]; 同年, 该课题组通过在相似的结构中采用级联泵浦的方式获得了最高输出功率为 12 W 的近衍射极限的拉曼激光输出, 最大功率下的光束质量 M^2 因子为 1.3^[100]。国防科技大学课题组的 Chenchen Fan 等基于 GRIN 光纤搭建了全光纤结构的 RFLs, 实现了 443 W 的激光输出, 对应光束质量 M^2 为 3.5, 亮度提升倍数为 4.2^[101], 为目前同类型激光器的最高输出功率值。

3.1.2 高功率拉曼光纤放大器

主振荡功率放大器 (Master Oscillator Power Amplifier, MOPA) 结构能够缓解 FBG 等光纤器件对热损伤阈值与功率损伤阈值的要求, 其在 RFLs 中的运用能够大幅提升输出功率。此外, 在 RFLs 中采用 MOPA 结构, 后向回光远低于振荡器结构, 有利于降低后向回光对泵浦激光器的影响。表 2 和图 6 分别展示了近年来 RFA 的输出功率水平。

目前, 光纤放大器的最高输出功率是基于掺镱-拉曼混合增益机制产生的。2014 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所的 Lei Zhang 等首次提出该类型的激光器, 并实现了 1.3 kW 高功率输出^[102]。实验结果如图 7 所示, 信号光和泵浦光被耦合进入掺镱光纤

表 2 近年来高功率拉曼光纤放大器的研究进展

Tab.2 Research progress of high-power RFA in recent years

Years	Research institute	Power/W	M^2 in/out	Efficiency	BE	Wavelength/nm	Gain type	References
2002	University of Southampton	0.05	4.4/—	36%	17.5	1 069	Raman	[78]
2012	Jena University	208	—	87%	—	1 118-1 130	Raman	[103]
2013	OFS Laboratory	301	—	64%	—	1 480	Raman	[104]
2014	Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS	300	—	70%	—	1 120	Yb-Raman	[105]
2014	Beijing University of Technology	14.3	—	38.5%	—	2 147	Raman	[106]
2014	Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS	1 280	—	70%	—	1 120	Yb-Raman	[102]
2014	National University of Defense Technology	732	—	82.2%	—	1 120	Yb-Raman	[107]
2015	National University of Defense Technology	1 520	—	75.6%	—	1 120	Yb-Raman	[108]
2016	Tsinghua University	3 890	—/1.49	70.9%	—	1 123	Yb-Raman	[83]
2018	National University of Defense Technology	528	10.4/4.2	68%	3.8	1 060	Raman	[109]
2019	National University of Defense Technology	1 002	9.2/5.1	84%	2.6	1 060	Raman	[110]
2019	Tsinghua University	3 700	—/2.18	—	—	1 123	Yb-Raman	[111]
2020	National University of Defense Technology	762.6	6.12/2.24	25%	2.35	1 130	Raman	[112]
2020	National University of Defense Technology	2 087	~13.5/8.9	59.33%	—	1 130	Raman	[113]
2021	National University of Defense Technology	2 034	10.5/2.8	79.35%	11.2	1 130	Raman	[114]
2021	National University of Defense Technology	3 083	~11/5.72	78.7%	2.9	1 131	Raman	[82]

说明: 表中“—”表示该文献中未提供该项数据

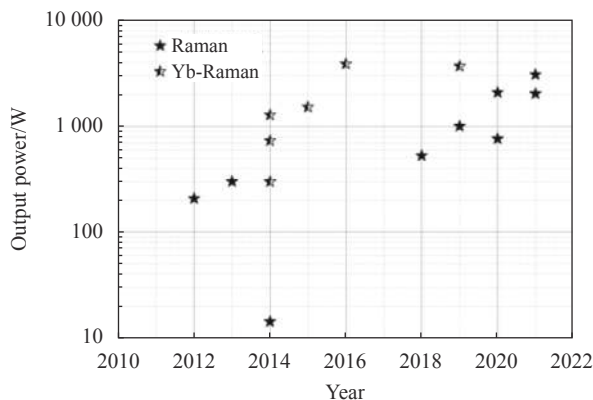


图 6 近年来高功率拉曼光纤放大器的输出功率发展

Fig.6 Output power scaling of high-power RFA in recent years

中,通过增加掺镱光纤或者无源光纤的长度,在同一放大级实现泵浦光的放大和拉曼转换。随后,国防科技大学、清华大学等研究机构继续探索掺镱-拉曼混合增益的功率提升潜力,先后实现了 1.5 kW 和 3.89 kW 的拉曼激光输出^[83, 108]。

然而,上述机制的激光器泵浦方式本质上还属于纤芯泵浦。从拉曼增益产生的过程来看,未能实现从泵浦光到信号光的亮度提升。为进一步探索基于光

纤 SRS 效应的亮度提升潜力,研究人员开始使用具有光束净化效果的 GRIN 光纤以产生高亮度拉曼激光。近年来,国防科技大学课题组分别基于纤芯泵浦多模 GRIN 光纤以及包层泵浦三包层光纤等新型技术手段对高功率 RFA 开展了系列研究。2018 年, Yizhu Chen 等采用 MOPA 方案搭建了基于 GRIN 光纤的全光纤结构 RFA^[109],实现了 528 W 的拉曼激光输出,光束质量 M^2 因子由泵浦光的 10.4 提升为信号光的 4.2,对应的亮度提升倍数为 3.8。随后三年内,进一步将该类型放大器的输出功率逐渐提升至 1 kW、2 kW 以及 3 kW 量级,对应的光束质量 M^2 因子分别为 5.1、2.8、7.2(由此计算出输出拉曼激光亮度分别提升了 2.6 倍、11.2 倍以及 2.9 倍),是目前公开报道基于纯拉曼增益的最高输出功率值^[82, 110, 113-114]。2021 年,国防科技大学课题组的 Chenchen Fan 等通过优化泵浦时域的方式有效抑制高阶拉曼光的产生,进一步提升了光束质量,基于 GRIN 光纤实现了光束质量 M^2 为 1.6 的千瓦级拉曼激光输出^[115],相关实验结构和实验结果如图 8 所示。此外,国防科技大学课题

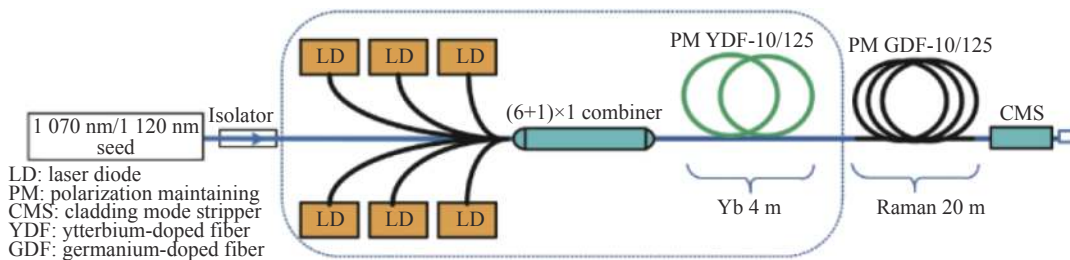


图 7 掺镱-拉曼混合增益光纤放大器结构示意图^[102]

Fig.7 Scheme of the experimental setup of ytterbium-doped-Raman-hybrid-gain-fiber amplifier^[102]

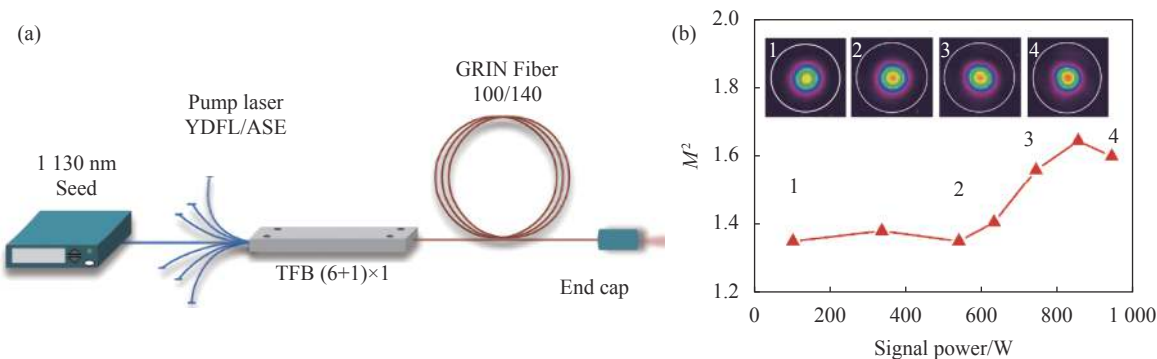


图 8 (a) 千瓦级近衍射极限 GRIN 光纤 RFA 结构示意图; (b) 输出光斑与光束质量随拉曼激光功率演化曲线^[115]

Fig.8 (a) Experimental scheme of kilowatt RFA with near-diffraction-limited output based on GRIN fiber; (b) Evolution curve of output spot and beam quality with Raman signal power^[115]

组的 Yizhu Chen 等还基于纤芯/内包层/外包层直径为 31 μm/55 μm/360 μm 的三包层光纤, 搭建了首个全光纤结构的包层泵浦 RFA, 实现了 762.6 W 的拉曼激光输出, 光束质量 M^2 为 2.24。

3.2 波长捷变与光谱拓展

光谱是激光的一个重要特性。近年来, 波长捷变和中心波长拓展也是 RFL 发展呈现的重要特点。2012 年, 德国耶拿大学的 Rekas 等基于空间结构搭建了 RFA, 对 1 118~1 130 nm 光谱范围可调谐的种子进行放大, 获得了最大功率 208 W 的可调谐拉曼激光, 对应的拉曼转换效率为 87%^[103]。2013 年, OFS 实验

室的 V. R. Supradeepa 等利用 W 形折射率分布的光纤 (W 形折射率分布拉曼光纤具有滤波特性、能够有效抑制 1 500 nm 以上的高阶拉曼产生) 搭建了全光纤结构的级联 RFA, 实验结构如图 9 所示^[104], 获得了 1 480 nm 的拉曼激光输出, 功率 301 W, 拉曼转换效率为 64%(1 117~1 480 nm), ~43%(975~1 480 nm)。同年, 国防科技大学课题组的 Hanwei Zhang 等基于 75 m 纤芯包层直径分别为 10/125 μm 的无源光纤搭建了全光纤结构的 RFLs, 通过优化设计 FBG 的反射率及反射带宽等参数, 获得了中心波长为 1 173 nm 的激光输出, 功率 119 W, 拉曼转换效率为 82%^[89]。

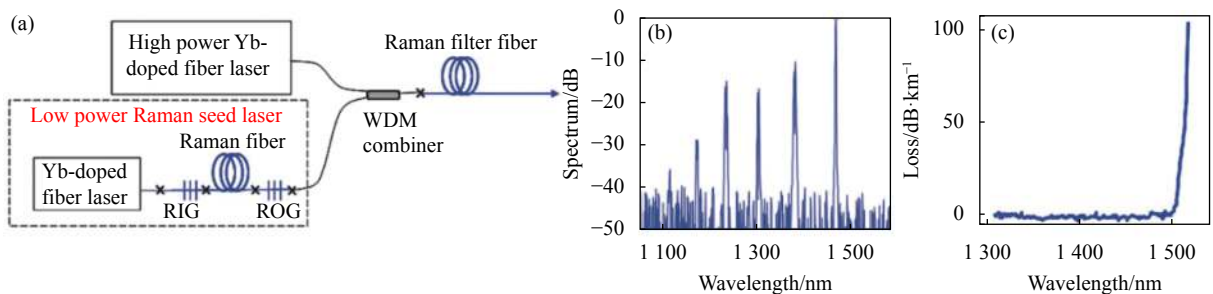


图 9 (a) 级联 RFA 结构示意图; (b) 种子激光器光谱图; (c) 拉曼光纤损耗谱^[104]

Fig. 9 (a) Setup of the cascaded RFA; (b) Spectrum of seed laser; (c) Loss spectrum of Raman fiber^[104]

2018 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所的 Lei Zhang 等通过优化泵浦时域的方式, 基于随机分布式反馈拉曼光纤激光器 (Random Distributed Feedback Raman Fiber Laser, RRFL) 实现了 1.1~1.8 μm 的超宽光谱范围的级联拉曼激光输出, 在 1 806 nm 处的 9 阶斯托克斯光功率超过 100 W^[116]。2019 年, 印度科学研究所的 V. Balaswamy 等利用放大自发辐射 (Amplified Spontaneous Emission, ASE) 光源泵浦 RRFL 以进一步降低泵浦时域起伏, 实现了超高光谱纯度级联拉曼光输出, 高阶拉曼波长分别为 1 390 nm 和 1 480 nm, 光谱纯度分别为 98% 和 97.5%^[117-118]。

3.3 特殊波长的产生与应用

3.3.1 倍频产生高功率可见光

高功率可见光在激光导星自适应光学系统等领域有重要需求^[119]。由于 RFLs 在很宽范围的近红外波段均能实现高功率输出, 对其进行倍频以获得高功率可见光已经成为相关技术领域的研究热点。2004 年, 日本电气通信大学激光研究中心的 Yan

Feng 等首次通过倍频拉曼光纤激光实现了 589 nm 激光输出^[119]。实验结构如图 10 所示, 泵浦源是波长为 1 100 nm 的双包层掺镱激光器, 利用 300 m 长的掺磷单模光纤作为增益介质实现 1 178 nm 波段激光, 在腔外通过三硼酸锂晶体倍频, 实现 589 nm 激光输出。

此后, 科研人员采用类似结构相继实现了 477 nm^[120]、488 nm^[120]、560 nm^[121]、620 nm^[122] 和 655 nm^[123] 等波长的可见光激光。2019 年, 俄罗斯科学院 A. G. Kuznetsov 等利用 LD 泵浦 GRIN RFLs, 在 488 nm 得到 0.4 W 的激光输出^[120], 发现与直接用 938 nm 的 LD 泵浦所产生的一阶 976 nm 激光相比, 采用 915 nm 的 LD 泵浦产生的二阶拉曼光 (976 nm) 具有更好的光束质量和更窄的光谱。2019 年, 伦敦帝国理工学院 A. M. Chandran 等报道了利用掺磷光纤 RFA 倍频实现的 620 nm 激光纳秒脉冲输出, 输出功率 1.5 W^[122]。2021 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所的 Shuzhen Cui 等利用反向泵浦和窄线宽的 FBG 抑制 RRFL 的光谱展宽, 实现了 1.09 W 的 589 nm

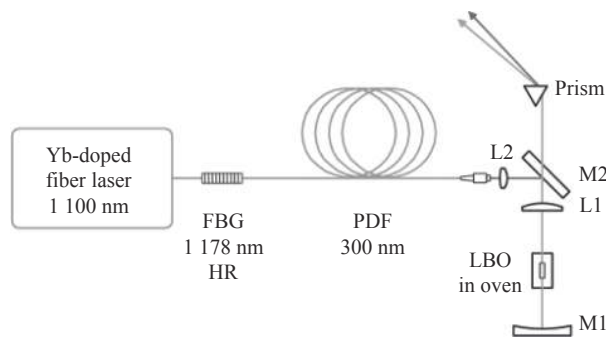


图 10 RFL 倍频输出 589 nm 激光结构示意图^[119]

Fig.10 Experimental setup of frequency doubling of RFLs to generate laser at 589 nm^[119]

倍频激光输出, 倍频效率 10.8%^[124]; 同年, 该课题组采用级联拉曼嵌套腔结构, 获得了 10.19 W 的 589 nm 激光输出, 效率达 18.12%^[125]。

3.3.2 泵浦稀土掺杂光纤激光

拉曼光纤激光技术的波长灵活性使得它为特殊波长高功率泵浦源提供了新的解决方案。基于 RFL 产生特殊波段的激光作为泵浦源的泵浦高功率

掺铒光纤激光器 (Er-doped fiber lasers, EDFLs)^[126]、掺铥光纤激光器 (Tm-doped fiber lasers, TDFLs)^[127]、掺钬光纤激光器 (Ho-doped fiber lasers, HDFLs)^[128-130] 均已 有相关报道。

2006 年, 悉尼大学光纤技术中心 S. D. Jackson 等将 1160 nm 输出的 RFLs 用于泵浦 HDFLs^[128], 可以展现 RFLs 作为泵浦源的潜力。2012 年, OFS 实验室 V. R. Supradeepa 等将输出波长为 1480 nm 的 RFLs 用于泵浦 EDFLs^[126], 在 1554 nm 得到 101 W 输出, 斜率效率达 75%。2014 年, 国防科技大学课题组的 Xiong Wang 等首次将 1150 nm 的 RFLs 用于泵浦 2 μm 波段的高功率 HDFLs^[129](实验结构如图 11 所示), 最终在 2049 nm 附近获得了 42 W 激光输出, 且信噪比大于 30 dB。同年, 该课题组利用两个波长为 1173 nm 的 RFLs 泵浦 TDFLs, 在 1943.3 nm 波长处获得了 96 W 的激光输出^[127]。2015 年, 国防科技大学课题组的 Hanwei Zhang 等首次利用 RRFL 泵浦 HDFLs, 获得了 23 W 的 2050 nm 波长的激光输出^[130]。

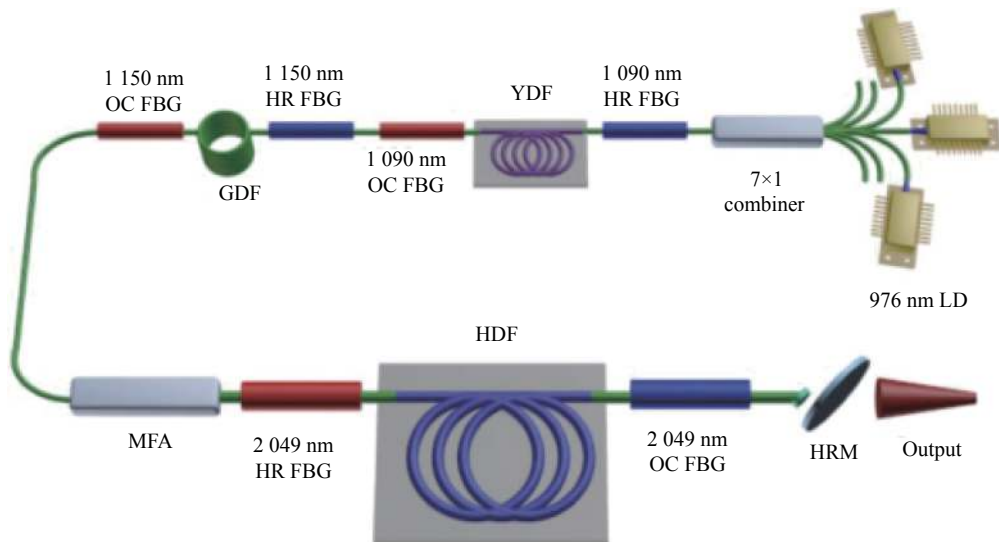


图 11 RFLs 泵浦 HDFLs 结构示意图^[129]

Fig.11 Experimental setup diagram of the HDFLs pumped by RFLs^[129]

4 新型拉曼光纤激光技术

4.1 随机分布式反馈拉曼光纤激光

2010 年, 英国阿斯顿大学课题组的 Turitsyn 等首次系统提出 RRFL^[131] 的概念, 分别利用长距离无源光纤中的瑞利散射和 SRS 提供随机分布式反馈和增益放大, 从而实现随机拉曼激光输出。与常规振荡器结

构的 RFLs 相比, RRFL 多为开腔结构, 这结构上更加简单、输出激光时序上更加稳定^[132]。此外, 该类型激光器也具有输出波长灵活的特点。因此, RRFL 被广泛地运用在测量、成像以及通信各个领域^[133-138]。近年来, RRFL 的研究和应用引起国内外同行的广泛关注, 在功率提升方面取得了较大进展, 相关结果如表 3 和图 12 所示。

表 3 近年来 RRFL 的研究进展

Tab.3 Research progress of RRFL in recent years

Years	Research institute	Power/W	Efficiency	Wavelength/nm	References
2010	Aston University	0.15	—	1 550	[131]
2015	National University of Defense Technology	124	79%	1 146	[130]
2017	National University of Defense Technology	27	—	996	[139]
2017	National University of Defense Technology	491	—	1120	[140]
2018	Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS	100.1	38.4%/27.2%	1 000-1 900	[116]
2019	National University of Defense Technology	985	78.9%	1 150	[141]
2021	National University of Defense Technology	1 570	77.5%	1 120	[142]

说明: 表中“—”表示该文献中未提供该项数据

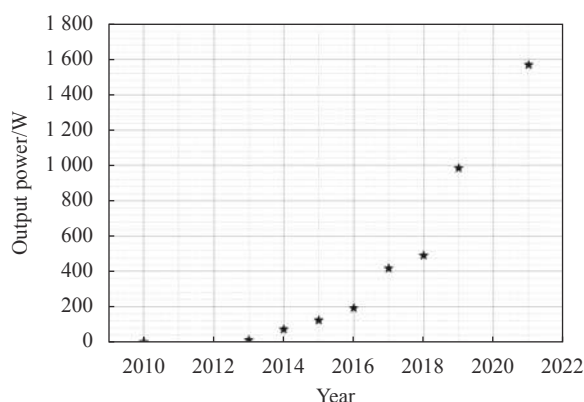


图 12 近年来 RRFL 的输出功率增长趋势

Fig.12 The trend of output power of RRFL in recent years

2015 年, 国防科技大学课题组的 Hanwei Zhang 等基于 320 m 纤芯/包层直径为 10/125 μm 的传能光纤搭建了全开腔结构的 RRFL, 获得了百瓦级随机拉

曼的激光输出^[130]。2019 年, 该课题组通过使用 90 m 长、纤芯直径为 20 μm 的无源光纤作为增益介质(可注入泵浦功率和高阶拉曼阈值得到有效提升), 激光器输出功率进一步提升至千瓦水平^[141]。目前, RRFL 的最高输出功率已经达到 1.5 kW^[142], 相关实验结构如图 13 所示。研究人员采用采用 2 kW 泵浦激光过对一段长 50 m、纤芯/包层直径为 20/400 μm 的传能光纤进行泵浦, 获得了 1.5 kW 随机拉曼激光输出, 对应的转换效率为 77.5%, 拉曼抑制比为 58.4 dB。

需要注意的是, 由于瑞利散射提供的反馈非常微弱, 为了降低激光器阈值, 上述研究均采用纤芯泵浦常规的阶跃折射率光纤, 输出激光亮度无增强效果。2017 年, 俄罗斯科学院 Babin 等首次基于 GRIN 光纤搭建了全光纤结构的 RRFL(实验结构如图 14 所示), 通过级联泵浦的方式实现了 27 W、中心波长为

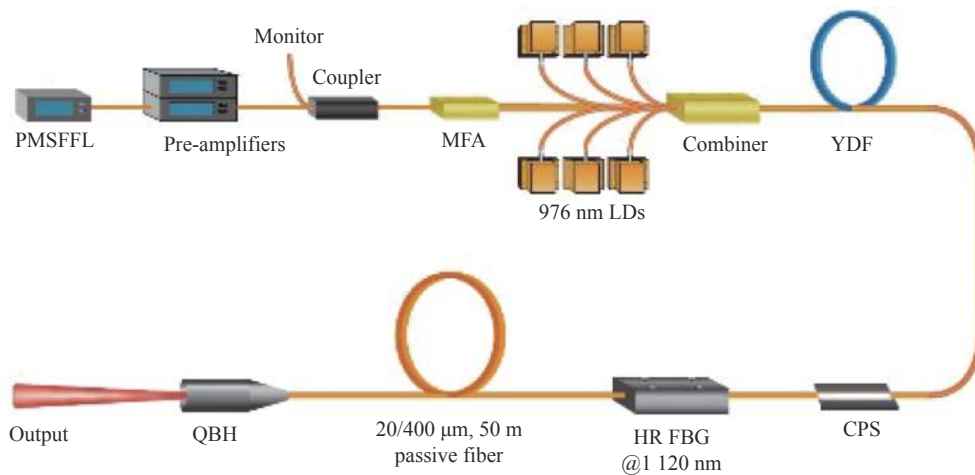


图 13 1.5 kW RRFL 结构示意图^[142]

Fig.13 Experimental setup of RRFL with 1.5 kW output power^[142]

996 nm 的具有亮度增强的 RRFL 输出, 光束质量 M^2 因子为 1.6^[139]。2021 年, 国防科技大学课题组的 Yizhu Chen 等基于一段长 120 m、纤芯直径为 62.5 μm 的 GRIN 光纤搭建了全光纤结构的 RRFL, 实现了输

出功率 306 W 的 RRFL 输出, 光束质量 M^2 由泵浦光的 9.25 净化至 2.35, 对应亮度提升倍数为 6.1。该结果也是目前 GRIN 光纤 RRFL 的最高输出功率值^[143]。

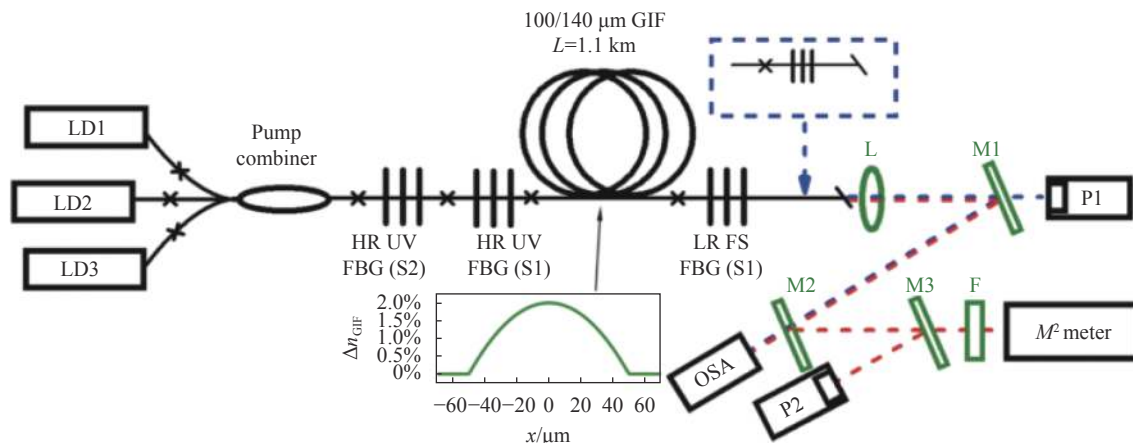


图 14 基于 GRIN 光纤的 RRFL 结构示意图^[139]

Fig.14 Experimental structure of RRFL based on GRIN fiber^[139]

4.2 中红外拉曼光纤激光

2~5 μm 波段中红外激光在生物医学、光谱特征识别、大气遥感、激光雷达、国防等领域有着重要应用。基于软玻璃光纤中的 SRS 是实现该波段激光的一种有效手段。2007 年, 加拿大拉瓦尔大学 V. Fortin 等采用 0.8 μm 飞秒激光器在氟化物光纤中成功写入 FBG^[144]; 2011 年, 课题组基于氟化物光纤 FBG 搭建全光纤结构法布里-珀罗 (Fabry Perot, F-P) 腔, 并利用 TDFLs 进行泵浦, 获得了波长为 2.19 μm 、功率为 0.58 W 的拉曼激光输出^[145], 这是首个以氟化物光纤为增益介质的 RFLs。2012 年, 课题组利用更高功率 TDFLs 进行泵浦, 并在末端增加一个在泵浦波长高反的 FBG 对系统进行了优化, 实现了功率为 3.7 W 的拉曼激光输出, 波长为 2.2 μm ^[146]。2013 年, 加拿大拉瓦尔大学 M. Bernier 等报道了在硫系光纤中刻入多个 FBG 构成低损耗 F-P 腔的 RFLs 方案^[147]。泵浦源是 3.01 μm 的准连续掺铒氟化物光纤激光器, 输出的信号光为 3.34 μm , 最大平均功率为 47 mW, 对应的峰值功率为 0.6 W; 2014 年, 课题组再次采用 F-P 腔结构实现两级级联 RFLs(泵浦波长仍为 3.01 μm), 级联拉曼频移产生的二阶拉曼激光波长为 3.77 μm , 最大平均功率为 9 mW, 对应峰值功率为 112 mW, 这

是迄今为止在 RFLs 中获得的最长波长^[148]。

4.3 超短脉冲激光

研究人员还将典型的短脉冲产生技术(如调 Q、增益开关、锁模和同步泵浦等)应用于 RFLs, 以实现波长灵活的(超)短脉冲激光^[149]。2013 年, 西班牙纳瓦拉公立大学 Bravo 等首次报道了基于主动调 Q 技术的 RFLs, 获得了持续时间为 ~1 ns 的稳定拉曼脉冲序列^[150]。2015 年, 江苏师范大学 Yao 等采用纳秒调 Q 光纤激光器泵浦脉冲 RFA, 实现了最小持续时间为 123 ns 的稳定拉曼激光脉冲序列^[151]。与泵浦脉冲相比, 获得的拉曼激光脉冲宽度大大减小, 这表明增益开关技术是在 RFLs 中获得纳秒拉曼脉冲的有效方法。此外, 锁模技术也已经在 RFLs 中得到广泛应用, 如基于光调制器的主动锁模^[152-153]、基于可饱和吸收体的被动锁模^[154-155]以及其他新型被动锁模技术^[156-158]。近年来, 基于同步泵浦技术的脉冲 RFLs 研究发展迅速, 包括使用光延迟线和光纤展宽器^[159-161], 调整泵浦源的脉冲参数^[162-165]和脉冲 RRFL 等^[166]。

5 发展趋势与展望

5.1 拉曼激光合束

对多束激光进行合束是获得更高功率激光输出

的通用技术手段。典型的拉曼激光合束系统结构如图 15 所示,常通过将多个高功率光纤激光器泵浦源与高光束质量的拉曼激光种子源通过泵浦/信号合束器耦合进同一根拉曼光纤,从而实现高功率高光束质量拉曼激光输出。系统中拉曼光纤可以是多模 GRIN 光纤、也可以是多包层光纤,利用光纤中的拉曼转换过程将种子源功率放大,并实现高光束质量、高功率的拉曼激光输出。与经典的激光相干合成结构相比,上述系统不需要对各路激光进行相位锁定;与光谱合成相比,采用该拉曼激光合束后的激光仍为单波长激光^[22]。

此外,由于拉曼光纤激光具有波长灵活、增益带宽宽等优势,原则上可以通过级联拉曼频移产生 1~2 μm 光谱范围内任意波长的高功率激光。因此其可以大幅度提高参与光谱合成的激光束数量,在光谱合成方面同样潜力巨大^[167]。由于可选择的激光波长范围很宽,基于拉曼光纤激光的光谱合成方案可以摒弃对激光线宽要求较高的衍射光学元件,而是采用基于干涉原理的双色镜进行光谱合束,降低合成子束的线宽要求,允许采用更高功率的宽带激光进行合束,进而有利于提升合束的激光功率^[22]。

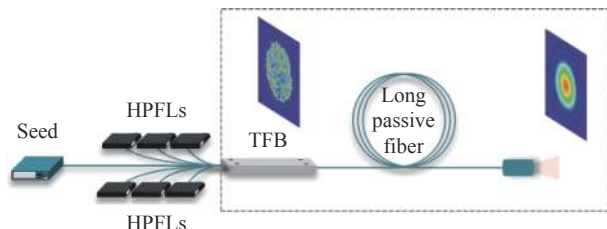


图 15 拉曼激光合束概念示意图

Fig.15 Concept diagram of Raman laser beam combining

5.2 LD 直接泵浦拉曼光纤激光

飞速发展的 LD 可以用于直接泵浦 RFLs,相关系统具有电光效率高、系统集成度高、无光子暗化、功率提升潜力大等特点^[91, 168]。俄罗斯科学院 Babin 等基于 LD 直接泵浦的方式已经实现了数十瓦量级高光束质量拉曼激光输出,亮度提升倍数高达 73 倍,展示出 LD 直接泵浦与 RFLs 中的亮度增强效应结合将带来“性能倍增”的效果^[99]。然而,由于 RFLs 中的拉曼增益要求,泵浦源需具有较高亮度,功率提升受制于高亮度 LD 泵浦源。在此情况下,可以通过研制特

殊结构或特种材料的拉曼光纤(如锥形光纤、折射率沟壑光纤)实现高阶模式以及高阶拉曼的滤除等方式加以解决^[169-170]。

5.3 高功率光纤激光器中模式动力学与非线性效应机理研究

目前,高功率光纤激光器中 SRS 与模式动力学以及其他非线性效应相互作用的机理也成为理论研究的前沿。主要研究内容包括掺镱-拉曼混合增益光纤放大器中的模式动力学、高功率 RFA 中模式不稳定性 (Transverse Modal Instability, TMI) 等。2020 年,德国耶拿大学的 Victor Distler 等首次在实验上观察到掺镱-拉曼混合增益光纤放大器输出光束质量退化以及 TMI 现象,通过对输出光斑进行傅里叶变换以及模式分解,发现无源光纤中的 TMI 阈值低于掺镱光纤,且 TMI 导致的后向散射又将降低掺镱光纤中的 TMI 阈值^[171]。国防科技大学课题组的 Hanwei Zhang 等在掺镱-拉曼混合增益光纤放大器中也观察到了光束质量退化现象,并分析了泵浦模式成分对光束质量的影响^[172]。美国空军实验室的 Shadi Naderi 等在理论上分析了 RFA 中 TMI 主要来源于泵浦与信号同时引起的折射率调制,取决于热负载,且与光纤长度、泵浦方向等无关^[173]。国防科技大学课题组的 Wei Liu 等对 RFA 中四波混频效应与二阶拉曼阈值进行了理论研究,提出通过采用时域稳定泵浦光提高二阶拉曼阈值的新思路^[174]。

6 结束语

经过 50 年的发展,拉曼光纤激光充分展现了在功率提升、波长捷变和宽带可调等方面的特点,在通信传感、先进制造和科学研究中得到了广泛应用。随着半导体行业的发展、光纤设计能力和制备工艺的提提升以及相关基础研究的不断深入,拉曼光纤激光将会朝着更高功率、更宽光谱范围、更高效率、可多调控维度等方向发展,并继续在经济社会发展、前沿科学研究和国家安全等领域得到应用。

参考文献:

[1] Maiman T H. Stimulated optical radiation in ruby [J]. *Nature*, 1960, 187(4736): 493-494.
 [2] Woodbury E J, Ng W K. Ruby laser operation in the near IR

- [J]. *Proc IRE*, 1962, 50: 2367.
- [3] Eckhardt G, Hellwarth R W, Mcclung F J, et al. Stimulated Raman scattering from organic liquids [J]. *Physical Review Letters*, 1962, 9(11): 455-457.
- [4] Raman C V, Krishnan K S. A new type of secondary radiation [J]. *Nature*, 1928, 121(3048): 501-502.
- [5] Ippen E P. Low-power quasi-CW Raman oscillator [J]. *Applied Physics Letters*, 1970, 16(8): 303-305.
- [6] Stolen R H, Ippen E P, Tynes A R. Raman oscillation in glass optical waveguide [J]. *Applied Physics Letters*, 1972, 20(2): 62-64.
- [7] Blow K J, Wood D. Theoretical description of transient stimulated Raman scattering in optical fibers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1989, 25(12): 2665-2673.
- [8] Headley C, Agrawal G P. Unified description of ultrafast stimulated Raman scattering in optical fibers [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1996, 13(10): 2170-2177.
- [9] Santhanam J, Agrawal G P. Raman-induced spectral shifts in optical fibers: General theory based on the moment method [J]. *Optics Communications*, 2003, 222(1): 413-420.
- [10] Lin Q, Agrawal G P. Vector theory of stimulated Raman scattering and its application to fiber-based Raman amplifiers [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2003, 20(8): 1616-1631.
- [11] Armstrong J A, Bloembergen N, Ducuing J, et al. Interactions between light waves in a nonlinear dielectric [J]. *Physical Review*, 1962, 127(6): 1918-1939.
- [12] Bloembergen N, Shen Y R. Multimode effects in stimulated Raman emission [J]. *Physical Review Letters*, 1964, 13(24): 720-724.
- [13] Shen Y R, Bloembergen N. Theory of stimulated Brillouin and Raman scattering [J]. *Physical Review*, 1965, 137(6A): A1787-A1805.
- [14] Bloembergen N. The stimulated Raman effect [J]. *American Journal of Physics*, 1967, 35(11): 989-1023.
- [15] Galeener F L, Mikkelsen J C, Geils R H, et al. The relative Raman cross sections of vitreous SiO₂, GeO₂, B₂O₃, and P₂O₅ [J]. *Applied Physics Letters*, 1978, 32(1): 34-36.
- [16] Sirleto L, Antonietta Ferrara M, Nikitin T, et al. Giant Raman gain in silicon nanocrystals [J]. *Nature Communications*, 2012, 3(1): 1220.
- [17] Sirleto L, Vergara A, Ferrara M A. Advances in stimulated Raman scattering in nanostructures [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2017, 9(1): 169-217.
- [18] Dianov E M. Advances in Raman fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2002, 20(8): 1457-1462.
- [19] Stolen R H. The early years of fiber nonlinear optics [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(9): 1021-1031.
- [20] Feng Y. Raman Fiber Lasers[M]//William T Rhodes. Springer Series in Optical Sciences. Berlin: Springer, 2017.
- [21] Supradeepa V R, Feng Y, Nicholson J W. Raman fiber lasers [J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(2): 023001.
- [22] Feng Y, Jiang H, Zhang L. Advances in high power Raman fiber laser technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201005. (in Chinese)
- [23] Glick Y, Shamir Y, Sintov Y, et al. Brightness enhancement with Raman fiber lasers and amplifiers using multi-mode or multi-clad fibers [J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 52: 101955.
- [24] Islam M N. Raman amplifiers for telecommunications [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2002, 8(3): 548-559.
- [25] Namiki S, Seo K, Tsukiji N, et al. Challenges of Raman amplification [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2006, 94(5): 1024-1035.
- [26] Pelouch W S. Raman amplification: An enabling technology for long-haul coherent transmission systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(1): 6-19.
- [27] Smith R G. Optical power handling capacity of low loss optical fibers as determined by stimulated Raman and Brillouin scattering [J]. *Applied Optics*, 1972, 11(11): 2489-2494.
- [28] Gloge D. Weakly guiding fibers [J]. *Applied Optics*, 1971, 10(10): 2252-2258.
- [29] Stolen R H, Lin C. Two-Photon and Two-Step Absorption in Glass Optical Waveguide[M]//Shashanka S Mitra, Bernard Bendow. Optical Properties of Highly Transparent Solids. Boston, MA: Springer, 1975: 307-315.
- [30] Hasegawa A, Tappert F. Transmission of stationary nonlinear optical pulses in dispersive dielectric fibers. I. Anomalous dispersion [J]. *Applied Physics Letters*, 1973, 23(3): 142-144.
- [31] Stolen R H, Ashkin A. Optical Kerr effect in glass waveguide [J]. *Applied Physics Letters*, 1973, 22(6): 294-296.
- [32] Stolen R H, Ippen E P. Raman gain in glass optical waveguides [J]. *Applied Physics Letters*, 1973, 22(6): 276-278.
- [33] Stolen R H. Raman and Raman gain spectroscopy in optical fibers[C]//Proc 3rd Int Conf Light Scattering in Solids, 1976.
- [34] Lin C, Stolen R H. Backward Raman amplification and pulse steepening in silica fibers [J]. *Applied Physics Letters*, 1976, 29(7): 428-431.
- [35] Hill K O, Kawasaki B S, Johnson D C. Low - threshold cw

- Raman laser [J]. *Applied Physics Letters*, 1976, 29(3): 181-183.
- [36] Jain R K, Lin C, Stolen R H, et al. A high - efficiency tunable cw Raman oscillator [J]. *Applied Physics Letters*, 1977, 30(3): 162-164.
- [37] Johnson D C, Hill K O, Kawasaki B S, et al. Tunable Raman fibre-optic laser [J]. *Electronics Letters*, 1977, 13: 53-55.
- [38] Jain R K, Lin C, Stolen R H, et al. A tunable multiple Stokes cw fiber Raman oscillator [J]. *Applied Physics Letters*, 1977, 31(2): 89-90.
- [39] Dianov E M, Isaev S K, Kornienko L S, et al. Raman laser with optical-fiber resonator [J]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1978, 8: 744-746.
- [40] Johnson D C, Hill K O, Kawasaki B S. Continuous-wave optical-fiber Raman oscillator employing a two-mirror resonator configuration [J]. *Applied Optics*, 1978, 17(19): 3032-3034.
- [41] Lin C, Cohen L G, Stolen R H, et al. Near-infrared sources in the 1–1.3 μm region by efficient stimulated Raman emission in glass fibers [J]. *Optics Communications*, 1977, 20(3): 426-428.
- [42] Lin C, French W G. A near - infrared fiber Raman oscillator tunable from 1.07 to 1.32 μm [J]. *Applied Physics Letters*, 1979, 34(10): 666-668.
- [43] Chinlon L. Designing optical fibers for frequency conversion and optical amplification by stimulated Raman scattering and phase-matched four-photon mixing [J]. *Journal of Optical Communications*, 1983, 4(1): 2-9.
- [44] Koepf G A. Amplification by stimulated Raman scattering in low-loss optical fibers [J]. *Archiv der Elektronik und Ubertragung*, 1983, 37: 145-152.
- [45] Aoki Y, Kishida S, Honmou H, et al. Efficient backward and forward pumping CW Raman amplification for InGaAsP laser light in silica fibres [J]. *Electronics Letters*, 1983, 19(16): 620-622.
- [46] Ohmori Y, Sasaki Y, Edahiro T. Stimulated Raman scattering in optical fibers [J]. *Trans IECE Jpn*, 1983, E-66: 146.
- [47] Aoki Y. Properties of fiber Raman amplifiers and their applicability to digital optical communication systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1988, 6(7): 1225-1239.
- [48] Kean P N, Sinclair B D, Smith K, et al. Experimental evaluation of a fibre Raman oscillator having fibre grating reflectors [J]. *Journal of Modern Optics*, 1988, 35(3): 397-406.
- [49] Snitzer E, Po H, Hakimi F, et al. Double-clad, offset core Nd fiber laser[C]//Proceedings of the Optical Fiber Sensors, New Orleans, Louisiana, F, 1988: PD5.
- [50] Kafka D J. Laser diode pumped fiber lasers with pump cavity: United States, 4829529[P]. 1989-05-09.
- [51] Druehl K, Wenzel R G, Carlsten J L. Observation of solitons in stimulated Raman scattering [J]. *Physical Review Letters*, 1983, 51(13): 1171-1174.
- [52] Mitschke F M, Mollenauer L F. Discovery of the soliton self-frequency shift [J]. *Optics Letters*, 1986, 11(10): 659-661.
- [53] Islam M N, Mollenauer L F, Stolen R H, et al. Amplifier/compressor fiber Raman lasers [J]. *Optics Letters*, 1987, 12(10): 814-816.
- [54] Gouveia-Neto A S, Gomes A S L, Taylor J R, et al. Cascade Raman soliton fiber ring laser [J]. *Optics Letters*, 1987, 12(11): 927-929.
- [55] Gouveia-Neto A S, Gomes A S L, Taylor J R. High-efficiency single-pass solitonlike compression of Raman radiation in an optical fiber around 1.4 μm [J]. *Optics Letters*, 1987, 12(12): 1035-1037.
- [56] Po H, Cao J D, Laliberte B M, et al. High power neodymium-doped single transverse mode fibre laser [J]. *Electronics Letters*, 1993, 29(17): 1500-1501.
- [57] Muendel M, Engstrom B, Kea D, et al. 35-watt cw single-mode ytterbium fiber laser at 1.1 μm [J]. *Optics & Photonics News*, 1997, 8(10): 51-52.
- [58] Grubb S G, Erdogan T, Mizrahi V, et al. 1.3 μm cascaded Raman amplifier in germanosilicate fibers[C]//Proceedings of the Optical Amplifiers and Their Applications, 1994: PD3.
- [59] Dianov E M, Grekov M V, Bufetov I A, et al. CW high power 1.24 μm and 1.48 μm Raman lasers based on low loss phosphosilicate fibre [J]. *Electronics Letters*, 1997, 33(18): 1542-1544.
- [60] Dianov E M, Fursa D G, Abramov A A, et al. Low-loss high germania-doped fiber: A promising gain medium for 1.3 μm Raman amplifier[C]//Proceedings of the in Proc 20 th Eur Conf Opt Commun, 1994.
- [61] Dianov E M, Prokhorov A M. Medium-power CW Raman fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, 6(6): 1022-1028.
- [62] Islam M N. Raman Amplifiers for Telecommunications 2[M]. New York: Springer, 2004.
- [63] Siddiqui A S, Vienne G. The Effect of pump and signal laser fluctuations on the output signal from Raman and Brillouin optical fiber amplifiers [J]. *Journal of Optical Communications*, 1992, 13(1): 33-36.
- [64] Chinn S R J E L. Analysis of counter-pumped small-signal fibre Raman amplifiers [J]. *Electronics Letters*, 1997, 33(7):

- 607-608.
- [65] Kidorf H, Rottwitt K, Nissov M, et al. Pump interactions in a 100-nm bandwidth Raman amplifier [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, 11(5): 530-532.
- [66] Emori Y, Namiki S. 100 nm bandwidth flat gain Raman amplifiers pumped and gain-equalized by 12-wavelength-channel WDM high power laser diodes[C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference and the International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication, 1999.
- [67] Emori Y, Akasaka Y, Namiki S J E L. Broadband lossless DCF using Raman amplification pumped by multichannel WDM laser diodes [J]. *Electronics Letters*, 1998, 34(22): 2145.
- [68] Hansen P B, Jacobovitz-Veselka G, Grüner-Nielsen L, et al. Raman amplification for loss compensation in dispersion compensating fibre modules [J]. *Electronics Letters*, 1998, 34(11): 1136-1137.
- [69] Lamon D, Stuyvaert J. Raman amplification[Z]. Porto, Portugal: Universidade do Porto, 2007-2008.
- [70] Gnauck A H, Charlet G, Tran P, et al. 25.6-Tb/s WDM Transmission of Polarization-Multiplexed RZ-DQPSK Signals [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(1): 79-84.
- [71] Perlin V E, Winful H G. Distributed feedback fiber Raman laser [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2001, 37(1): 38-47.
- [72] Hu Y, Broderick N G R. Improved design of a DFB Raman fibre laser [J]. *Optics Communications*, 2009, 282(16): 3356-3359.
- [73] Babin S A, Churkin D V, Kablukov S I, et al. All-fiber widely tunable Raman fiber laser with controlled output spectrum [J]. *Optics Express*, 2007, 15(13): 8438-8443.
- [74] Bélanger E, Bernier M, Faucher D, et al. High-power and widely tunable all-fiber Raman laser [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(12): 1696-1701.
- [75] Thielen P A, Shaw L B, Pureza P C, et al. Small-core As-Se fiber for Raman amplification [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(16): 1406-1408.
- [76] Jackson S D, Anzueto-Sánchez G. Chalcogenide glass Raman fiber laser [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(22): 221106.
- [77] Feng Y, Taylor L R, Calia D B. 150 W highly-efficient Raman fiber laser [J]. *Optics Express*, 2009, 17(26): 23678-23683.
- [78] Nilsson J, Sahu J K, Jang J N, et al. Cladding-pumped Raman fiber amplifier[C]//Optical Amplifiers and Their Applications (OAA 2002), 2002: PD2.
- [79] Codemard C A, Dupriez P, Jeong Y, et al. High-power continuous-wave cladding-pumped Raman fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(15): 2290-2292.
- [80] Baek S H, Roh W B. Single-mode Raman fiber laser based on a multimode fiber [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(2): 153-155.
- [81] Terry N B. An explanation of SRS beam cleanup in graded [J]. *Optics Express*, 2007, 15(26): 17509-17519.
- [82] Chen Y, Yao T, Xiao H, et al. 3 kW passive-gain-enabled metalized Raman fiber amplifier with brightness enhancement [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 39(6): 1785-1790.
- [83] Xiao Q, Yan P, Li D, et al. Bidirectional pumped high power Raman fiber laser [J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 6758-6768.
- [84] Li J, Du J, Ma L, et al. Second-order few-mode Raman amplifier for mode-division multiplexed optical communication systems [J]. *Optics Express*, 2017, 25(2): 810-820.
- [85] Glick Y, Shamir Y, Aviel M, et al. 1.2 kW clad pumped Raman all-passive-fiber laser with brightness enhancement [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(19): 4755-4758.
- [86] Nicholson J W, Yan M F, Wisk P, et al. Raman fiber laser with 81 W output power at 1480 nm [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(18): 3069-3071.
- [87] Codemard C A, Ji J, Sahu J K, et al. 100-W CW cladding-pumped Raman fiber laser at 1120 nm[C]//Proceedings of the SPIE, Fiber Lasers VII: Technology, Systems, and Applications, 2010, 7580: 75801N.
- [88] Kablukov S, Dontsova E, Zlobina E, et al. An LD-pumped Raman fiber laser operating below 1 μm [J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(8): 085103.
- [89] Hanwei Z, Hu X, Pu Z, et al. 119-W monolithic single-mode 1173-nm Raman fiber laser [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(5): 1501706.
- [90] Liu J, Shen D, Huang H, et al. High-power and highly efficient operation of wavelength-tunable Raman fiber lasers based on volume Bragg gratings [J]. *Optics Express*, 2014, 22(6): 6605-6612.
- [91] Yao T, Harish A, Sahu J, et al. High-power continuous-wave directly-diode-pumped fiber Raman lasers [J]. *Applied Sciences*, 2015, 5(4): 1323-1336.
- [92] Glick Y, Fromzel V, Zhang J, et al. High power, high efficiency diode pumped Raman fiber laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2016, 13(6): 065101.
- [93] Zlobina E A, Kablukov S I, Wolf A A, et al. Nearly single-mode Raman lasing at 954 nm in a graded-index fiber directly pumped by a multimode laser diode [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(1): 9-12.

- [94] Zlobina E A, Kablukov S I, Wolf A A, et al. Generating high-quality beam in a multimode LD-pumped all-fiber Raman laser [J]. *Optics Express*, 2017, 25(11): 12581-12587.
- [95] Glick Y, Fromzel V, Zhang J, et al. High-efficiency, 154 W CW, diode-pumped Raman fiber laser with brightness enhancement [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(3): B97-B102.
- [96] Glick Y, Shamir Y, Wolf A A, et al. Highly efficient all-fiber continuous-wave Raman graded-index fiber laser pumped by a fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(5): 1027-1030.
- [97] Evmenova E A, Kablukov S I, Nemov I N, et al. High-efficiency LD-pumped all-fiber Raman laser based on a 100 μm core graded-index fiber [J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(9): 095101.
- [98] Shamir Y, Glick Y, Aviel M, et al. 250 W clad pumped Raman all-fiber laser with brightness enhancement [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(4): 711-714.
- [99] Kuznetsov A G, Kablukov S I, Podivilov E V, et al. Brightness enhancement and beam profiles in an LD-pumped graded-index fiber Raman laser [J]. *OSA Continuum*, 2021, 4(3): 1034-1040.
- [100] Kuznetsov A G, Nemov I N, Wolf A A, et al. Multimode LD-pumped all-fiber Raman laser with excellent quality of 2(nd)-order Stokes output beam at 1019 nm [J]. *Opt Express*, 2021, 29(11): 17573-17580.
- [101] Fan C, Chen Y, Yao T, et al. Over 400 W graded-index fiber Raman laser with brightness enhancement [J]. *Optics Express*, 2021, 29(13): 19441-19449.
- [102] Zhang L, Liu C, Jiang H, et al. Kilowatt ytterbium-Raman fiber laser [J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 18483-18489.
- [103] Rekas M, Schmidt O, Zimer H, et al. Over 200 W average power tunable Raman amplifier based on fused silica step index fiber [J]. *Applied Physics B*, 2012, 107(3): 711-716.
- [104] Supradeepa V R, Nicholson J W. Power scaling of high-efficiency 1.5 μm cascaded Raman fiber lasers [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(14): 2538-2541.
- [105] Zhang L, Jiang H, Cui S, et al. Integrated ytterbium-Raman fiber amplifier [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(7): 1933-1936.
- [106] Liu J, Tan F, Shi H, et al. High-power operation of silica-based Raman fiber amplifier at 2147 nm [J]. *Optics Express*, 2014, 22(23): 28383-28389.
- [107] Zhang H, Xiao H, Zhou P, et al. High power Yb-Raman combined nonlinear fiber amplifier [J]. *Optics Express*, 2014, 22(9): 10248-10255.
- [108] Zhang H, Tao R, Zhou P, et al. 1.5-kW Yb-Raman combined nonlinear fiber amplifier at 1120 nm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(6): 628-630.
- [109] Chen Y, Leng J, Xiao H, et al. High-efficiency all-fiber Raman fiber amplifier with record output power [J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(8): 085104-085109.
- [110] Chen Y, Leng J, Xiao H, et al. Pure passive fiber enabled highly efficient Raman fiber amplifier with record kilowatt power [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 28334-28339.
- [111] Wang Z, Xiao Q, Huang Y, et al. Dual-wavelength bidirectional pumped high-power Raman fiber laser [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2019, 7: e5.
- [112] Chen Y, Yao T, Xiao H, et al. High-power cladding pumped Raman fiber amplifier with a record beam quality [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(8): 2367-2370.
- [113] Chen Y, Yao T, Huang L, et al. 2 kW high-efficiency Raman fiber amplifier based on passive fiber with dynamic analysis on beam cleanup and fluctuation [J]. *Optics Express*, 2020, 28(3): 3495-3504.
- [114] Chen Y, Yao T, Xiao H, et al. Greater than 2 kW all-passive fiber Raman amplifier with good beam quality [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2020, 8: e33.
- [115] Fan C, Xiao H, Yao T, et al. Kilowatt level Raman amplifier based on 100 microm core diameter multimode GRIN fiber with $M(2) = 1.6$ [J]. *Opt Lett*, 2021, 46(14): 3432-3435.
- [116] Zhang L, Dong J, Feng Y. High-power and high-order random Raman fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(3): 1-6.
- [117] Balaswamy V, Harshitha S, Ramachandran S, et al. High power, ultra-high spectral purity, broadly wavelength tunable cascaded Raman fiber laser[C]//Proceedings of the SPIE, Fiber Lasers XVI: Technology and Systems, 2019, 10897: 108970N.
- [118] Balaswamy V, Aparanji S, Arun S, et al. High-power, widely wavelength tunable, grating-free Raman fiber laser based on filtered feedback [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(2): 279-282.
- [119] Feng Y, Huang S, Shirakawa A, et al. 589 nm Light Source Based on Raman Fiber Laser [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004, 43(6A): L722-L724.
- [120] Kuznetsov A G, Evmenova E A, Dontsova E I, et al. Frequency doubling of multimode diode-pumped GRIN-fiber Raman lasers [J]. *Optics Express*, 2019, 27(24): 34760-34768.
- [121] Runcorn T H, Legg T, Murray R T, et al. Fiber-integrated frequency-doubling of a picosecond Raman laser to 560 nm [J]. *Optics Express*, 2015, 23(12): 15728-15733.
- [122] Chandran A M, Runcorn T H, Murray R T, et al. Nanosecond pulsed 620 nm source by frequency-doubling a phosphosilicate Raman fiber amplifier [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(24): 6025-6028.

- [123] Kablukov S I, Babin S A, Churkin D V, et al. Frequency doubling of a Raman fiber laser [J]. *Laser Physics*, 2010, 20(2): 365-371.
- [124] Cui S, Qian J, Zeng X, et al. A watt-level yellow random laser via single-pass frequency doubling of a random Raman fiber laser [J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 64: 102552.
- [125] Cui S, Zeng X, Cheng X, et al. Generation of 10 W yellow fiber laser by frequency doubling of cascaded Raman laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(16): 1601006. (in Chinese)
- [126] Supradeepa V R, Nicholson J W, Feder K. Continuous wave erbium-doped fiber laser with output power of >100 W at 1550 nm in-band core-pumped by a 1480 nm Raman fiber laser[C]//2012 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2012: 1-2
- [127] Wang X, Zhou P, Zhang H, et al. 100 W-level Tm-doped fiber laser pumped by 1173 nm Raman fiber lasers [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(15): 4329-4332.
- [128] Jackson S D. Mid infrared holmium fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2006, 42(2): 187-191.
- [129] Wang X, Zhou P, Miao Y, et al. Raman fiber laser-pumped high-power, efficient Ho-doped fiber laser [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2014, 31(10): 2476-2479.
- [130] Zhang H, Zhou P, Wang X, et al. Hundred-watt-level high power random distributed feedback Raman fiber laser at 1150 nm and its application in mid-infrared laser generation [J]. *Optics Express*, 2015, 23(13): 17138-17144.
- [131] 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.
- [132] Sugavanam S, Sorokina M, Churkin D V. Spectral correlations in a random distributed feedback fibre laser [J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 15514.
- [133] Pinto A M R, Lopez-Amo M, Kobelke J, et al. Temperature fiber laser sensor based on a hybrid cavity and a random mirror [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(8): 1168-1172.
- [134] Wang Z, Sun W, Wu H, et al. Long-distance random fiber laser point sensing system incorporating active fiber [J]. *Optics Express*, 2016, 24(20): 22448-22453.
- [135] Miao S, Zhang W, Song Y, et al. High-resolution random fiber laser acoustic emission sensor [J]. *Optics Express*, 2020, 28(9): 12699-12708.
- [136] Tan M, Rosa P, Le S T, et al. Transmission performance improvement using random DFB laser based Raman amplification and bidirectional second-order pumping [J]. *Optics Express*, 2016, 24(3): 2215-2221.
- [137] Monet F, Boisvert J S, Kashyap R. A simple high-speed random number generator with minimal post-processing using a random Raman fiber laser [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 13182.
- [138] Xu J. The investigation of high power random fiber laser and the respected time-frequency characteristics[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018. (in Chinese)
- [139] Evmenova E A, Kuznetsov A G, Nemov I N, et al. 2nd-order random lasing in a multimode diode-pumped graded-index fiber [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 17495.
- [140] Zhang H, Ye J, Zhou P, et al. Tapered-fiber-enabled high-power, high-spectral-purity random fiber lasing [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(17): 4152-4155.
- [141] Zhang H, Huang L, Song J, et al. Quasi-kilowatt random fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(11): 2613-2616.
- [142] Song J, Ren S, Liu W, et al. Temporally stable fiber amplifier pumped random distributed feedback Raman fiber laser with record output power [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(19): 5031-5034.
- [143] Chen Y, Fan C, Yao T, et al. Brightness enhancement in random Raman fiber laser based on a graded-index fiber with high-power multimode pumping [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(5): 1185-1188.
- [144] Bernier M, Faucher D, Vallée R, et al. Bragg gratings photoinduced in ZBLAN fibers by femtosecond pulses at 800 nm [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(5): 454-456.
- [145] Fortin V, Bernier M, Carrier J, et al. Fluoride glass Raman fiber laser at 2185 nm [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(21): 4152-4154.
- [146] Fortin V, Bernier M, Faucher D, et al. 3.7 W fluoride glass Raman fiber laser operating at 2231 nm [J]. *Opt Express*, 2012, 20(17): 19412-19419.
- [147] Bernier M, Fortin V, Caron N, et al. Mid-infrared chalcogenide glass Raman fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(2): 127-129.
- [148] Bernier M, Fortin V, El-Amraoui M, et al. 3.77 μm fiber laser based on cascaded Raman gain in a chalcogenide glass fiber [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(7): 2052-2055.
- [149] Liu J, Wu J, Chen H, et al. Short-pulsed Raman fiber laser and its dynamics [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2020, 64(1): 214201.
- [150] Bravo M, Fernandez-Vallejo M, Lopez-Amo M. Internal modulation of a random fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(9): 1542-1544.

- [151] Yao W, Chen B, Zhang J, et al. High-average-power operation of a pulsed Raman fiber amplifier at 1686 nm [J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 11007-11012.
- [152] Yang X, Zhang L, Jiang H, et al. Actively mode-locked Raman fiber laser [J]. *Optics Express*, 2015, 23(15): 19831-19836.
- [153] Kuznetsov A G, Kharenko D S, Podivilov E V, et al. Fifty-ps Raman fiber laser with hybrid active-passive mode locking [J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 16280-16285.
- [154] Pan W, Zhou J, Zhang L, et al. Rectangular pulse generation from a mode locked Raman fiber laser [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(4): 1333-1337.
- [155] Chamorovskiy A, Rautiainen J, Lyytikäinen J, et al. Raman fiber laser pumped by a semiconductor disk laser and mode locked by a semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(20): 3529-3531.
- [156] Schröder J, Alasia D, Sylvestre T, et al. Dynamics of an ultrahigh-repetition-rate passively mode-locked Raman fiber laser [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2008, 25(7): 1178-1186.
- [157] Luo Z, Zhong M, Xiong F, et al. Intermode beating mode-locking technique for O-band mixed-cascaded Raman fiber lasers [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(4): 502-505.
- [158] Tarasov N, Perego A M, Churkin D V, et al. Mode-locking via dissipative Faraday instability [J]. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 12441.
- [159] de Matos C J S, Popov S V, Taylor J R. Short-pulse, all-fiber, Raman laser with dispersion compensation in a holey fiber [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(20): 1891-1893.
- [160] Lin D, Alam S-U, Teh P S, et al. Tunable synchronously-pumped fiber Raman laser in the visible and near-infrared exploiting MOPA-generated rectangular pump pulses [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(11): 2050-2052.
- [161] Kharenko D S, Efremov V D, Evmenova E A, et al. Generation of Raman dissipative solitons near 1.3 microns in a phosphosilicate-fiber cavity [J]. *Optics Express*, 2018, 26(12): 15084-15089.
- [162] Chen H, Chen S-P, Jiang Z-F, et al. All-fiberized synchronously pumped 1120 nm picosecond Raman laser with flexible output dynamics [J]. *Optics Express*, 2015, 23(18): 24088-24096.
- [163] Churin D, Olson J, Norwood R A, et al. High-power synchronously pumped femtosecond Raman fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(11): 2529-2532.
- [164] Kobtsev S, Kukarin S, Kokhanovskiy A. Synchronously pumped picosecond all-fibre Raman laser based on phosphorus-doped silica fibre [J]. *Optics Express*, 2015, 23(14): 18548-18553.
- [165] Huang Y, Wang K, Luo Z. Ultrafast Raman fiber laser based on cavity matching scheme and heavily germania-core fiber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(13): 2914-2919.
- [166] Pan W, Jiang H, Yang X, et al. Ultrafast Raman fiber Laser with Random Distributed Feedback [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(4): 1700326.
- [167] Schmidt O, Wirth C, Tsybin I, et al. Average power of 1.1 kW from spectrally combined, fiber-amplified, nanosecond-pulsed sources [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(10): 1567-1569.
- [168] Yao T, Nilsson J. Short-wavelength fiber Raman laser pulse-pumped by multimode laser diode at 806 nm[C]//Specialty Optical Fibres (SOF) Topical Meeting, 2012.
- [169] Filippov V, Chamorovskii Y, Kerttula J, et al. Double clad tapered fiber for high power applications [J]. *Optics Express*, 2008, 16(3): 1929-1944.
- [170] Jain D, Jung Y, Nunez-Velazquez M, et al. Extending single mode performance of all-solid large-mode-area single trench fiber [J]. *Optics Express*, 2014, 22(25): 31078-31091.
- [171] Distler V, Möller F, Strecker M, et al. Transverse mode instability in a passive fiber induced by Stimulated Raman Scattering [J]. *Optics Letters*, 2020, 28(15): 22819-22828.
- [172] Zhang H, Xiao H, Wang X, et al. Mode dynamics in high-power Yb-Raman fiber amplifier [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(13): 3394-3397.
- [173] Naderi S, Dajani I, Grosek J, et al. Theoretical and numerical treatment of modal instability in high-power core and cladding-pumped Raman fiber amplifiers [J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 16550-16565.
- [174] Liu W, Ma P, Zhou P, et al. Effects of four-wave-mixing in high-power Raman fiber amplifiers [J]. *Optics Express*, 2020, 28(1): 593-606.